

**ESCALAMIENTO COLUMNA DE ADSORCIÓN PARA LA REMOCIÓN DE  
CROMO EN LAS AGUAS RESIDUALES DE LA INDUSTRIA DE CURTIEMBRE  
POR MEDIO DE LA CÁSCARA DE BANANO**

**DANNA MARCELA BERNAL MORALES  
NICCOLE ANDREA AGUIRRE DOMELIN**

**Proyecto integral de grado para optar por el título de  
INGENIERO QUÍMICO**

**Director**

**Adriana María Mesa Gómez**

**Ingeniero Químico.**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA  
FACULTAD DE INGENIERÍAS  
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BOGOTÁ D.C**

**2022**

**NOTA DE ACEPTACIÓN**

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

**Ing. Adriana María Mesa Gómez**

**Firma del director**

---

**Firma del Jurado**

---

**Firma del Jurado**

**Bogotá D.C. Febrero 2022.**

## **DIRECTIVOS DE LA UNIVERSIDAD**

Presidente de Universidad y Rector del Claustro.

Dr. Mario Posada García Peña

Consejero Institucional

Dr. Luis Jaime Posada García Peña

Vicerrectora Académica y de Investigaciones

Dra. Alexandra Mejía Guzmán

Vicerrector Administrativo y Financiero

Dr. Ricardo Alfonzo Peñaranda Castro

Secretario General.

Dr. José Luis Macías Rodríguez

Decano de la Facultad de Ingenierías.

Dra. Naliny Patricia Guerra prieto

Director del Programa de Ingeniería Química.

Ing. Nubia Liliana Becerra Ospina

Las directivas de la universidad de América. Los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el Presente documento Estos corresponden únicamente a los autores.

## **DEDICATORIA**

Le agradezco principalmente a Dios por darme fortaleza y bienestar espiritual, por haberme bendecido con las personas de mi entorno, principalmente con mi familia que han estado presentes en los momentos más importantes de mi vida incluido este, que personalmente ha sido un gran motivo de felicidad y dicha para todos.

Dedico este proyecto a mis padres, quienes han sido mi motor, sus esfuerzos y dedicación me han inspirado en todo este camino, ya que, a pesar de las dificultades, su amor, paciencia y perseverancia han sido el ejemplo y apoyo que he requerido, solo tengo palabras de amor y agradecimiento para ellos.

Mis hermanos que han estado en los momentos que he necesitado un consejo y apoyo, me han alegrado en este largo camino, me han enseñado y ayudado a ser la persona que soy.

A mis amigas que han sido una gran compañía, con las que he compartido momentos increíbles, quienes muchas veces me apoyaron a seguir y fueron motivo de muchas alegrías.

**DANNA MARCELA BERNAL MORALES**

Inicialmente a Dios por haberme dado la vida y la sabiduría suficiente para lograr culminar con esta etapa.

A mi mamá por escucharme en los momentos que lo necesite, por darme siempre los mejores consejos, depositar su confianza en mí y creer en mis capacidades, gracias por estar siempre en todos los momentos.

A mi papá por forjar mi carácter, ser un ejemplo a seguir, por los valores y cualidades inculcadas desde pequeña y su infinita paciencia.

Mi hermano por ser un apoyo incondicional, por sacarme siempre una sonrisa y entenderme.

Mi abuela y mi tío por ayudarme, aconsejarme y estar siempre para mí.

Finalmente, a Danna y Lis, por ser mis amigas incondicionales, por el apoyo y los momentos únicos.

**NICCOLE ANDREA AGUIRRE DOMELIN**

## TABLA DE CONTENIDO

	<b>pág.</b>
RESUMEN	13
INTRODUCCIÓN	14
OBJETIVOS	15
1. MARCO TEÓRICO	16
1.1. Diseño columna de adsorción	16
1.2. Modelamiento de columnas de adsorción	16
1.3. Adsorción por medio de residuos agroindustriales	16
1.4. Tratamiento metales pesados presentes en aguas residuales de curtiembre	16
1.4.1. Cromo	17
1.4.2. Curtiembres	17
1.5. Escalamiento Industrial	17
1.6. Adsorción	18
1.6.1. Operaciones de adsorción	19
1.6.2. Modelos teóricos de la adsorción	20
1.6.3. Isotermas de adsorción	20
1.6.4. Cinética de adsorción	20
2.GENERALIDADES Y CARACTERIZACIÓN CONTENIDO DE CROMO EN AGUAS DE CURTIEMBRE	22
2.1. Generalidades	22
2.1.1. Ubicación	22
2.1.2. Descripción del sector	23
2.1.3. Proceso Curtiembre	23
2.2. Modelos teóricos de la adsorción	25
2.2.1. Modelos isotérmicos de adsorción.	25
2.2.2. Modelos cinéticos de adsorción.	26
2.3. Modelos matemáticos para el diseño de columnas de adsorción	28

2.3.1.	<i>Modelos matemáticos empíricos</i>	28
2.3.2.	<i>Modelos matemáticos teóricos</i>	29
2.4.	Legislación vigente sector de curtiembre	31
2.5.	Métodos actuales de tratamiento de aguas con metales pesados	31
2.5.1.	<i>Nanofiltración:</i>	32
2.5.2.	<i>Adsorción (convencional)</i>	33
2.5.3.	<i>Electrocoagulación</i>	34
2.5.4.	<i>Biopolímeros</i>	34
2.5.5.	<i>Ceniza Volante</i>	35
2.6.	Adsorbente orgánico: cáscara de banano	37
2.6.1.	<i>Composición química de la cáscara de banano</i>	38
2.7.	Recolección biomasa cáscara de banano	40
2.8.	Recolección muestra de agua de curtiembre para tratamiento	46
3. TRATAMIENTO AGUA RESIDUAL, SISTEMA DE ADSORCIÓN A PARTIR DEL BIOSORBENTE.		52
3.1.	Toma de muestra concentraciones	52
3.2.	Modelos isotérmicos y cinéticos de adsorción	57
3.2.1.	<i>Modelos isotérmicos aplicados al material biosorbente:</i>	57
3.3.	Modelos cinéticos aplicados al material biosorbente:	63
4. DISEÑO CONCEPTUAL COLUMNA DE ADSORCIÓN BASADO EN DATOS EXPERIMENTALES		68
4.1.	Columna de adsorción	70
4.2.	Balance de materia	72
4.3.	Fracción de la capacidad utilizada	75
4.4.	Escalamiento	77
5. EVALUACIÓN DE COSTOS DE ESCALADO COLUMNA DE LECHO FIJO		81
6. CONCLUSIONES		84
ANEXOS		91

## LISTA DE FIGURAS

	<b>pág.</b>
Figura 2. <i>Mecanismo de adsorción</i>	19
Figura 3 <i>Normatividad vigente en Colombia industria curtiembres.</i>	21
Figura 4. <i>Ubicación barrio San Benito, Bogotá D.C.</i>	22
Figura 5. <i>Etapas de producción de la industria curtiembre</i>	24
Figura 6. <i>Modelos cinéticos de adsorción</i>	26
Figura 7. <i>Caracterización de la cadena del Banano</i>	38
Figura 8. <i>Recolección cáscaras de banano</i>	40
Figura 9. <i>Lavado y preparación de cáscaras de banano</i>	41
Figura 10. <i>Secado de cáscaras de banano</i>	42
Figura 11. <i>Cámara de Secado Binder Serie E Classic.Line</i>	43
Figura 12. <i>Peso cáscara de banano.</i>	43
Figura 13. <i>Comparativo peso seco y peso húmedo de la cáscara de banano</i>	46
Figura 15. <i>Disolución dicromato de potasio</i>	49
Figura 16. <i>Solución de ácido sulfúrico.</i>	49
Figura 17. <i>Concentraciones de cromo con coloración por 1.5-difenilcarbazida</i>	50
Figura 18. <i>Toma de peso de muestra de biomasa seca</i>	53
Figura 19. <i>Prueba de jarras para respectiva adsorción</i>	53
Figura 20. <i>Adsorción del agua sin tratamiento</i>	55
Figura 21. <i>Adsorción del agua precipitada.</i>	57
Figura 22. <i>Isoterma de Freundlich.</i>	60
Figura 23. <i>Isoterma de Langmuir.</i>	60
Figura 24. <i>Modelo Pseudo-primer orden</i>	65
Figura 25. <i>Modelo Pseudo-Segundo orden</i>	65
Figura 26. <i>Curva de ruptura, onda de adsorción.</i>	68
Figura 27. <i>Representación columna de lecho empacado</i>	70
Figura 28. <i>Movimiento de la zona de transferencia de masa en el lecho</i>	71

Figura 29. <i>Representación en lecho de LUB y LES</i>	71
Figura 30. <i>Estipulación área bajo la curva</i>	73
Figura 31. <i>Comportamiento ideal en la adsorción</i>	74
Figura 32. <i>Altura de la columna</i>	76

## LISTADO DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. <i>Remoción por nanofiltración</i>	32
Tabla 2. <i>Remoción por adsorción convencional</i>	33
Tabla 3. <i>Remoción por electrocoagulación</i>	34
Tabla 4. <i>Remoción por biopolímeros</i>	35
Tabla 5. <i>Remoción por ceniza volante</i>	36
Tabla 6. <i>Remoción por adsorción de metales pesados por materiales naturales agrícolas e industriales</i>	37
Tabla 7. <i>Características químicas de la cáscara de banano</i>	39
Tabla 8. <i>Lectura muestras proceso de deshidratación.</i>	44
Tabla 9. <i>Comparativo muestras antes y después del secado.</i>	45
Tabla 10. <i>Alícuotas de cromo para curva de calibración</i>	50
Tabla 11. <i>Valores iniciales de concentración de cromo en aguas a tratar</i>	52
Tabla 12. <i>Análisis agua residual directa</i>	54
Tabla 13. <i>Análisis agua residual precipitada</i>	56
Tabla 14. <i>Información para linealización isoterma</i>	59
Tabla 15. <i>Linealizaciones isoterma</i>	59
Tabla 16. <i>Relación <math>R^2</math> obtenido</i>	61
Tabla 17. <i>Constante del modelo isotérmico de freundlich.</i>	62
Tabla 18. <i>Constante del modelo isotérmico de langmuir.</i>	62
Tabla 19. <i>Modelos de Pseudo – Primer Orden y Pseudo – Segundo Orden linealizados.</i>	64
Tabla 20. <i>Modelos cinéticos</i>	64
Tabla 21. <i>Modelo de pseudo – primer orden.</i>	66
Tabla 22. <i>Modelo de pseudo – segundo orden.</i>	67
Tabla 23. <i>Datos diseño columna de lecho fijo escala piloto</i>	79
Tabla 24. <i>Datos escalado columna de lecho fijo</i>	80
Tabla 25. <i>Presupuesto del equipo y el material a utilizar</i>	82

## RESUMEN

Para abarcar completamente nuestra investigación y dar cumplimiento a nuestros objetivos, se realizará inicialmente una revisión bibliográfica rigurosa, con el fin de obtener y comprender completamente el proceso a seguir para nuestro escalamiento de adsorción. En primera instancia se caracterizará el contenido de cromo en las aguas residuales de las curtiembres de San Benito, se tomarán varias muestras de agua de proceso con el contaminante, obteniendo contenido de cromo por medio de un espectrofotómetro UV. Se realizará un tratamiento físico a la cáscara de banano el cual consistirá en recolección, preparación, tratamiento, secado, reducción de tamaño y tamizado; las cuales se basan en etapas definidas que han sido estudiadas y ejecutadas dentro del fenómeno de adsorción.

Se evaluará el comportamiento de la biomasa de cáscara de banano junto con el metal pesado cromo. para esto se realizará la experimentación modo batch donde los resultados obtenidos se llevarán a la construcción de modelos cinéticos e isotérmicos, en este proyecto se tomarán en cuenta las isothermas de Langmuir y de Freundlich, así como el modelo de pseudo primer y segundo orden.

Posteriormente se realizará la construcción de la curva de ruptura y para culminar con la realización del escalamiento se calculará un diseño conceptual teórico a partir de los datos obtenidos en nuestra experimentación por lotes.

**Palabras clave:** adsorción, cáscara de banano, tratamiento de aguas, escalamiento columna, curtiembre.

## INTRODUCCIÓN

A raíz de la falta de implementación industrial con factibilidad económica y sostenibilidad ambiental del tratamiento de aguas procedentes de curtiembres contaminadas por el metal pesado Cromo en Bogotá, se plantea un escalamiento de sistemas de purificación de aguas residuales de este gremio, por medio de cáscara de banano que remueva dicho metal pesado. En la industria de curtiembre se llega a alcanzar un valor de 100 metros cúbicos de agua por tonelada de piel bruta salada procesada. «Se emplean 442 kg de productos químicos por cada tonelada de piel procesada, la sección de mayor consumo es la de curtido equivalente a un 42% del proceso. De la generación total de residuos, que es de 696 kg por tonelada, el 21% contiene cromo (piel partida, recortes, polvo de lijado y virutas), el 7% es sal usada para la conservación de las pieles y el 72% corresponde a residuos libre de cromo (descarne, piel no usada, recortes y residuos de pelo)» [1] En las aguas industriales de las curtiembres de Bogotá se estima que se obtiene 0.025 mg/L de cromo, lo cual representa una cantidad de cromo mucho mayor a las instauradas en el decreto 1594 de 1984, que establece como límite máximo permisible 0.015 mg/L de Cr para vertimiento. Hoy en día las empresas hacen caso omiso a las regulaciones ambientales y contaminan cada vez más. “De las 300 curtiembres ubicadas en San Benito, tan solo 19 cumplen con las normas y 65 están en proceso de aprobación dónde se encuentran en riesgo más 5.000 empleos” [2]

El hecho de seguir pasando por alto la gran cantidad de contaminación que genera esta industria en Bogotá puede generar problemas de salud como “cuadro gastrointestinal en forma de vómitos, dolores abdominales, diarreas y hemorragias intestinales. También han existido casos de muerte, por colapso cardiocirculatorio o insuficiencia renal aguda de por vida” [3]. La gran mayoría de desechos son vertidos al sistema de alcantarillado y al río Tunjuelito sin tratamiento alguno, entre estos desechos se encuentra el metal pesado cromo, el cual es fácilmente adsorbido por la tierra y por todo ser vivo que tenga contacto con ella “ya sea por ingestión, contacto o inhalación, genera efectos muy nocivos de orden genético, mutágeno y carcinógeno. De esta manera, los altos niveles de cromo en las aguas residuales generadas en curtiembres que implementan procedimientos de curtido representan una amenaza para los organismos vivos” [3], adicionalmente a nivel económico la falta de regulación de estas aguas genera el cierre de las curtiembres no tecnificadas que son más del 80%, lo que pronostica una pérdida potencial de empleo y desequilibrio económico.

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo General**

Escalar una columna de adsorción con cáscara de banano para la remoción de cromo en las aguas residuales de las curtiembres de San Benito, Bogotá.

### **Objetivos Específicos**

- Caracterizar el contenido de cromo en aguas residuales de industria curtiembre de San Benito Bogotá.
- Establecer el sistema de adsorción a partir de cáscara de banano a escala laboratorio, tomando sus variables influyentes, parámetros y condiciones enfocadas a la remoción de cromo.
- Diseñar la columna de adsorción para el proceso de remoción de cromo en aguas contaminadas por curtiembres de Bogotá a partir de datos escala laboratorio.
- Estimar los costos de industrialización del escalado de la torre de adsorción.

## **1. MARCO TEÓRICO**

Dado el proyecto, se conserva como base fundamental teórica el diseño de una columna de adsorción y modelamiento de esta, seguido de la adsorción por medio de residuos del aprovechamiento agroindustrial y las generalidades de la descontaminación de metales pesados en aguas de curtiembre.

### **1.1. Diseño columna de adsorción**

Las columnas de adsorción enfocándonos principalmente a las torres de lecho fijo son equipos diseñados para realizar una separación (adsorción), dónde contienen en su interior partículas de un adsorbente en particular, a esta torre ingresa un fluido a tratar el cual entra en contacto con las partículas sólidas, el soluto que sea afín quedará retenido por el adsorbente y de esta manera saldrá un fluido purificado de este compuesto.

### **1.2. Modelamiento de columnas de adsorción**

Para realizar el modelamiento de dichas columnas se deben tener completamente las variables de proceso guiadas a los resultados óptimos que esperamos obtener, adicionalmente se debe realizar un diseño matemático de la torre especificando las variables de dimensionamiento efectuando un camino satisfactorio para el proceso a evaluar y diseñar.

### **1.3. Adsorción por medio de residuos agroindustriales**

Son infinidad los desechos que se producen del sector agrícola y alimenticio, de los cuales un gran porcentaje se pueden utilizar como adsorbentes para diferentes contaminantes o sustancias que no deberían estar presentes en la obtención de algún producto y se requiere separar, tenemos muchísimos residuos aprovechables como lo es la cáscara de naranja, bagazo de caña de azúcar y en nuestro caso específico la cáscara de banano con múltiples ventajas para la adsorción de metales pesados.

### **1.4. Tratamiento metales pesados presentes en aguas residuales de curtiembre**

Existen varios métodos para realizar la remoción de los metales presentes en las fuentes hídricas donde resultan los desechos de la industria de la curtiembre, entre estos se encuentran algunos métodos químicos tales como: osmosis inversa, electrodiálisis, ultrafiltración o fitorremediación, estos procesos resultan siendo poco viables dado su elevado costo y nivel de efectividad.

#### **1.4.1. Cromo**

Es un elemento químico, con símbolo Cr, este se puede encontrar en la tabla periódica con el número atómico 24, es un metal de color blanco plateado, duro y quebradizo, la razón por la que se quiere purificar el agua de este elemento es porque tiene implicaciones en la salud, existe variedad de cromos y el más peligroso es Cr VI que tiene consecuencias como: “erupciones cutáneas, malestar de estómago y úlceras, problemas respiratorio, debilitamiento del sistema inmune, daño en los riñones e hígado, alteración del material genético entre otros.” [4] Por el lado ambiental el más común de encontrar es el Cr III, este se encuentra en varios lugares de la naturaleza y no es tan contaminante como el Cr VI, debe estar en muy bajas concentraciones, ya que puede cambiar el PH de la tierra y así afectar las diferentes cosechas que se dan, también al presentarse en el agua en gran concentración altera la genética de la fauna que vive en esta y sus alrededores además de proporcionar diferentes enfermedades como el cáncer.

#### **1.4.2. Curtiembres**

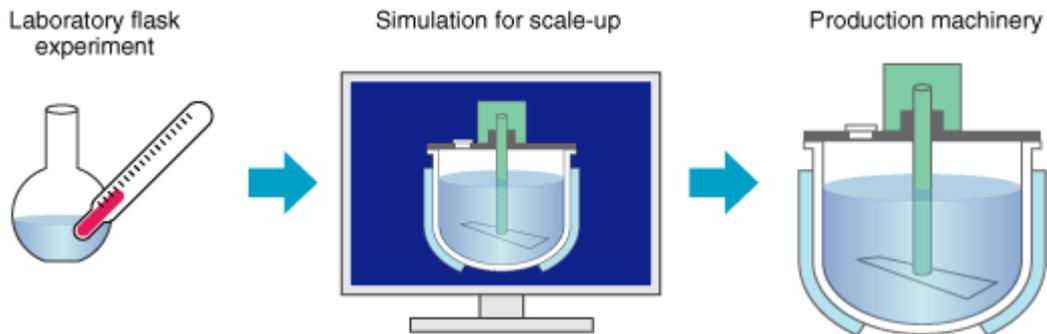
Son establecimientos donde se trabaja con pieles de animales en donde estas se someten a diferentes procedimientos y sustancias para hacerla de mejor calidad y evitar la descomposición, de esta manera dejarla lista para su uso en la industria de fabricación de objetos como bolsos, calzados, chaquetas y más que se realicen con este material, en el barrio San Benito que está ubicado al sur de la ciudad de Bogotá se encuentra varias industrias de curtiembres y este está rodeado de dos fuentes hídricas las cuales son el río Tunjuelito y la quebrada de Chingaza, las cuales suelen ser contaminadas con el vertimiento de las aguas residuales con sustancias químicas o materia orgánica, las cuales generan en ella mal olor, sabor, toxinas, modificación de la apariencia física, puede transmitir enfermedades y se convierte en peligro para la comunidad expuesta.

### **1.5. Escalamiento Industrial**

El escalamiento industrial consiste en la reunión de una serie de capacidades y tecnologías que nos llevan a evolucionar y ampliar el mercado de uno o varios productos, lo cual hace que una empresa mejore su competitividad y tenga mayores ingresos, ya que el producto se fabricará en mayor cantidad, de una manera más eficiente y llevará a tener una mayor capacidad. [5]

## Figura 1.

### Proceso de escalamiento en industria química



**Nota.** La figura 1 nos representa la ilustración de un experimento en el laboratorio, seguido se especifica la experimentación a escala y por último la experimentación industrial. Tomado de: Innovation for customers, Nitto, tecnología de polimerización, 2016. [En línea]. <https://www.nitto.com/eu/es/rd/base/paint/polymer/>.

El escalamiento ha ido ganando importancia debido a su capacidad de mejorar una industria, pasando de locales a globales, y su impacto en cuanto a la competitividad, además de que este se puede configurar en cuatro tipos:

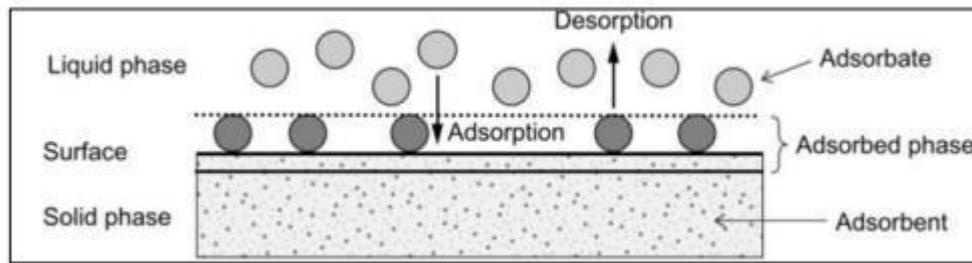
- Escalamiento de proceso: consiste en transformar materias primas en productos de forma más eficiente reorganizando el sistema de producción o introduciendo tecnología superior.
- Escalamiento de producto: cambiar hacia productos más sofisticados en términos de incrementar el valor agregado.
- Escalamiento de funciones: representa la adquisición de nuevas y superiores funciones en la cadena, como el diseño, el marketing o abandonar las funciones existentes de bajo valor agregado, escalamiento de maquila hacia el paquete completo.
- Escalamiento entre sectores: aplicar las competencias adquiridas en una particular función para moverse en un nuevo sector. [6]

## 1.6. Adsorción

Es un fenómeno de transferencia de materia entre fases, que se utiliza normalmente para la eliminación de sustancias en superficies acuosas donde se encuentra el adsorbato (La sustancia que se desea eliminar) por medio de un adsorbente en fase sólida, este fenómeno crea una interfase que es una fase intermedia entre el sólido y líquido, donde sucede la adsorción.

**Figura 2.**

*Mecanismo de adsorción*



*Nota.* En la figura 2 podemos observar la interacción que hay entre el sólido (adsorbente) y el líquido donde se encuentra el (adsorbato), el cual el sólido absorbe las partículas afines a él y cuando ya está muy saturado podemos observar que puede haber una desorción. Tomado de: L. M. Hernandez Mestanza, «Elaboración de un material biosorbente a partir de la cáscara de banano (*Musa sp*) para ser utilizado en la remoción de cromo VI,» San Salvador, 2015.

“La eficiencia del proceso depende de diferentes parámetros, como la interacción entre el adsorbente y el adsorbato, la superficie específica del adsorbente, el tamaño de molécula del adsorbato” [7] el pH, el tiempo en contacto y la temperatura con la que se realizó el proceso, por esto es importante que el adsorbente sea afín con el adsorbato, ya que esta es una característica fundamental de la adsorción, que el adsorbente tenga la capacidad de absorber el adsorbato en su superficie, existen dos tiempos de adsorción está la física y la química.

La adsorción física es la que sucede gracias a las fuerzas de Van der Waals, este tipo de adsorción sucede en la interfase, es eficiente para adsorber componentes orgánicos, por esto entre el compuesto sólido de la fase tenga más parecido a un compuesto orgánico, mayor será la adsorción, la adsorción física suele ser más eficaz a bajas temperaturas.

La adsorción química es la que pasa por una interacción química con el adsorbente y hace que el adsorbato cambie su identidad, rompiendo enlaces de este y creando una unión químicamente fuerte entre el adsorbente y adsorbato, es un proceso irreversible.

### **1.6.1. Operaciones de adsorción**

“Tiene diferentes aplicaciones como recuperación de vapores a partir de mezclas diluidas con gases, recuperación del soluto y eliminación de contaminantes de la solución, y fraccionamiento de mezclas gaseosas y líquidas. Las técnicas utilizadas incluyen tanto los

métodos por etapas como los de contacto continuo; estos se aplican en operaciones por lotes, continuas, o discontinuas.” [8]

Las técnicas usadas para este procedimiento son el contacto por etapas el cual se realiza si el fluido es líquido y su método de operación es carga continua, como, por ejemplo: “filtración de contacto, contacto continuo en estado estacionario con lecho móvil, lecho fluidizado o lecho descendente, el método de operación para estos es continuo como lo son por hiper sorción.” [8]

### ***1.6.2. Modelos teóricos de la adsorción***

«Los modelos de adsorción son obtenidos en el equilibrio de una mezcla, y un análisis del proceso de adsorción, obteniendo el porcentaje de adsorción, con los datos de equilibrio que se obtienen normalmente mediante la isoterma de adsorción, también es fundamental entablar la velocidad de la adsorción que alcanza la separación. Los modelos cinéticos permiten entender el fenómeno de adsorción dentro de cada proceso, dando a conocer la velocidad con la que el adsorbato (impurezas a remover) son retiradas del fluido.» [8]

### ***1.6.3. Isotermas de adsorción***

“Los datos del equilibrio del proceso, conocidos como isoterma de adsorción, dan a conocer la forma en que actúa la interacción entre adsorbato y adsorbente y presentan información importante del adsorbente que se utiliza.” [8]

Los modelos de isoterma usados a la hora de utilizar adsorbentes de biomasa en metales pesados son las isotermas de Langmuir y las isotermas de Freundlich.

### ***1.6.4. Cinética de adsorción***

La cinética de adsorción es importante para observar cómo varía la concentración del adsorbato en función al tiempo, nos ayuda a identificar el tiempo en el que el proceso es óptimo, con esto podemos determinar la isoterma de adsorción que se utilizara.

Entre las cinéticas por las que se puede describir el proceso por el que ocurre la adsorción utilizando biomasa se pueden encontrar modelo de pseudo-primer orden, modelo de pseudo-segundo orden, ecuación de elovich, entre otros.

En la industria de la curtiembre se rigen varios reglamentos guiados directamente a los vertimientos de sus desechos en las aguas residuales y el límite estipulado para componentes encontrados en estos desechos, en nuestro proyecto se enfoca principalmente al metal pesado cromo, por ende, las normas explícitas para lo anterior se encuentran a continuación.

**Figura 3.**

*Normatividad vigente en Colombia industria curtiembres.*

<i>NORMA</i>	<i>DESCRIPCIÓN</i>
DECRETO 3930 de 2010	“Establece las disposiciones relacionadas con los usos del recurso hídrico, el Ordenamiento del Recurso Hídrico y los vertimientos al recurso hídrico, al suelo y a los alcantarillados” [9]
Decreto 2667 de 2012	“Se reglamenta una tasa retributiva por la utilización directa e indirecta del agua como receptor de los vertimientos puntuales, y se toman otras determinaciones” [10]
RESOLUCIÓN 3956 DE 2009	"Por la cual se establece la norma técnica, para el control y manejo de los vertimientos realizados al recurso hídrico en el Distrito Capital". Indica como parámetro de vertimiento principalmente para el cromo se debe cumplir Cr 0.1 mg/L [11]
Ley 9 de 1979	Presenta las regulaciones sobre las condiciones donde se trabaje con aguas, el cumplimiento de los requisitos establecidos por el ministerio de salud. [12]
RESOLUCIÓN 3957 DE 2009	Los usuarios que generen aguas residuales no domésticas con sustancias de interés ambiental y sanitario como las que se muestran en la figura 43, están obligados a solicitar el registro de sus vertimientos ante dicha autoridad. [13]
RESOLUCIÓN 0631 DE 2015	“Por lo cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones” Indica como parámetro de vertimiento principalmente para el cromo se debe cumplir Cr 0.5 mg/L con una carga mayor a 3,000,00 Kg/Día [14]

**Nota.** En la figura 3 se realiza una recopilación de la normatividad vigente en Colombia para la industria de curtiembre enfocada al tratamiento del agua de proceso usada.

## 2. GENERALIDADES Y CARACTERIZACIÓN CONTENIDO DE CROMO EN AGUAS DE CURTIEMBRE

### 2.1. Generalidades

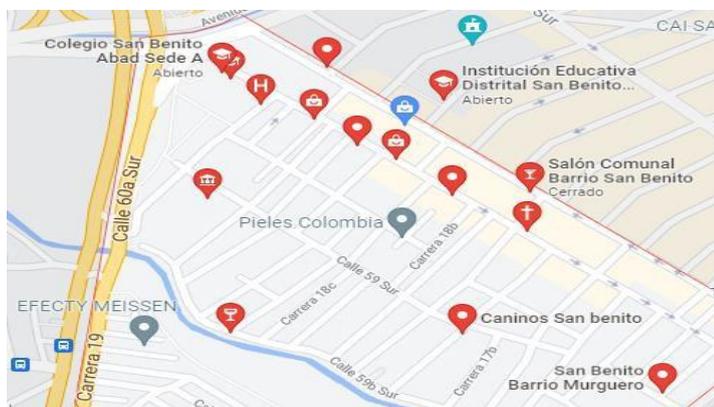
Con el fin de originar un panorama adecuado para una valoración óptima del proceso en las industrias de las curtiembres en San Benito, Bogotá D.C. explícitamente en las empresas Curtrinc S.A.S y Gilbert S.A.S, de las cuales se obtendrán las muestras a trabajar. Se realizará un enfoque al agua residual proveniente del proceso de curtido, en este capítulo se mostrarán conceptos generales relacionados con la industria y los tratamientos previamente establecidos para el control ambiental de aguas contaminadas con metales pesados.

#### 2.1.1. Ubicación

Las empresas Curtrinc S.A.S y Gilbert S.A.S. están ubicadas en el suroccidente de la capital, en el barrio San Benito en la localidad de Tunjuelito como lo muestra la *Figura 4*, la cual es una zona de alta actividad industrial por parte de las empresas de curtición de pieles de procedencia animal, limita al norte con el parque metropolitano el Tunal, por el oriente con el barrio San Carlos, por el sur con el barrio Tunjuelito y por el occidente con el Río Tunjuelito.

**Figura 4.**

*Ubicación barrio San Benito, Bogotá D.C.*



**Nota.** En la figura 4 se tiene un panorama del barrio San Benito donde se sitúa la mayor cantidad de curtiembres en Bogotá. [15] Tomado de: Google, «Indicaciones de Google Maps para llegar al barrio San Benito, sector curtiembres,» [En línea]:

<https://www.google.com/maps/place/San+Benito,+Tunjuelito,+Bogot%C3> [Último acceso: Septiembre 2021].

### **2.1.2. Descripción del sector**

En el barrio san Benito se consolidan tres sectores o actividades socio económicas relevantes las cuales se dividen en: industrial, comercial, de servicios y residencial.

- Industrial: “Agrupa diferentes instancias de producción entre las que sobresalen la curtición de pieles, el procesamiento de subproductos y actividades conexas como la comercialización de insumos químicos”[2]. También se identifican algunas unidades productivas de sectores como madera y muebles.
- Comercial y de servicios: “Conformado por establecimientos relacionados con distribución de insumos químicos, confecciones y comercialización de manufacturas en cuero, farmacias, panaderías, venta de víveres y la plaza de mercado.” [2]
- Residencial: se distribuye a lo largo del barrio, de manera representativa. Sin embargo, se resalta que en las industrias se comparte el uso con la vivienda, lo que hace que muchos establecimientos se constituyan como de tipo mixto.

Teniendo esto en cuenta de todas las actividades económicas del barrio San Benito, la de mayor relevancia es la de la industria de curtiembres, “en el barrio San Benito, se halla el 90% de las curtiembres de la ciudad de Bogotá, representada en 245 empresas”. [1]

### **2.1.3. Proceso Curtiembre**

El curtido es «el proceso de transformación de pieles de animales en cuero, como resultado de la estabilización de las fibras de colágeno de la piel con agentes curtientes, mediante la formación de complejos tipo quelatos. Este proceso se lleva a cabo con el fin de evitar su descomposición y facilitar su uso para la fabricación de productos de calzado, marroquinería, talabartería, tapizados, entre otros» [17]

La mayoría de las industrias de curtido tienen un proceso productivo similar. “Los insumos químicos y su dosificación varían de acuerdo con los proveedores, la calidad de las pieles y el conocimiento del curtidor” [18], a continuación, se presentará un resumen de las diferentes etapas de proceso en la industria de curtiembre.

**Figura 5.**

*Etapas de producción de la industria curtiembre*

<b>ETAPA DE PRODUCCIÓN</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>OPERACIONES UNITARIAS</b>
Ribera	Aquí se comienza con la preparación de la piel ya sea piel fresca o salada para su posterior curtido, se acondiciona por medio de distintas operaciones unitarias.	Recepción MP Pre-descarne Remojo Pelambre y encalado Descarne Dividido
Curtido	Prepara las pieles para ser transformadas en materiales fuertes y resistentes a la putrefacción por medio de agentes curtientes que se fijan en las fibras de colágeno, generando estabilidad. La mayoría de las empresas utilizan las sales metálicas como agentes curtientes, principalmente las sales de cromo.	Desencalado Purga enzimática Piquelado Curtido al cromo Ecurrido Rebajado
Acabado en húmedo	En esta etapa el cuero adquiere las características de suavidad, color, y tacto que son requeridos para cada tipo de cuero, según requisitos.	Recurtido Teñido Engrase Ecurrido
Acabado en seco	Otorga al cuero el aspecto final de color y brillo, permite controlar posibles imperfecciones del producto.	Secado Ablandado Esmerilado Desempolvado Pigmentado Planchado Lacado Almacenamiento

**Nota.** En la figura 5 se conforma un breve resumen de las etapas productivas presentes en la industria de curtiembre.

En la industria de curtiembres, los procesos más importantes para convertir la piel en cuero se efectúan sobre medios acuosos, “es así como el proceso productivo genera una alta contaminación del recurso hídrico utilizado, al ser descargados al sistema de alcantarillado del

sector sin mayor tratamiento, ya que una parte de los insumos químicos manejados durante los procesos” [19], así como los residuos sólidos que se generan, son vertidos al río Tunjuelito.

## 2.2. Modelos teóricos de la adsorción

Para este proyecto, en el cual se analiza los datos experimentales del tratamiento dado por medio de la cáscara de banano al agua residual de curtiembre, los datos en el equilibrio se muestran normalmente como isothermas de adsorción, que determina el comportamiento de la relación entre adsorbato-adsorbente, determinando la cantidad de material adsorbido en la interfase con la concentración de este componente.

Por otro lado, es importante tener en cuenta la velocidad de adsorción para estipular el tiempo en el que el adsorbente logra su máxima retención de materia de interés, esto se denomina cinética de adsorción.

### 2.2.1. Modelos isotérmicos de adsorción

- **Isoterma de Langmuir:** es un modelo teórico para la adsorción en una monocapa sobre una superficie completamente homogénea con un número finito de sitios idénticos y específicos de adsorción y con una interacción despreciable entre las moléculas. Este modelo describe el equilibrio entre las fases sólido-líquido de los sistemas como un equilibrio químico reversible entre especies. La ecuación de Langmuir es la siguiente [8]:

$$q = \frac{q_{max}K_L C_f}{1 + K_L C_f} \quad Ec\ 2.1.$$

Donde:

- $q$ : capacidad de adsorción (mg/g).
  - $q_{max}$ : constante que denota la capacidad máxima de adsorción (mg/g).
  - $K_L$ : afinidad del adsorbato por el adsorbente (L/mg).
  - $C_f$ : concentración de equilibrio (mg/L).
- **Isoterma de Freundlich:** es una ecuación empírica que no asume homogeneidad en la energía de los sitios en la superficie y sin límite en la carga máxima de adsorción, y muestra una consistencia de una distribución exponencial de centros activos característicos de una superficie heterogénea. La ecuación de Freundlich es la siguiente [8]:

$$q = K_f C_f^{\frac{1}{n}} \quad \text{Ec. 2.2.}$$

Donde:

- $q$ : capacidad de adsorción (mg/g).
- $K_f$ : parámetro de la ecuación relacionado con la afinidad del adsorbente por los iones metálicos ( $\text{mg}^n \cdot \text{g}^{-1} (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})^{-1/n}$ ).
- $C_f$ : concentración de equilibrio (mg/L).

### 2.2.2. Modelos cinéticos de adsorción

Son varios los modelos cinéticos propuestos para describir el mecanismo del proceso de adsorción. En la Figura 6 se evidenciarán los principales modelos existentes.

**Figura 6.**

*Modelos cinéticos de adsorción*

MODELO CINÉTICO	ECUACIÓN	PARÁMETROS
Pseudo-primer orden	$q_t = q_e(q - e^{-k_1 t})$	$q_e$ , Capacidad de adsorción en equilibrio $k_1$ , Constante de pseudo primer orden
Pseudo-segundo orden	$q_t = \frac{t}{\frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e}}$	$k_2$ , Constante de pseudo segundo orden $q_e$ , Capacidad de adsorción en equilibrio
Ecuación de Elovich	$q_t = \frac{1}{\beta} \ln(\alpha \cdot \beta) + \frac{1}{\beta} \ln t$	$\alpha$ , Constante de la ecuación de Elovich
Difusión intraparticular	$q_t = k \cdot \sqrt{t}$	K, constante de difusión.

**Nota.** En la figura 6 se evidencia los modelos cinéticos con sus respectivas ecuaciones y parámetros. [20] Tomado de: J. A. Garzon Santamaria y L. A. Gonzalez Lopez, «Adsorción de Cr utilizando carbon activado a partir de cáscara de naranja,» Cartagena de Indias, 2012.

En el presente proyecto se utilizarán únicamente los modelos cinéticos descritos a continuación:

- **Modelo de pseudo-primer orden:** es también llamado modelo de Lagergren, es de los modelos más aplicados para el estudio de la cinética de adsorción de contaminantes en soluciones acuosas.

La ecuación matemática para la cinética de pseudo-primer orden

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1 (q_e - q_t) \quad \text{Ec. 2.3.}$$

Donde:

- $q_e$ : Capacidad de adsorción en el equilibrio (mg/g)
- $q_t$ : Capacidad de adsorción en tiempo t (mg/g)
- $k_1$ : Constante de la velocidad de la ecuación de pseudo-primer orden (min<sup>-1</sup>).
- Por integración de esta expresión entre las condiciones límite t=0 con  $q_t=0$  y t=t con  $q_t=q_t$  se obtiene:

$$q_t = q_e(1 - e^{-tk_1}) \quad \text{Ec. 2.4.}$$

- **Modelo de pseudo-segundo orden.** Este modelo fue desarrollado por Ho y McKay. En él se supone que el adsorbato se adsorbe en dos sitios activos de la biomasa. A partir de esta fecha, muchas más investigaciones han reportado un mejor ajuste de los datos experimentales obtenidos a este modelo, con coeficientes de correlación superiores a los de los otros modelos ensayados. En este caso, la ecuación de velocidad de la cinética de adsorción se expresa como [8] :

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2 (q_e - q_t)^2 \quad \text{Ec. 2.5.}$$

Donde:

- $q_e$ : Concentración del soluto fijada por adsorción en el equilibrio (mg/g).
- $q_t$ : Concentración de soluto fijada por adsorción en la superficie del adsorbente en un tiempo t (mg/g).
- $k_2$ : Constante de la ecuación de pseudo-segundo orden (g\*mg<sup>-1</sup> \*min<sup>-1</sup>).

$$q_t = \frac{t}{\frac{1}{k_2 q_e^2} + t} \quad \text{Ec. 2.6.}$$

Por integración de esta ecuación entre las condiciones límite  $t=0$  con  $q_t=0$  y  $t=t$  con  $q_t=q_t$  se obtiene la Ec 2.6.

### 2.3. Modelos matemáticos para el diseño de columnas de adsorción

Las columnas de adsorción tienen la funcionalidad de separar compuestos indeseables de una corriente líquida o gaseosa, estas columnas funcionan de manera batch, ya que a medida que pasa el fluido que contiene el compuesto indeseable que se conoce como sorbato, el adsorbente, que es la biomasa o material con la capacidad de adsorber el sorbato se va saturando, hasta agotar su capacidad de adsorción, al llegar a este punto se tiene que suspender la operación y regenerar el adsorbato.

Los modelos matemáticos tanto teóricos como empíricos para el diseño de una columna con las características predichas anteriormente, son los siguientes:

#### 2.3.1. Modelos matemáticos empíricos

La modelación matemática tiene como objeto fundamental hacer la “descripción cuantitativa con base en leyes y principios aplicados a las unidades de interés, con el fin de obtener los modelos que describen el comportamiento individual de las mismas. Para construir un modelo matemático que represente el proceso bajo estudio se hace uso de los principios físicos y químicos que rigen al proceso, así como de otras relaciones no fundamentales basadas en la experimentación para obtener las ecuaciones que representan el proceso” [21].

2.3.1.a Modelo BDST. El modelo conocido como BDST (Bed Depth-Service Time). Desarrollado por Hutchins (1973), ha sido usado para el análisis de los datos obtenidos de pruebas realizadas en columnas de adsorción. Se encuentra descrito mediante la Ec. 2.7. [21]

$$t_B = \left( \frac{N}{U_L Y_o} \right) Z - \left( \frac{1}{k \cdot Y_o} \right) \ln \left( \frac{Y_o}{Y_B} - 1 \right) \quad \text{Ec. 2.7}$$

Donde

- $t_B$  = tiempo de servicio (tiempo de ruptura)
- $K$  = constante de velocidad de adsorción (vol. de solución/masa adsorbato\*t)
- $Y_B$  = Concentración del soluto en el punto ruptura.
- $N$  = capacidad de adsorción del lecho (masa adsorbato/volumen de solución)

En este modelo las constantes  $N$  y  $k$ , se evalúan por medio de la pendiente y el intercepto de una gráfica de  $t_B$  en función de  $Z$ , la cual tiende a dar una línea recta.

Al aplicar este modelo se toman en cuenta la transferencia de masa intraparticular y la resistencia de película externa, de tal manera que el sorbato se adhiere al adsorbente directamente, además la velocidad se toma constante a lo largo de la columna.

Para este modelo específico se necesita, información experimental que muestre la variación del tiempo de ruptura para columnas de diferentes alturas, manteniendo constante las concentraciones iniciales del sistema y la velocidad del flujo, sin embargo, para este modelo no se tiene la información necesaria en este trabajo. [21]

2.3.1.b Modelo de Wolborshka. En este modelo se muestra la distribución de concentración en el lecho adsorbente para la región de baja concentración de la curva de ruptura que está definida por la Ec. 2.8.

$$\ln \left( \frac{Y}{Y_0} \right) = \left( \frac{\beta \cdot Y_0}{N} \right) t - \left( \frac{\beta}{U_L} \right) Z \quad \text{Ec. 2.8.}$$

Donde

- $\beta$  = Coeficiente cinético de transferencia de masa externo (tiempo<sup>-1</sup>)
- Para hallar N y  $\beta$  se realiza la gráfica  $\ln (Y/Y_0)$  en función del tiempo y se obtienen a partir de la pendiente y el intercepto, En la región de baja concentración se asume que la transferencia de masa es dominada por la difusión de película externa. [21]

Este modelo se ha aplicado a procesos de adsorción de lecho fijo siempre y cuando su comportamiento se ajuste a este modelo.

### 2.3.2. Modelos matemáticos teóricos

2.3.2.a Modelo LUB-Equilibrio. Uno de los modelos matemáticos teóricos que se utiliza ampliamente para el diseño de lechos adsorbentes es el, modo de lecho sin utilizar LUB/Equilibrio. Se considera que la transferencia de masa es rápida y está dividida en dos secciones, la sección de equilibrio o saturación LES y la sección LUB longitud de lecho sin utilizar.

En este modelo se utiliza como base la curva de ruptura que se obtiene de las condiciones experimentales específicas, y la isoterma de adsorción.

“Las Principales suposiciones de este modelo son:

- La retención del componente adsorbible en los espacios vacíos del adsorbente, es pequeña comparada con la carga de adsorbato de equilibrio.

- El régimen de flujo, temperatura y concentración de alimentación son constantes.
- La temperatura, composición y velocidad no varían en la dirección radial. La zona de transferencia de masa es estable.

Para este modelo se toma la longitud total del lecho como la suma de LUB y la longitud de lecho en equilibrio con la corriente de alimentación, como se observa en la *Ec. 2.9* [21]

$$Z_S = LUB + Z_S \quad \text{Ec. 2.9}$$

Si  $U$  se toma como la velocidad de avance del plano de adsorción, a cualquier tiempo, la longitud de lecho saturado se determina con la *Ec 2.10*.

$$Z_S = U \cdot t \quad \text{Ec. 2.10.}$$

En el tiempo de ruptura  $t_B$ , la longitud de lecho saturado se calcula con la *Ec. 2.11*.

$$Z_S = U \cdot t_B \quad \text{Ec. 2.11}$$

Utilizando las ecuaciones anteriores se calcula la siguiente *Ec. 2.12*.

$$LUB = Z - Z_S = Z \frac{(t_S - t_B)}{t_S} \quad \text{Ec. 2.12.}$$

Para el balance de adsorbato para la unidad de adsorción de lecho fijo, se tiene la siguiente *Ec. 2.13*.

$$U_L (Y_O - Y_O^*) \cdot t_{Dis} = Z_S \cdot \rho - (X_T - X_O) \quad \text{Ec. 2.13.}$$

Donde

- $X_O$  = Concentración inicial de adsorbato en el adsorbente
- $Y_O^*$  = Concentración en equilibrio con  $X_O$
- $t_{Dis}$  = Tiempo requerido para la operación de la columna
- $X_O$  y  $Y_O^*$  se consideran 0

Un punto en desventaja que tiene este método es que las condiciones se consideran en estado estacionario, puesto que la realidad de este proceso es de carácter no estacionario, también presenta restricción en el diseño.

2.3.2.b Modelo de Michaels. En este modelo se tiene en cuenta la zona de adsorción,  $Z_A$ , que está limitado a los casos en el que la isoterma de adsorción es adecuada y la operación es aproximadamente isotérmica. Se necesita una isoterma favorable, ya que esta conduce a una transferencia de masa rápida y a unas curvas de ruptura en forma de “S”.

“En la zona  $Z_A$ , las condiciones permanecen estables con el tiempo, a excepción del momento inicial, en este caso, el tiempo correspondiente a  $Y_B$  es el tiempo de ruptura  $T_B$ , y el tiempo correspondiente a  $Y_E$  es el tiempo de saturación del lecho. Después de que se establece la zona de adsorción se requiere un tiempo  $T_A$ , para mover su propia altura en forma descendente por la columna a condiciones de estado estable” [21] El tiempo está determinado por la Ec. 2.14.

$$t_A = \frac{V_A}{F} \quad \text{Ec. 2.14.}$$

Donde

- $V_A$  = Volumen de solución necesario para que la zona de adsorción recorra completamente el lecho.

#### **2.4. Legislación vigente sector de curtiembre**

Anteriormente se encuentra descrito las normas y leyes vigentes hasta el día de hoy para la industria de curtiembre, Con esta normatividad se busca garantizar un control efectivo de las sustancias contaminantes que llegan a los cursos de agua, así como el uso correcto del recurso hídrico, «los sectores que cobijan esta normativa son los siguientes: Agroindustria, Ganadería, Hidrocarburos, Minería, Fabricación y manufactura de bienes en el cual se encuentra la fabricación de artículos de piel, curtido y adobo de pieles, Elaboración de productos alimenticios y bebidas, Generadores de aguas residuales domésticas, Actividades asociadas con servicios y otras actividades.» [22]

En caso de que las empresas no cumplan con los parámetros establecidos por la normativa legal vigente, se estipulan infracciones y penalidades que se encuentran en el Régimen Sancionatorio Ambiental, estas sanciones comprenden desde amonestaciones, decomiso preventivo, suspensión de la obra o actividad, hasta multas diarias que pueden llegar a los 300 salarios mínimos legales vigentes (SMLV) o cierre temporal o definitivo del establecimiento.

#### **2.5. Métodos actuales de tratamiento de aguas con metales pesados**

Actualmente se cuenta con varios métodos químicos para el tratamiento de metales pesados en aguas residuales entre los cuales se encuentran:

### 2.5.1. Nanofiltración

Consiste en una membrana con poros muy pequeños (<1 mm), también funciona con rango de presiones entre 10-50 bar. “Estas membranas son capaces de retener especies con peso molecular entre <200-300 g/mol, a comparación de la ósmosis inversa esta técnica trabaja a presiones más bajas, mayor flujo y menor consumo de energía, por lo tanto, es un método más económico lo que podría verse como un tratamiento prometedor para aguas residuales, en la *Tabla 1* se presenta tres estudios de remoción de metales pesados por medio de esta técnica”. [23]

**Tabla 1.**

*Remoción por nanofiltración*

Especie	PH	Concentración inicial	$t_{rr}$	Temp °C	Método	% eficiencia remoción
Pb +2 Cd +2	5,8	150 mg/L 40 mg/L	10h	25	Nanofiltración, recubrimiento de poliamida aromática en sustrato de polisulfona con poros 0,262 nm	98,5-96%
Fe+2 Al+2 Mg+2	6-7	4920 mg/L 3050 mg/L 3400 mg/L	36h	25	Purificación de ácido fosfórico por nanofiltración	98-96
Cd+2 Zn+2	2-11	80 mg/L	4-24h	20-22	Tartrato de sodio y potasio (PST) en un proceso de nanofiltración con membrana GE Osmonics en poliamida aromática	95,5-98
Mg+2 Li+2	6-7	2000 mg/L 8000 mg/L	NA	20	Recuperación de Li en alta relación de salmuera con membrana NF 90	80,1-85

**Nota.** Técnica de Nanofiltración en diferentes estudios. Tomado de: S. J. Cardenas Salazar y J. C. Ortega Revilla, «Modelamiento y simulación de una columna de adsorción de lecho fijo para la remoción de Cr (VI) de soluciones acuosas utilizando aserrin como adsorbente,» 2015. [En línea]:

<http://repositorio.unsa.edu.pe/bitstream/handle/UNSA/4003/IQorrejc085.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

### 2.5.2. Adsorción (convencional)

Esta técnica consiste en la remoción de una variedad de contaminantes, tiene alta capacidad y cinética rápida, normalmente el rendimiento depende de la estructura física del material adsorbente entre los cuales están los carbones activados (los más utilizados), arcillas, zeolitas, perlas de sílice y plantas o desechos, básicamente este tratamiento logra remover colorantes, metales pesados, material radiactivo entre otros contaminantes orgánicos e inorgánicos.

**Tabla 2.**

*Remoción por adsorción convencional*

Especie	PH	Concentración inicial	$t_{Tr}$	Temp °C	Método	% eficiencia remoción
Pb +2, Zn+2, Cu+2, Cd +2	5	10-180 mg/L	24h	20	Carbón mesoporoso ordenado CMK-3	Desde 29mg/g de Zn+2 a 177 mg/g de Pb+2
Cr	7,8	0.12 mg/L	2 min	Ambiente	Fe-BC (hierro a base de carbón de bambú)	>0.05 mg/L
Pb+2	4	100 mg/L	6h	Ambiente	Carbón activado procedente de huesos de vaca	50%
Cu+2, Ni+2, Zn+2	5,5	10-100mg/L	5 min-20h	20-40	Carbón activado producido a partir de piedras tunecinas	18,68 mg/g de Cu, 16,12 mg/g de Ni y 12,19 mg/g de Zn

**Nota.** Condiciones experimentales de algunos carbonos. Tomado de: S. J. Cardenas Salazar y J. C. Ortega Revilla, «Modelamiento y simulación de una columna de adsorción de lecho fijo para la remoción de Cr (VI) de soluciones acuosas utilizando aserrín como adsorbente,» 2015. [En línea]:

<http://repositorio.unsa.edu.pe/bitstream/handle/UNSA/4003/IQorrejc085.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

### 2.5.3. Electrocoagulación

Es un método que aplica las bases de la coagulación-floculación en un reactor electrolítico, este método trata consiste en un recipiente con una fuente de corriente y varios electrodos con el fin de dar iones desestabilizantes de partículas coloidales, las cuales reemplazan la función de los químicos utilizados en el método convencional de coagulación-floculación, la corriente eléctrica en el agua por medio de las placas de metal paralelas de hierro o aluminio.

**Tabla 3.**

*Remoción por electrocoagulación*

Especie	PH	Concentración inicial	$t_{Tr}$	Temp °C	Método	% eficiencia remoción
Cu +2	4-8	12 ppm	30 min	Ambiente	Después de la electroquímica, los líquidos dosificados se llevaron a floculación y sedimentación	95%
Ni+2, Pb+2, Cd+2	1-7	1 ppm	0-10min	Ambiente	Potasio clorhídrico fue adicionado para incrementar la conductividad de la solución	99,0%, 98,3%, 96,8% respectiva mente, utilizando electrodo de hierro
Cu+2, Cr+2, Ni+2, Zn+2	9,5	93, 33, 57, 20 ppm respectivamente	45min	26	Un electro-reactor con electrodos de acero de carbono de configuración monoplares (6).	>97 en todos los metales

**Nota.** Condiciones experimentales para remover metales pesados mediante electrocoagulación.

Tomado de: S. J. Cardenas Salazar y J. C. Ortega Revilla, «Modelamiento y simulación de una columna de adsorción de lecho fijo para la remoción de Cr (VI) de soluciones acuosas utilizando aserrin como adsorbente,» 2015. [En línea]: <http://repositorio.unsa.edu.pe/bitstream/handle/UNSA/4003/IQorrejc085.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

### 2.5.4. Biopolímeros

Este método es capaz de bajar el impacto de concentraciones de iones metálicos de transición a concentraciones de partes por millón, tienen una amplia disponibilidad además de que es amigable con el planeta, los biopolímeros contienen diferentes grupos funcionales como lo son

los hidroxilos y aminas, que mejoran la eficiencia de la absorción de iones metálicos.

**Tabla 4.**

*Remoción por biopolímeros*

Especie	PH	Concentración inicial	$t_{Tr}$	Temp °C	Método	% eficiencia remoción
Zn+2, Cu+2, Cd+2, Pb+2	5,5 a 6,5	0,05 g de adsorbente y 50 ml de sln de iones de metal en concentraciones de 100 a 1000 mg/L.	30min	25-30	Biopolímeros celulósico injerto a copolímeros	38,44,46 y 48 respectivamente
Cr+2, Cr+6	2	50 ppm Cr y 0,1g adsorbente/50 mL sln	6h	Ambiente	Lignina-quitosano alcalino	88-95
Cd+2, Cu+2, As +5	6,5 a 7,5	50 ppm	1 a 2h	Ambiente	Quitosano Reticulado	Capacidad de absorción de 150, 164 y 230 mg/g
Cd+2, Cu+2, Ni+2	5 a 6	5g adsorbente en sln 30 ppm de metales	10 h	Ambiente	Aserrín injertado a poliacrilamida carboxilada	98,98 y 97

**Nota.** Condiciones experimentales para remover iones de metales pesados empleando biopolímeros. Tomado de: S. J. Cardenas Salazar y J. C. Ortega Revilla, «Modelamiento y simulación de una columna de adsorción de lecho fijo para la remoción de Cr (VI) de soluciones acuosas utilizando aserrin como adsorbente,» 2015. [En línea]: <http://repositorio.unsa.edu.pe/bitstream/handle/UNSA/4003/IQorrejc085.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

**2.5.5. Ceniza Volante**

Estas cenizas son generadas por la combustión de carbón para la producción de energía, es un subproducto considerado contaminante ambiental por sus componentes tóxicos que se condensaron en el gas de combustión, sin embargo, ha sido reutilizado como un adsorbente de bajo costo para eliminar compuestos orgánicos, gases de combustión y los metales pesados, después de aumentar su absorción mediante tratamientos de activación física y química.

**Tabla 5.***Remoción por ceniza volante*

Especie	PH	Concentración inicial	$t_{rr}$	Temp °C	Método	% eficiencia remoción
Hg+2	5	602 mg Hg/L y la concentración de cenizas a 100 g/L	3 días	Ambiente	Cenizas volantes sillico-aluminoso y cenizas volantes-sulfo calcio	53-81
Pb+2, Hg+2	3	100 ppm	5 h	Ambiente	Ceniza volante de carbón.	34-17
Cr+6	2	50 ppm	1 h	30	Ceniza volantes y wollastonia	Capacidad de absorción 2,92 mg/L

**Nota.** Condiciones experimentales de absorción de metales pesados con cenizas volantes. Tomado de: S. J. Cardenas Salazar y J. C. Ortega Revilla, «Modelamiento y simulación de una columna de adsorción de lecho fijo para la remoción de Cr (VI) de soluciones acuosas utilizando aserrin como adsorbente,» 2015. [En línea]: <http://repositorio.unsa.edu.pe/bitstream/handle/UNSA/4003/IQorrejc085.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

**2.5.6. Adsorción de metales pesados por materiales naturales agrícolas e industriales**

Estos proceso de adsorción son utilizados en gran medida por varias industrias para eliminar metales pesados, aunque el carbón activado es altamente eficiente en los procesos de adsorción, estos se consideran costosos, por lo tanto se han venido indagando y buscando materiales seguros y económicos para la eliminación de estos metales en aguas residuales, hay un amplio interés por explorar fuentes de agroindustria adsorbentes de bajo costo y viabilidad para la eliminación de metales pesados, aunque estos deben ser estudiados detalladamente. En la siguiente tabla se detallan 3 métodos viables para la adsorción o eliminación de metales pesados, utilizando residuos industriales, desechos agrícolas y minerales.

**Tabla 6.***Remoción por adsorción de metales pesados por materiales naturales agrícolas e industriales*

Especie	PH	Concentración inicial	$t_{rr}$	Temp °C	Método	% eficiencia remoción
Cr+3, Cu+2, Pb+2, Zn+2.	5	110 mg/L, 110mg/L, 80mg/L, 80mg/L	45 min	Ambiente	Utilización de residuos industriales de celulosa y papel “lodo de cal y cenizas de caldera”	93; 99; 96; 99
Fe, Pb, Cu, Ni	6 a 7	60 mg/L	2 h	Ambiente	Desechos agrícolas como adsorbentes “cascarilla de arroz”	99,25; 67,917; 98,177; 96,954
Cr+2, Zn+2, Pb+2	4,05; 6,93; 3,86	30 mg/L; 30mg/L; 80mg/L; 10mg/L	2 h	Ambiente	Vermiculitas y el efecto de la precipitación.	100; 99,7; 99,1; 93,38.

**Nota.** Adsorción o eliminación de metales pesados, utilizando residuo industrial, desechos agrícolas y minerales. Tomado de: S. J. Cardenas Salazar y J. C. Ortega Revilla, «Modelamiento y simulación de una columna de adsorción de lecho fijo para la remoción de Cr (VI) de soluciones acuosas utilizando aserrín como adsorbente,» 2015. [En línea]: <http://repositorio.unsa.edu.pe/bitstream/handle/UNSA/4003/IQorrejc085.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

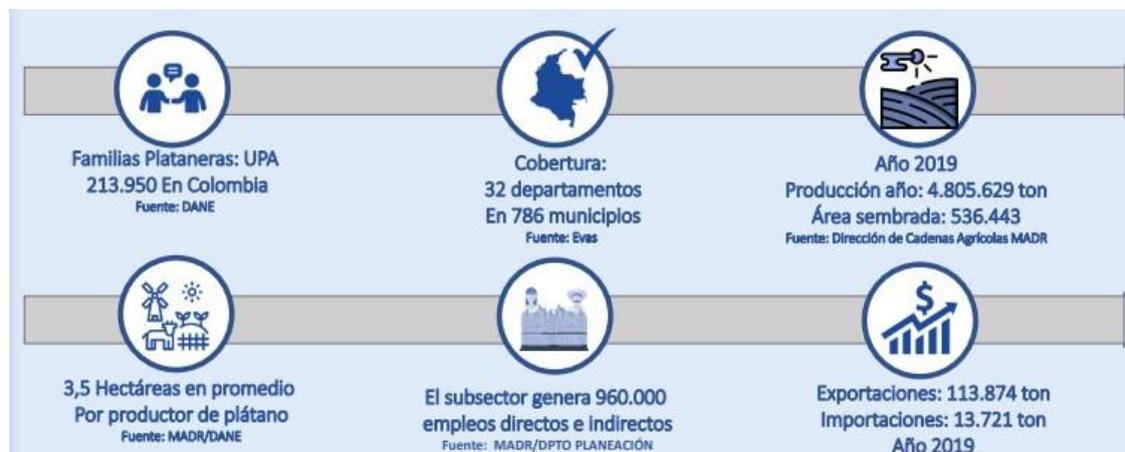
## 2.6. Adsorbente orgánico: cáscara de banano

En la actualidad se cuenta con gran variedad de desechos agroindustriales, los cuales pueden ser aprovechados e instaurados en procesos químicos de manera oportuna, generando un valor agregado y ocupándose como materia prima y no simplemente como un residuo sin uso provechoso alguno. El banano es una de las fuentes de la industria que genera mayor cantidad de residuos, los cuales hoy en día nos generan una gran problemática ambiental por el mal procesamiento y reciclado, gracias a la falta de conocimiento de este tipo de recurso.

El cultivo del banano se posiciona como quinto cultivo más importante a nivel mundial y en Colombia es uno de los más importantes, evidenciando esto en la *Figura 7* dónde podemos inferir que el banano según datos del año 2019, es el cultivo más sembrado en el país, siendo el más importante en la seguridad alimentaria y hace parte de la canasta familiar de los colombianos.

**Figura 7.**

*Caracterización de la cadena del Banano*



*Nota.* Vista general del panorama de la industria bananera. [24] Tomado de: V. Lopez, «The Social Water,» 2021.

Adicionalmente se estima que en la zona bananera de Urabá, se poseen anualmente 250.000 toneladas de banano únicamente de rechazo, cifra que se puede triplicar en comparativo con las demás zonas bananeras Colombia en énfasis de su banano de rechazo, estas toneladas de producto se pueden convertir en un desarrollo sostenible agropecuario e industrial, destinando los inicialmente desechos a una oportunidad de poseer una gran cantidad de materia prima para tratamientos como el propuesto llevándolo de manera efectiva, con todas las toneladas desperdiciadas de banano anualmente se pueden purificar grandes volúmenes de agua.

La razón por la que la cáscara de banano puede usarse para purificar el agua potable contaminada con metales pesados como el cromo se debe a la pectina que podemos encontrar en todas las frutas y una gran variedad de vegetales. En la estructura del banano se cuenta con hidroxila y carboxilo, las cuales cuentan con un gran número de moléculas con carga negativa, las cuales atraen la carga positiva que poseen los metales pesados. El mecanismo por medio del cual la cáscara adsorbe dichos metales pesados es la fisisorción, ya que la especie adsorbida conserva su naturaleza química.

### **2.6.1. Composición química de la cáscara de banano**

“La cáscara molida tiene la capacidad para extraer iones de metales pesados del agua y de los parámetros que intervienen en este proceso. La absorción de la cáscara de plátano se debe en gran parte a la lignina que son polímeros insolubles, presenta un elevado peso molecular, que resulta de la unión de varios ácidos y alcoholes fenilpropílicos (cumarílico, coniferílico y

sinapílico).” [25] En la *Tabla 7* se pueden observar los diferentes compuestos presentes en la cáscara de banana.

**Tabla 7.**

*Características químicas de la cáscara de banana*

<b>Componentes</b>	<b>Cáscara de banana (% base seca)</b>
Almidón	39,89
Humedad	89,1
Hemicelulosa	14,8
Celulosa	13,2
Lignina	14
Magnesio	0,16
Calcio	0,26
Cenizas	11,37

*Nota.* Caracterización química de la cáscara de banana.

- **Almidón:** el almidón es un hidrato de carbono complejo digerible, que está compuesto por dos macromoléculas amilosa y la amilopectina se obtiene mayoritariamente del maíz, el trigo, el arroz y la patata, las propiedades del almidón varían en función del producto del cual se extrae y de la variedad.
- **Hemicelulosa:** es una mezcla de polisacáridos, están compuestas de diferentes azúcares formando cadenas más cortas y con ramificaciones. Los azúcares que forman, se pueden dividir en diferentes grupos como las pentosas (xilosa, arabinosa), hexosas (glucosa, manosa, galactosa), ácidos hexurónicos (ácidos glucorónico, metilglucorónico y galacturónico) y deoxihexosas (ramnosa y fucosa).
- **Celulosa:** es uno de los principales componentes de las paredes celulares de árboles y vegetales, su estructura se puede observar con el microscopio como fibras de cabello humano que puede llegar a medir de 0,6 - 25mm según de donde provenga, su cadena es constituida por carbohidratos polisacáridos extensos, es resistente e insoluble en el agua, es una fuente de glucosa infinita que se renueva en el proceso de fotosíntesis.
- **Lignina:** Es un polímero orgánico heterogéneo, que se encuentra en las plantas y algunas algas, se caracteriza por ser de carácter aromático, tiene bastante variaciones de

transformaciones químicas, es el segundo polímero más abundante de los polisacáridos y tienen una gran importancia en las plantas ya que le da rigidez a la pared celular.

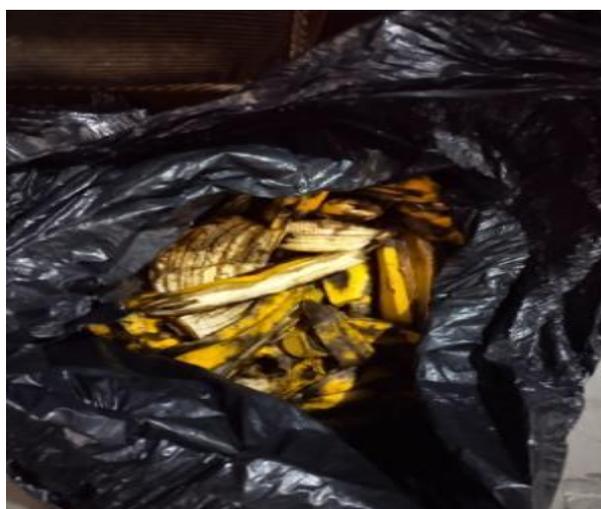
- **Magnesio:** Es un nutriente, que necesita el cuerpo para realizar diferentes procesos de funcionalidad, este se encuentra naturalmente en alimentos como legumbres, nueces, semillas, cereales integrales, hortalizas de hojas verdes entre otros, también es un elemento químico de la tabla periódica y el octavo elemento mayormente encontrado en la corteza de la tierra y el tercero con mayor abundancia en el agua de mar.

## 2.7. Recolección biomasa cáscara de banano

Se realizó la recolección de las cáscaras de banano en la plaza distrital de mercado El Restrepo, dado que allí se presentan gran cantidad de fruterías y establecimientos dónde día a día se obtienen desechos en grandes cantidades de cáscara de banano por lo que se decidió recolectar para posterior reciclado y contribución de la disminución de desechos orgánicos. La recolección se efectuó por método manual, los días: viernes, sábado y domingo, ya que estos días son los más concurridos y de mayor consumo por parte de la comunidad, por ende, se logró obtener suficiente desecho de cáscara evidenciado en la *Figura 8*.

### **Figura 8.**

*Recolección cáscaras de banano*



*Nota.* En la figura 8 se puede apreciar la recolección respectiva realizada para nuestro material biosorbente

Las etapas que se llevaron a cabo para la caracterización de las cáscaras de banano y su posterior uso para la adsorción se presentan descritas a continuación:

- **Preparación de las cáscaras de banano:** Después de ser recolectadas las cáscaras de banano, se procedió a realizar una clasificación de las cáscaras que presentaban buena consistencia y tamaño para lavarlas, se limpiaron y eliminaron las partes dañadas o podridas, y se les retiró restos del fruto que estuvieran presentes.

**Figura 9.**

*Lavado y preparación de cáscaras de banano*



**Nota.** En la figura 9 se puede apreciar el lavado hecho a las cáscaras de banano

El residuo obtenido de fruto que se retiró de la cáscara es un desecho común orgánico, el cual puede descomponerse naturalmente. El agua de la red utilizada para el lavado inicial debe ser dispuesta a una purificación, eliminando restos de sólidos o material particulado que haya quedado suspendido en esta agua y sea causante de contaminación, posterior a este tratamiento puede descargarse directamente al alcantarillado ya que no contiene químicos u material orgánico que afecte la estabilidad del agua.

- **Secado de las cáscaras de banano:** Según bibliografía el método que más eficiencia y eficacia tiene es: Deshidratación de cáscara de plátano en autoclave o estufa  
La temperatura máxima para deshidratar la cáscara de plátano, fue de 92°C y fue establecido en consideración que el agua en Bogotá hierve entre los 90-92°C, esto quiere decir que la humedad presente en la cáscara de plátano si llega a esta temperatura alcanzaría

la ebullición, lo cual afectaría directamente a la composición celular de la cáscara en donde se encuentra la pectina.

Se procedió a llevar las cáscaras de banano a una bandeja *Figura 10*. dónde se ubican de manera oportuna para posterior secado, se realizaron cuatro procesos de secado esto por la capacidad del horno, de esta manera aseguramos obtener la cantidad de cáscara seca adecuada para la experimentación.

**Figura 10.**

*Secado de cáscaras de banano*



**Nota.** Cáscaras de banano dispuesta a su deshidratación en la cámara de secado

En la *Figura 11*. se puede observar la cámara de secado BINDER Serie E Classic.Line con regulación mecánica, posee un rango de temperatura de 60°C a 230°C y dos bandejas cromadas en dónde realizamos el secado oportuno de las cáscaras de banano.

**Figura 11.**

*Cámara de Secado Binder Serie E Classic.Line*



*Nota.* Equipo donde se llevó a cabo la deshidratación de las cáscaras de banano

Con el fin de verificar y establecer rangos de comprobación de peso *Figura 12* de las muestras para obtener así la humedad presente.

**Figura 12.**

*Peso cáscara de banano.*



*Nota.* Toma de lectura de pesos para diferentes muestras de cáscara

Se estipulan tiempos de determinación de deshidratación donde analizamos en rangos de media hora, por un tiempo aproximado de 4 horas, dónde ya se obtenía un peso constante

y no se generaba un cambio en la deshidratación de la muestra *Tabla 8*, adicional a esto se realizó la lectura en cuatro muestras de cáscara.

**Tabla 8.**

*Lectura muestras proceso de deshidratación.*

<b>TIEMPO/ Peso</b>	<b>0 min</b>	<b>30 min</b>	<b>60 min</b>	<b>90 min</b>	<b>120 min</b>	<b>150 min</b>	<b>180 min</b>	<b>210 min</b>	<b>240 min</b>
<b>Muestra 1 (gr)</b>	49	26	18	12	8	6	5	5	5
<b>Muestra 2 (gr)</b>	38	17	13	9	6	6	3	3	3
<b>Muestra 3 (gr)</b>	42	22	17	14	10	7	5	4	4
<b>Muestra 4 (gr)</b>	39	19	15	8	6	4	2	2	2

*Nota.* Evidencia cambio de peso a lo largo del tiempo en el proceso de deshidratación

Adicional a esto se tomó el peso de 10 muestras evaluando su peso húmedo, es decir antes de empezar con el secado de la muestra y su peso húmedo, al finalizar el proceso de secado.

**Tabla 9.**

*Comparativo muestras antes y después del secado.*

MUESTRA	PESO HÚMEDO (gr)	PESO SECO (gr)
1	32	8
2	23	3
3	51	7
4	35	5
5	29	4
6	38	5
7	30	4
8	33	4
9	37	5
10	37	7
PROMEDIO	34,5	5,2

*Nota.* Cambio del peso antes y después de la deshidratación de la cáscara de banano

En la *Tabla 9* se puede observar el cambio que se obtuvo después de que la cáscara fresca pasará por un proceso de secado a 90°C en un horno por un tiempo de duración de 4 horas, lo cual provocó que el porcentaje de humedad de la cáscara de banano bajo un 75%, lo cual provocó que la cáscara se vuelve quebradiza he ideal para pasarlo a el proceso de maceración y finalmente de molienda.

**Figura 13.**

*Comparativo peso seco y peso húmedo de la cáscara de banano*



*Nota.* Comparativo antes y después de la deshidratación de la cáscara

Se puede observar un considerable cambio en el peso de la cáscara de banano después de haber sido secada promediando el peso húmedo en 34,4 gr y el peso seco respectivo a 5,2 gr.

- **Trituración y molienda de la cáscara de banano:** la reducción inicial del tamaño de la cáscara se realizó por medio de trituración manual en donde se dispuso pequeños trozos de la cáscara seca para posteriormente llevarla a una reducción mayor del tamaño, la cual se realizó utilizando un molino de cuchillas Fitzmill como fin del proceso de molienda se obtuvo un polvo fino café proveniente de la cáscara de banano.
- **Tamizado del material biosorbente:** el polvo obtenido se hace pasar a través de una torre de tamices de mallas número 18, 30, 60 y 100 (U.S.A. STANDARD TEST SIEVE) para separar las partículas trituradas en sus diferentes tamaños y así obtener dimensiones de partículas inferiores a un 1 mm de diámetro.

## 2.8. Recolección muestra de agua de curtiembre para tratamiento

Por medio del instructivo para la toma de muestras de aguas residuales, se verificó en primer instancia el lugar de la toma de muestra, en este caso se tienen dos empresas con dos muestras de agua distintas, esto dado que; el agua residual resultante directa del proceso de curtido tiene una alta concentración de cromo sin pasar por ningún tratamiento previo y dicha agua residual la someten en la industria a un tratamiento de precipitación química donde se baja el porcentaje

de cromo y se tiene otra agua residual con porcentajes menores del metal de pesado, la ubicación de las curtiembres se presentan a continuación:

- AGUA RESIDUAL DIRECTA: Empresa Curtiembre Curtrinc S.A.S. Barrio San Benito, Bogotá.
- AGUA RESIDUAL TRATADA: Empresa Curtiembre Gilbert S.A.S. Barrio San Benito, Bogotá.

Se tomó una muestra representativa en cada punto de las industrias mencionadas anteriormente, en donde cada muestra se tomó como muestra única sin replica posterior, dado que el proceso de curtido tiene un tiempo específico para recolección de las muestras de agua contaminada con cromo, es por esto que según el tiempo estipulado para la experimentación de este tratamiento las réplicas no se tomaron en cuenta y se procedió a evaluar con una sola muestra representativa. La toma del agua residual directa se dio en la salida del tambor del cuero curtido y el agua residual tratada se tomó posterior a ser dispuesta a un proceso de precipitación química, se utilizó un envase de plástico polietileno y se llevó al laboratorio para posterior análisis.

Se llevó a cabo la verificación del método colorimétrico del difenil carbazida para las determinaciones de cromo total en aguas, y demostrar que el laboratorio genera resultados correctos y confiables. La técnica experimentada es aplicable a un rango de 0.010 a 0.200 mgCr/L, rango de interés, ya que la mayoría de muestras analizadas en el laboratorio están en este intervalo.

- **MATERIALES Y MÉTODOS:**

El Método de referencia aplicado es el descrito en la edición 22 de los Métodos Normalizados para el Análisis de Aguas Potables y Residuales 3500-Cr B. APHA-AWWA-WEF (2012), el procedimiento es aplicable a aguas naturales, residuales y tratadas. Para muestras con color, es necesario analizar un blanco de muestra leyendo la absorción de ésta a 540 nm sin adicionar los reactivos para el desarrollo del color.

- **Equipo:** Se realizó la determinación del cromo total por espectrofotometría, por medio del equipo DR 3900 Espectrofotómetro HACH con tecnología RFID, para el ensayo *Figura 14* y determinación del nivel de cromo en el agua residual recolectada.

**Figura 14.**

*Espectrofotómetro HACH con tecnología RFID*



*Nota.* Equipo donde se realizarán todas las mediciones de espectrofotometría UV.

Vidriería: vasos de precipitados, agitadores de vidrio.

- **REACTIVOS:**

Para la preparación de reactivos, patrones y muestras, se emplearán los siguientes reactivos

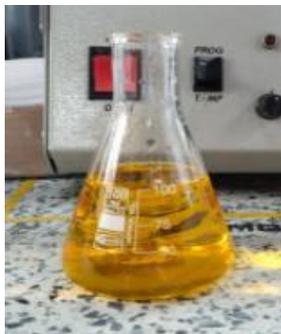
- Dicromato de potasio  $K_2Cr_2O_7$
- 1.5-difenilcarbazida
- Acetona
- Ácido sulfúrico
- Agua destilada

- **PROCEDIMIENTO**

Realizar la curva de calibración con una disolución madre de cromo de concentración entre 0,1 y 1 mg para esto se pesan 141,4 mg de dicromato de potasio seco, se disuelve en agua destilada y se afora a 100 ml en matraz. La solución obtenida tiene una concentración de 500 mg/L de cromo *Figura 15*.

**Figura 15.**

*Disolución dicromato de potasio*

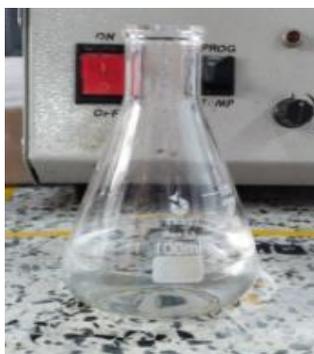


*Nota.* Preparación de disolución de dicromato de potasio

- De la solución preparada anteriormente, se toma una alícuota de 1 ml y se pasa a otro matraz de 100 ml y se afora con agua destilada para obtener una concentración de 5 mg/L.
- Solución de difenil carbazida, dado que este es el reactivo que genera color con el cromo VI. Se disuelve 250 mg de difenil carbazida y se disuelve en 50 ml de acetona y se conserva refrigerada en frascos color ámbar.
- Para ajustar el PH, se prepara una solución de ácido sulfúrico 0,2 N diluyendo 0,6 ml de ácido sulfúrico concentrado en un matraz con aforo de 100 ml que contenga 50 ml de agua destilada, mezclar y dejar enfriar a temperatura ambiente, *Figura 16.* aforar con agua destilada.

**Figura 16.**

*Solución de ácido sulfúrico.*



*Nota.* Solución preparada de ácido sulfúrico

- Diluciones de 0,1 mg/L a 1 mg/L de cromo, para realizar el ajuste de la curva de calibración se toman diferentes alícuotas propuestas en la *Tabla 10*.

**Tabla 10.**

*Alícuotas de cromo para curva de calibración*

Dilución (ml)	Cromo Total (mg/L)	Ph
0	0	2,6
2	0,11	2,45
5	0,21	2,64
8	0,28	2,32
11	0,37	2,62
14	0,41	2,6
17	0,54	2,4

**Nota.** Resultados obtenidos a partir de la disolución madre de dicromato de potasio a diferentes concentraciones

- Se toma cada alícuota y se lleva a un Erlenmeyer de 250 ml donde se ajustará el PH a 2, seguido de esto se adiciona en el matraz 2 ml de la solución preparada de 1.5-difenilcarbazida, dejamos actuar de 7 a 10 minutos para que se obtenga desarrollo de color, observas muestra *Figura 17*.

**Figura 17.**

*Concentraciones de cromo con coloración por 1.5-difenilcarbazida*



**Nota.** Diferentes concentraciones expuestas al 1.5-difenilcarbazida

Se puede observar que las diluciones de mayor concentración de cromo adquieren un tono más intenso.

### 3. TRATAMIENTO AGUA RESIDUAL, SISTEMA DE ADSORCIÓN A PARTIR DEL BIOSORBENTE

#### 3.1. Toma de muestra concentraciones

Inicialmente se analizaron las muestras de agua recolectadas para concluir por medio de espectrofotometría cual era la cantidad de cromo inicial presente antes del tratamiento de biosorción y así poder establecer rangos de comparación, se pueden evidenciar los parámetros obtenidos en la *Tabla 11*, los datos se leyeron por triplicado para un porcentaje de error menor y evaluar si se obtienen datos similares en cada lectura

**Tabla 11.**

*Valores iniciales de concentración de cromo en aguas a tratar*

MUESTRA DE AGUAS	Cr (mg/L)		
MUESTRA DE AGUA RESIDUAL DIRECTA: Empresa Curtiembre Curtrinc S.A.S	1,06	1,04	1,06
MUESTRA DE AGUA RESIDUAL PRECIPITADA: Empresa Curtiembre Gilbert S.A.S	0,21	0,21	0,21
VALOR ESTABLECIDO SEGÚN LEY	0,1	0,1	0,1

*Nota.* Lectura por triplicado de concentración de cromo en muestras de agua.

Según los datos obtenidos para la muestra de agua residual directa los datos obtenidos en las tres lecturas se encuentran en el límite del equipo DR 3900 Espectrofotómetro HACH, lo que nos lleva a concluir que la cantidad de cromo presente en el agua es mucho mayor pero el espectrofotómetro no presenta lectura completa dado su rango de lectura.

Dado que el objetivo es evaluar a diferentes volúmenes de agua dos tipos distintos de dosis de biomasa seca (cáscara de banano) para la bioadsorción del Cromo en el agua de curtiembre sin tratamiento y precipitada, se realizó primeramente la toma del peso respectivo para la biomasa el cuál se evaluará considerando 2,5 y 5 gramos *Figura 18*, posterior a esto se obtienen volúmenes de agua respectivos y se lleva a cabo la prueba de jarras *Figura 19*. para cada estudio, los datos obtenidos se encuentran condensados en la *Tabla 12*.

### **Figura 18.**

*Toma de peso de muestra de biomasa seca*



**Nota.** Se puede observar cómo se tomó el peso para la cantidad requerida de biosorbente

Se pesaron dosis de biosorbente de 2,5 y 5 gramos respectivamente, por triplicado para cada análisis de muestra de agua a realizar, se dejaron estipulados estos volúmenes de la biomasa seca ya que son los usados comúnmente en los anteriores estudios de adsorción para el cromo en estas aguas de curtiembre, por ende, se evaluarán los dos pesos, usando el más conveniente para nuestro escalamiento.

### **Figura 19.**

*Prueba de jarras para respectiva adsorción*



**Nota.** Se realiza la prueba de jarras para tratamiento de agua

La prueba de jarras se realizó para cada análisis de dosis y volumen de agua específico, se estableció una mezcla a 100 RPM en un tiempo de 60 min para cada análisis y posteriormente se dejaba sedimentar el agua para posterior lectura.

**Tabla 12.**

*Análisis agua residual directa*

PARÁMETROS TRATAMIENTO				Concentración Cr (mg/L)		Cantidad de agua residual recuperada (mL)
Dosis Biomasa (gr)	Cantidad de Agua a tratar (mL)	Tiempo de mezcla (min) a 100 RPM	Tiempo de reposo sedimentación (min)	Inicial	Final	
2,5	100	60	120	1,06	1,03	97,0
2,5	100	60	120	1,02	1,01	97,0
2,5	100	60	120	1,00	0,99	97,0
2,5	200	60	120	1,05	1,04	97,0
2,5	200	60	120	1,06	1,02	97,0
2,5	200	60	120	1,06	1,02	97,0
5,0	100	60	160	1,01	0,99	94,0
5,0	100	60	160	1,03	1,0	94,0
5,0	100	60	160	1,03	0,98	94,0
5,0	200	60	160	1,05	1,02	94,0
5,0	200	60	160	1,06	1,04	94,0
5,0	200	60	160	1,05	1,02	94,0

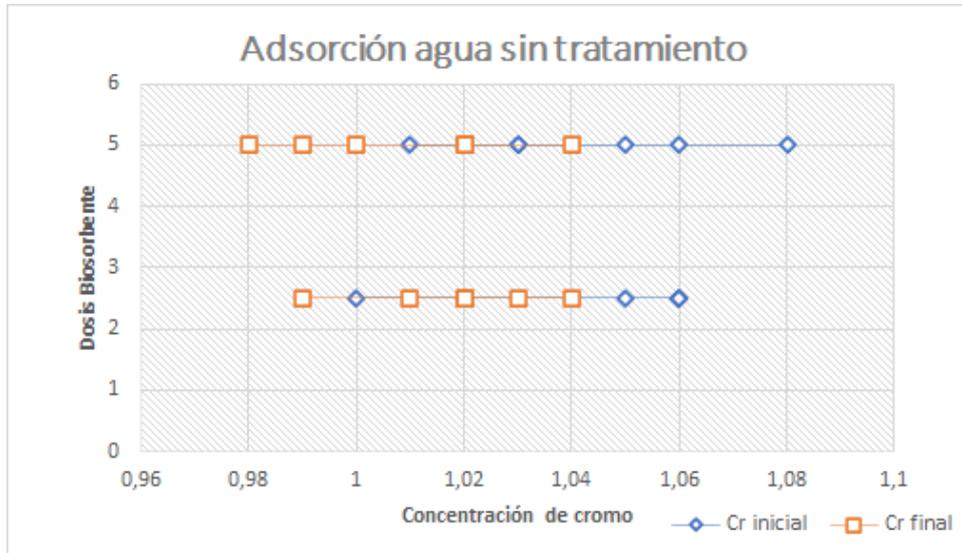
**Nota.** Lecturas correspondientes para la metodología planteado en el laboratorio para agua residual directa.

Los resultados presentes para la adsorción de Cr y tomando en cuenta las lecturas de concentración finales tomadas sí se realiza una adsorción pero es muy poco el cambio realizado en el agua sin tratamiento, esto puede deberse a la cantidad de biomasa y el tiempo de mezcla, además de esto se sigue tomando el riesgo de lectura correcto dado que el instrumento de medición sigue apareciendo el dato de lectura en el límite por ende las concentraciones pueden ser mayores, sin embargo en la lectura final si presento cambio con respecto a la inicial pero se

deben realizar más muestreos y pruebas para verificar cuáles serían los parámetros adecuados para un tratamiento efectivo del agua residual directa del proceso de curtido.

**Figura 20.**

*Adsorción del agua sin tratamiento*



**Nota.** Se observa los datos obtenidos para la remoción de cromo en agua residual directa

A continuación, se presentan los datos obtenidos para el agua precipitada del proceso de curtido, tomando en cuenta que dicha agua presenta ya un tratamiento químico donde una gran cantidad de cromo se ha retirado sin embargo sigue presentando trazas considerables las cuales deben ser retiradas hasta cumplir con los parámetros reglamentarios establecidos para cumplimiento de vertimiento de agua en alcantarillado o desagües.

**Tabla 13.***Análisis agua residual precipitada*

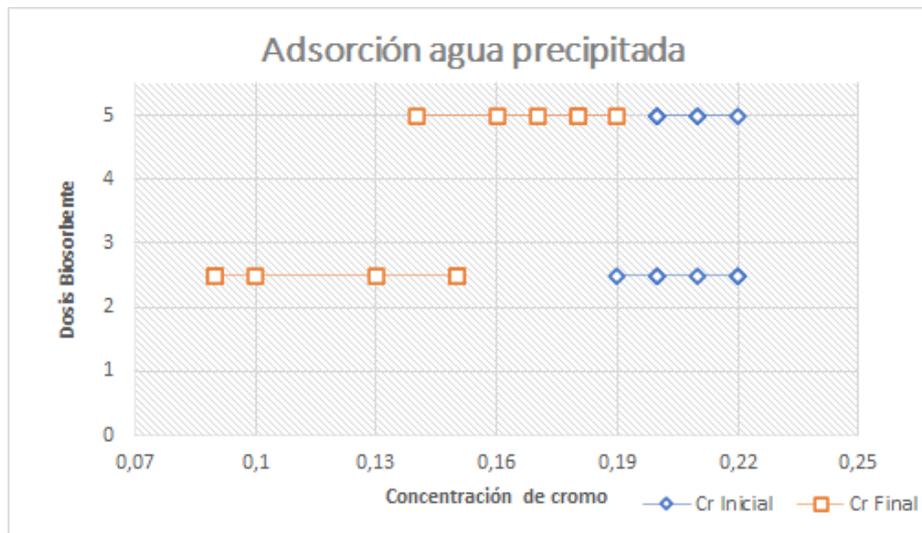
PARÁMETROS TRATAMIENTO				Concentración Cr (mg/L)		Cantidad de agua residual recuperada (mL)
Dosis Biomasa (gr)	Cantidad de Agua a tratar (mL)	Tiempo de mezcla (min) a 100 RPM	Tiempo de reposo sedimentación (min)	Inicial	Final	
2,5	100	60	120	0,22	0,09	97,0
2,5	100	60	120	0,20	0,09	97,0
2,5	100	60	120	0,22	0,1	97,0
2,5	200	60	120	0,19	0,15	97,0
2,5	200	60	120	0,20	0,13	97,0
2,5	200	60	120	0,21	0,15	97,0
5,0	100	60	160	0,21	0,17	94,0
5,0	100	60	160	0,20	0,16	94,0
5,0	100	60	160	0,22	0,14	94,0
5,0	200	60	160	0,21	0,18	94,0
5,0	200	60	160	0,20	0,18	94,0
5,0	200	60	160	0,20	0,19	94,0

**Nota.** Lecturas correspondientes para la metodología planteado en el laboratorio para agua residual precipitada.

Según la *Figura 20* y *21* podemos observar el cambio presente en la concentración de cromo para ambas dosis de biosorbente, donde resultan un buen resultado en las dos, sin embargo, en 2,5 gramos de cáscara de banano se presenta una mejor adsorción esto puede deberse a una mejor interacción entre las partículas de adsorbente y adsorbato y a un efectivo tiempo de ejecución y mezclado.

**Figura 21.**

*Adsorción del agua precipitada.*



**Nota.** Se observa lo datos obtenidos para la remoción de cromo en agua residual precipitada.

Dado los datos obtenidos experimentalmente se procederá a realizar los modelos de adsorción en dónde tomaremos en cuenta la prueba con mayor efectividad, en este caso es con una dosis de 2,5 gr y un volumen de agua de 100 mL, la cual presenta mejores datos de adsorción de cromo.

### **3.2. Modelos isotérmicos y cinéticos de adsorción**

Los datos experimentales en condiciones de equilibrio del proceso se expresaron como isotermas de adsorción donde se describe la interacción entre adsorbato-adsorbente. Asimismo, para evaluar la velocidad con la cual el contaminante en estudio fue retirado del medio acuoso se establecieron los modelos cinéticos [8].

#### **3.2.1. Modelos isotérmicos aplicados al material biosorbente**

Las isotermas de Langmuir y Freundlich son los dos modelos comúnmente más utilizados para referir la adsorción de un notable componente. Los dos modelos son permitidos únicamente bajo ciertas condiciones y sus resultados no pueden ser extrapolados cuando se varían las condiciones del medio.

Se presentan los resultados obtenidos para la prueba 2,5 gramo en un volumen de 100 ml, a partir de los dos modelos isotérmicos de adsorción mencionados anteriormente, con el fin de determinar la capacidad de adsorción del material seleccionado y verificar cómo se lleva a cabo el proceso. La capacidad de adsorción se calcula mediante la *Ec. 3.1.*:

$$q = \frac{(C_i - C_f) * V}{m} \quad \text{Ec. 3.1.}$$

Donde:

- q: Capacidad de adsorción adsorbato – adsorbente (mg/g).
- Ci: Concentración inicial de adsorbato en solución (mg/L).
- Cf: Concentración final de adsorbato en solución (mg/L).
- m: Masa de material biosorbente agregada (g).
- V: Volumen de la muestra (L)

Para realizar los cálculos correspondientes a los modelos isotérmicos se realizó la linealización de las ecuaciones presenten en el capítulo II, expresándose de la siguiente manera

- Linealización de la ecuación de langmuir.

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{q_{max} K_L C_f} + \frac{1}{q_{max}} \quad \text{Ec. 3.2.}$$

- Linealización de la ecuación de Freundlich.

$$\log q = \frac{1}{n} \log C_F + \log K_F \quad \text{Ec. 3.3.}$$

A partir de los resultados obtenidos en la *Tabla 14.* Para el agua precipitada del proceso de curtiembre se utilizaron las ecuaciones linealizadas establecidas anteriormente con el volumen definido de 100 mL de agua residual, considerando las masas de material biosorbente agregadas con sus respectivas concentraciones finales de Cromo. En la *Tabla 15:* se presentan los datos obtenidos según el cálculo de la *Ec 3.2* y *Ec 3.3.*

**Tabla 14.***Información para linealización isoterma*

<b>Ci (mg/L)</b>	<b>Cf (mg/L)</b>	<b>m (g)</b>	<b>qe (mg/g)</b>
0,22	0,09	2,5	5,2
0,20	0,09	2,5	4,4
0,22	0,1	2,5	4,8
0,19	0,15	2,5	1,6
0,20	0,13	2,5	2,8
0,21	0,15	2,5	2,4

*Nota.* Datos obtenidos para linealización de las isoterma

A continuación, en la *Tabla 15.* se presentan los resultados de las ecuaciones de Langmuir y Freundlich linealizadas.

**Tabla 15.***Linealizaciones isoterma*

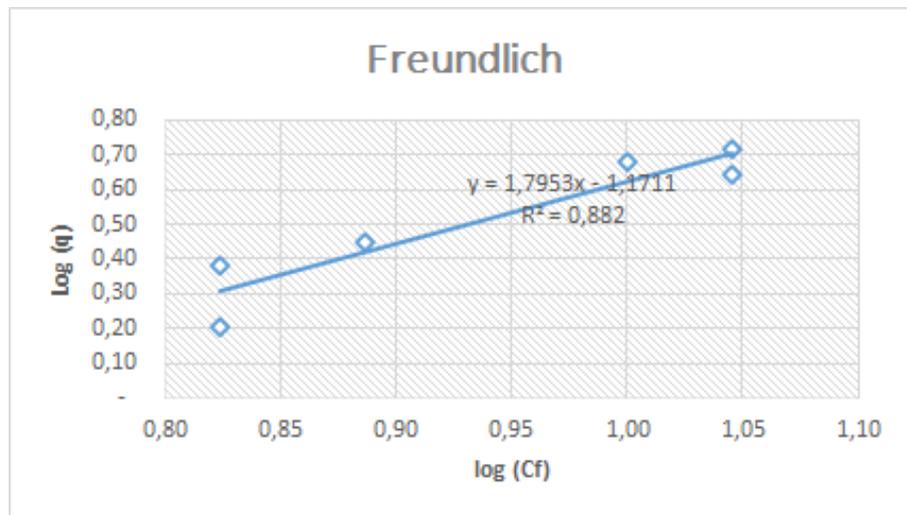
<b>Langmuir</b>		<b>Freundlich</b>	
<b>1/Cr</b>	<b>1/q</b>	<b>log (Cf)</b>	<b>log (q)</b>
11,11	0,19	1,05	0,72
11,11	0,23	1,05	0,64
10,00	0,21	1,00	0,68
6,67	0,63	0,82	0,20
7,69	0,36	0,89	0,45
6,67	0,42	0,82	0,38

*Nota.* Resultado a partir de los datos obtenidos en la experimentación y posterior linealización

Seguidamente, en las *Figuras 22 y 23.* se muestran los dos modelos isotérmicos de adsorción definidos en la tabla anterior.

**Figura 22.**

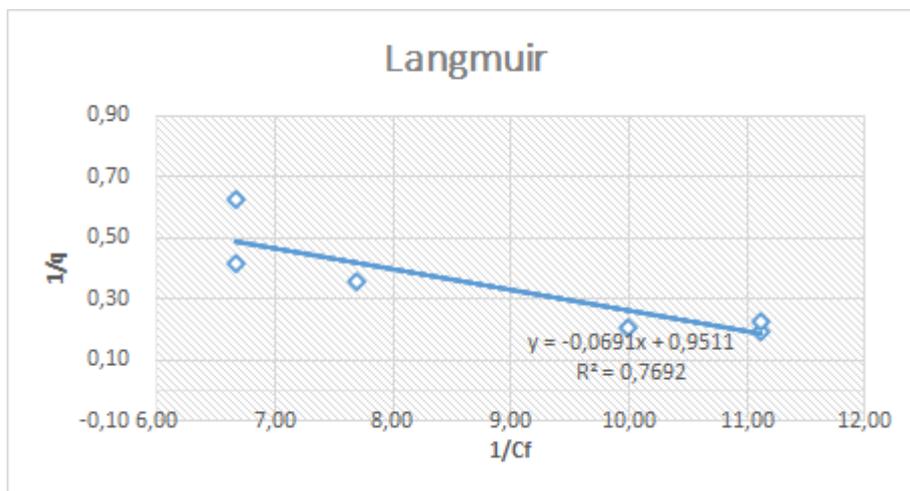
*Isoterma de Freundlich.*



*Nota.* Gráfica obtenida para isoterma de Freundlich.

**Figura 23.**

*Isoterma de Langmuir.*



*Nota.* Gráfica obtenida para isoterma de Langmuir.

El modelo proveniente de las dos isotermas resultó ser bueno basándose en los niveles de correlación como se muestra a continuación en la *Tabla 16*.

**Tabla 16.**

*Relación  $R^2$  obtenido*

$0 < R^2 < 0,6$	El modelo es pobre
$0,6 < R^2 < 0,9$	El modelo es bueno
$0,9 < R^2 < 1$	El modelo es muy bueno

*Nota.* A partir de los datos obtenidos en las gráficas de isotermas se podrá leer en esta tabla la relación de  $R^2$  obtenida.

Según los resultados obtenidos en las figuras anteriores, la isoterma que más se ajustó a los datos experimentales fue la isoterma de Freundlich, tomando en cuenta su coeficiente de correlación de  $R^2=0.882$ . En cambio, el coeficiente de correlación para la isoterma de Langmuir fue de  $R^2=0.7692$ .

En el caso de las siguientes constantes de Freundlich  $K_f$  y  $n$  que se obtienen de la ecuación de la recta que nos muestra la Gráfica 4 la cual se analiza de la siguiente manera

$$y = a + b x$$

$$y = -1,1711 + 1,7953 x$$

Teniendo en cuenta la información anterior se tiene en cuenta la linealización Ec Freundlich que es la siguiente

$$\log q = \frac{1}{a} \log C_f + \log K_f$$

Se ordena la ecuación de tal manera que esté paralela con la ecuación de la línea recta como se muestra a continuación.

$$\log q = \log K_f + \frac{1}{a} * \log C_f$$

$$y = a + b * x$$

y se obtiene:

**Tabla 17.**

*Constante del modelo isotérmico de freundlich.*

FREUNDLICH	
Kf	n
14,829	0,557

**Nota.** Constantes obtenidas de ecuación de freundlich

En el caso de las siguientes constantes de Langmuir  $K_L$  y  $q_{max}$  que se obtienen de la ecuación de la recta que nos muestra la Gráfica 5 la cual se analiza de la siguiente manera

$$y = a + b x$$
$$y = 0,9511 - 0,0691x$$

Teniendo en cuenta la información anterior se tiene en cuenta la linealización Ec Langmuir que es la siguiente

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{q_{max} * k_L * c_f} + \frac{1}{q_{max}}$$

Se ordena la ecuación de tal manera que esté paralela con la ecuación de la línea recta como se muestra a continuación.

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{q_{max}} + \frac{1}{q_{max} * k_L} * \frac{1}{c_f}$$
$$y = a + b * x$$

y se obtiene:

**Tabla 18.**

*Constante del modelo isotérmico de langmuir.*

Langmuir	
$K_L$	$q_{max}$
-13,764	1,051

**Nota.** Constantes obtenidas de ecuación de Langmuir

### 3.3. Modelos cinéticos aplicados al material biosorbente

La cinética de adsorción describe la velocidad a la que el adsorbato es eliminado del seno de la disolución debido a su retención sobre la superficie del sólido adsorbente. La cinética indica el tiempo medio que tarda una molécula de adsorbato en vencer las resistencias que se oponen a su unión a los grupos funcionales situados sobre la superficie del adsorbente (transferencia de masa desde el seno de la disolución hasta la partícula de sólido, difusión a través de la película interfacial sólido-disolución, reacción química). El estudio de la cinética de adsorción en el tratamiento de aguas residuales es importante ya que proporciona un conocimiento a profundidad de los mecanismos por los que discurren las reacciones de adsorción.

Los modelos cinéticos de adsorción mayormente utilizados son la ecuación de Pseudo – Primer Orden o modelo de Lagergren y la ecuación de Pseudo – Segundo Orden o modelo de Ho y McKay. Ambos modelos se utilizaron para establecer una relación entre el material biosorbente (cáscara de banana) y el analito en estudio (Cromo), según la afinidad y características de uno hacia otro. También se estudió la velocidad a la cual el material fue capaz de retener el metal presente en la muestra.

Para realizar los cálculos correspondientes a los modelos cinéticos se realizó la linealización de las *Ec. 2.4* y *2.6*. del segundo capítulo expresándose de la siguiente manera:

- Linealización del modelo de Pseudo – Primer Orden.

$$\ln (q_e - q_t) = \ln(q_e) - K_1 t \quad \text{Ec. 3.4.}$$

- Linealización del modelo de Pseudo – Segundo Orden.

$$\frac{1}{q_t} = \frac{1}{K_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad \text{Ec. 3.5.}$$

A partir de los resultados obtenidos en la *Tabla 19*. Para el agua precipitada del proceso de curtiembre se utilizaron las ecuaciones linealizadas establecidas anteriormente con el volumen definido de 100 mL de agua residual, considerando la masa de 2,5 gr del material biosorbente agregadas con sus respectivas concentraciones finales de Cromo.

**Tabla 19.***Modelos de Pseudo – Primer Orden y Pseudo – Segundo Orden linealizados.*

<b>t (min)</b>	<b>Ci (mg/L)</b>	<b>Cf (mg/L)</b>	<b>qt (mg/g)</b>
30	0,22	0,18	0,0016
60		0,13	0,0036
90		0,10	0,0048
120		0,08	0,0056
150		0,08	0,0056
180		0,07	0,006

**Nota.** Datos obtenidos para los modelos de Pseudo – Primer Orden y Pseudo – Segundo Orden linealizados

**Tabla 20.***Modelos cinéticos*

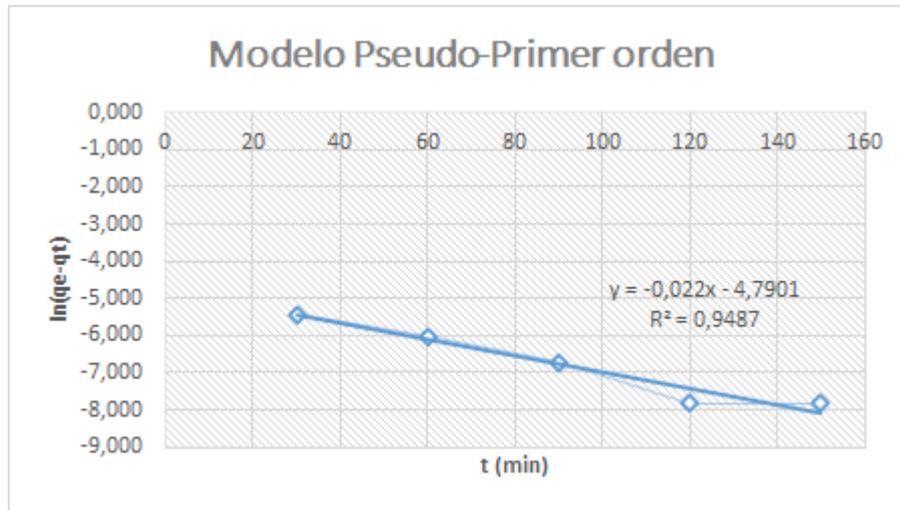
<b>Pseudo-Primer Orden</b>	<b>Pseudo-Segundo Orden</b>
<b>ln (qe-qt)</b>	<b>t/qt</b>
-5,426	18750,00
-6,032	16666,67
-6,725	18750,00
-7,824	21428,57
-7,824	26785,71
INDEFINIDO	30000,00

**Nota.** Resultados obtenidos para ambos modelos cinéticos

Posteriormente se muestran las *Figura 24* y *25* obtenidas para cada modelo cinético definido en la *Tabla 20.* anterior.

**Figura 24.**

*Modelo Pseudo-primer orden*



*Nota.* Gráfica obtenida para cinética primer orden.

**Figura 25.**

*Modelo Pseudo-Segundo orden*



*Nota.* Gráfica obtenida para cinética segundo orden

El criterio de selección de las gráficas de la ecuación de la línea recta, tomando en cuenta todos los puntos y su pendiente se basó en que los modelos cinéticos describen la velocidad de adsorción. Por lo tanto, era necesario considerar todo el rango de tiempo de trabajo, en el cual el sistema sólido – líquido estuvo en agitación. La recta proveniente del modelo pseudo primer orden resultó ser buena y para pseudo segundo orden muy buena basándose en los niveles de

correlación explícitos en la tabla anteriormente mencionada. Según lo descrito anteriormente el modelo que mejor se adaptó a los datos experimentales fue la ecuación de Pseudo-Primer Orden, tomando en cuenta su  $R^2 = 0,9487$ , presenta una mayor linealidad, debido a que describe de una mejor forma la velocidad de adsorción a la que el material biosorbente remueve el contaminante del agua industrial, teniendo un coeficiente superior al del otro modelo ensayado.

Para hallar las siguientes constantes del modelo de Pseudo – Primer Orden  $K_1$  y  $q_e$  se utiliza los datos que se obtuvieron la ecuación de la *figura 24*. la cual se compara con la ecuación de la línea recta en primer lugar nos da:

$$y = -4,7901 + 0,022x$$

$$y = a + bx$$

Obteniendo estos datos se compara con la linealización del modelo de Pseudo – Primer Orden y se procede a despejar las constantes.

$$\ln(q_e - q_t) = \ln(q_e) - k_1 t$$

$$y = a - b x$$

**Tabla 21.**

*Modelo de pseudo – primer orden.*

Pseudo – Primer Orden	
$q_e$	$K_1$
$8,311 \times 10^{-3}$	0,022

**Nota.** Constantes obtenidas

En segundo lugar, para hallar las siguientes constantes del modelo de Pseudo – Segundo Orden  $K_2$  y  $q_e$  se utiliza los datos que se obtuvieron en la ecuación de la *figura 25*. la cual se compara con la ecuación de la línea recta en primer lugar nos da:

$$y = 13135 + 85,034x$$

$$y = a + bx$$

Obteniendo estos datos se compara con la linealización del modelo de Pseudo – Segundo Orden y se procede a despejar las constantes.

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} * t$$

$$y = a - b x$$

Obteniendo que:

**Tabla 22.**

*Modelo de pseudo – segundo orden.*

Pseudo –Segundo Orden	
$q_e$	$K_2$
0,0117	0,5561

**Nota.** Constantes obtenidas

#### 4. DISEÑO CONCEPTUAL COLUMNA DE ADSORCIÓN BASADO EN DATOS EXPERIMENTALES

El diseño que se va a llevar a cabo en este apartado será previsto a partir del sistema de adsorción discontinuo experimentado en los anteriores capítulos y de suposiciones teóricas apoyadas con material bibliográfico. Inicialmente dado que el comportamiento en una columna de lecho fijo es descrito en términos de perfiles de concentración contra un tiempo determinado, se especificará la curva de ruptura esta representa la relación entre las concentraciones de contaminante como a la salida y a la entrada de la columna frente al tiempo o al volumen circulado.

En la *Figura 26* de curva de ruptura, se puede observar los cambios de concentración del cromo en el agua residual a medida del tiempo, los datos se obtuvieron, de la *Tabla 23* “se presentan los datos obtenidos para los modelos de Pseudo – Primer Orden y Pseudo – Segundo Orden linealizados.” en donde se observa el punto de ruptura, el cual muestra el tiempo en el que termina de remover cromo la biomasa, también muestra la curva de saturación, la cual cambia a medida del tiempo, hasta que llega al punto de saturación en el cual se observa la saturación máxima, cuando el proceso empieza y el agua aún no ha sido afectada por las propiedades de la biomasa.

**Figura 26.**

*Curva de ruptura, onda de adsorción.*



**Nota.** Se llevo a cabo la construcción de la curva de ruptura a partir de los tiempos de saturación y ruptura.

Teniendo en cuenta los amplios modelos matemáticos existentes para el diseño de unidades de adsorción de lecho fijo, se realizó un amplio análisis frente al modelo que mejor se adaptaría según nuestro proyecto de investigación, llegando así al modelo LUB-Equilibrio, el cuál es uno de los modelos matemáticos teóricos mayormente utilizado para el diseño de lechos adsorbentes. Cabe resaltar que en nuestro escalamiento no se tomarán en cuenta parámetros de hidráulica, caídas de presión o similares presentes en la columna.

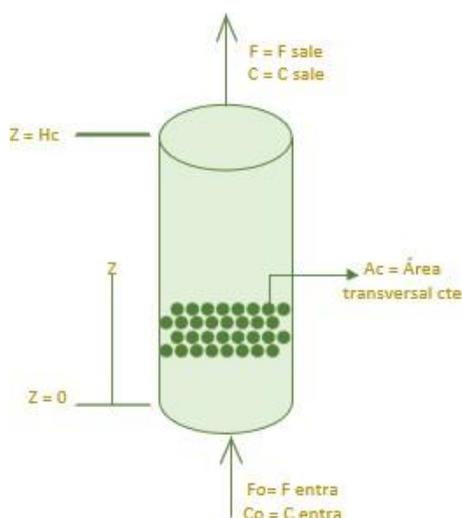
El método LUB permite realizar un escalamiento de torres de adsorción de lecho fijo, tomando como base la curva de ruptura prevista en la *Figura 26* obtenida bajo las condiciones experimentales especificadas y las isothermas de adsorción *figura 22 y 23*. Las principales suposiciones en las que se basa este modelo son:

- La retención del componente adsorbible en los espacios vacíos del adsorbente, es pequeña comparada con la carga de adsorbato de equilibrio.
- El régimen de flujo, temperatura y concentración de alimentación son constantes.
- La temperatura, composición y velocidad no varían en la dirección radial.
- La zona de transferencia de masa es estable.

Posteriormente en la *Figura 27*. muestra la representación de una columna de lecho empacado, el cual está compuesto de biomasa (cascara de banano), donde no se considera una pérdida de masa o de sólido, en dicha columna se hace pasar una corriente del agua de curtiembre contaminada con cromo a un flujo y concentración determinado, donde  $F_{sale}$  es el flujo de salida ya tratada ( $m^3/min$ ),  $C_{sale}$  es concentración de salida ( $mol/min$ ),  $A_c$  es área transversal ( $cm^2$ ),  $H_c$  es altura de la columna ( $m$ ),  $F_o$  es flujo de entrada ( $m^3/min$ ),  $C_o$  es concentración de entrada ( $mol/min$ ).

**Figura 27.**

*Representación columna de lecho empacado*



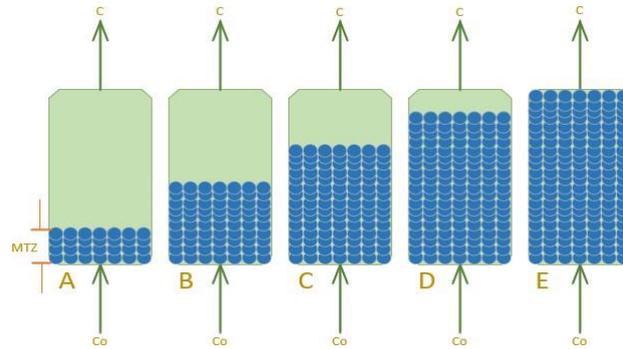
*Nota.* Diseño columna de lecho empacado, con nomenclatura.

#### **4.1. Columna de adsorción**

El proceso consiste, como se muestra en la *Figura 27*, en primer lugar, en la torre a) el flujo empieza a entrar por la parte inferior a una velocidad específica, la cual debe ir a un caudal adecuado para darle tiempo a la transferencia que hay entre el lecho y el fluido, a medida que éste pasa se va acumulando cromo en la biomasa hasta llegar hasta su saturación, lo que significa que está ya no puede retener más cromo, como se puede ver en la torre, b) , c) y d) hay una transferencia de cromo a la biomasa que se encuentra interna en el lecho y está poco a poco va recogiendo el contaminante hasta saturarse totalmente, como se ve en la figura e), aunque en la práctica la columna no se puede dejar saturar en su totalidad ya que el agua que saldría por esta después de la saturación, sería agua no apta para ser vertida al río Bogotá, puesto que tendría porcentajes mayores de concentración de cromo que las permitidas.

**Figura 28.**

*Movimiento de la zona de transferencia de masa en el lecho*



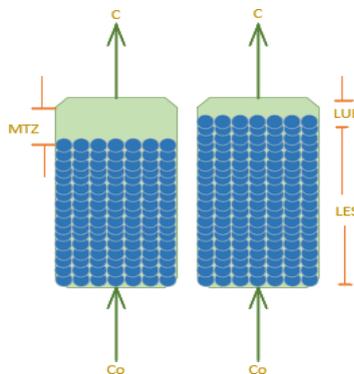
**Nota.** Consecutivo del tiempo en que hay transferencia de masa de un extremo a otro

En el primer dibujo se encuentra especificada la zona de transferencia de masa, donde se alcanza el otro extremo de la columna, posee una sección que está parcialmente saturada, es equivalente a decir que tenemos una columna donde el sólido estará completamente agotado y se presentará el LUB y el LES.

En el método de LUB, la altura de la columna de lecho fijo se encuentra separada en dos partes LUB (longitud sin utilizar de lecho) y LES (longitud del sólido que si se utiliza) por lo tanto se puede decir que  $ZHc = LUB + LES$ , también en la primera columna se observa la parte MTZ, la cual representa la zona en la que todavía puede haber transferencia de masa, puesto que en esta parte la biomasa aún no se encuentra saturada.

**Figura 29.**

*Representación en lecho de LUB y LES*



**Nota.** Acotación de las distancias de LUB y LES en una torre de adsorción.

## 4.2. Balance de materia

Para los balances de materia se considera en estado transitorio con acumulación en la columna,

$$VA = VE - VS \quad \text{Ec. 4.1}$$

Donde:

- VA = Velocidad de acumulación.
- VE= Velocidad de entrada.
- VS= Velocidad de salida.

$$\frac{dm_A}{dt} = F_o C_o - F C = F (C_o - C) \quad F = F_o \quad \text{Ec. 4.2.}$$

Donde

- $\frac{dm_A}{dt}$  = Cambio de masa respecto al tiempo
- $F_o$ = Flujo de entrada
- $C_o$ = Concentración de entrada
- $F$ = Flujo de salida
- $C$ = Concentración de salida

A continuación, se multiplica la Ec 4.2. con la expresión  $\frac{C_o}{C_o}$ , para su simplificación como se ve a continuación.

$$\begin{aligned} \frac{dm_A}{dt} &= F_o C_o - F C = F (C_o - C) * \frac{C_o}{C_o} \quad \text{Ec. 4.3.} \\ \int_0^t \frac{dm_A}{dt} &= F C_o \int_0^t \left(1 - \frac{C}{C_o}\right) dt \end{aligned}$$

Ecuación área bajo la curva

$$m_A = F C_o \int_0^t \left(1 - \frac{C}{C_o}\right) dt \quad \text{Ec. 4.4.}$$

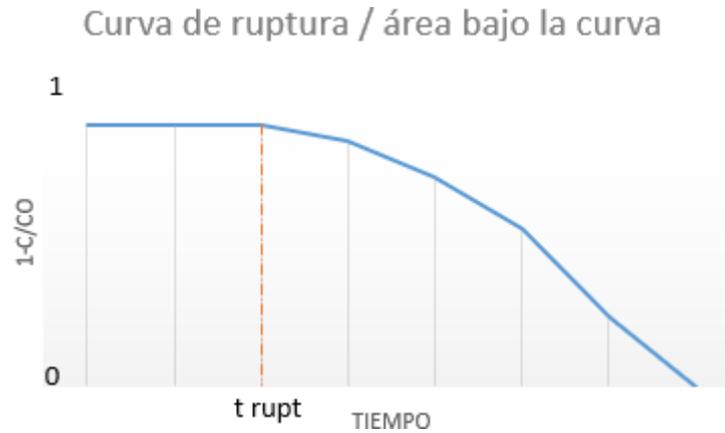
Donde

- $m_{A_o}^t$  = Masa soluto

La integral descrita en la Ec 4.4. es el área bajo la curva de la *Figura 30.*, en esta gráfica se cambió la escala en comparativa a la *Gráfica 4.1.* de curva de ruptura donde dividimos la concentración cambiante en la concentración inicial de manera que quede adimensional y en una escala de 0 a 1 como se puede observar, así podremos determinar diferentes tiempos, identificar la masa que se acumula hasta un tiempo de ruptura o hasta un tiempo de saturación.

**Figura 30.**

*Estipulación área bajo la curva*



**Nota.** La curva de ruptura en este estudio se determina el criterio de “tiempo de ruptura”

Identificando el punto de saturación en la gráfica lo correcto es indicar que sería hasta un tiempo infinito cuando realmente vamos garantizar la saturación del lecho, por ende, se tiene la Ec. 4.5 evaluando el cambio de concentración de un tiempo cero a infinito.

$$m_A^{sat} = F * C_0 \int_0^{\infty} 1 - \frac{C}{C_0} dt \quad \text{Ec. 4.5.}$$

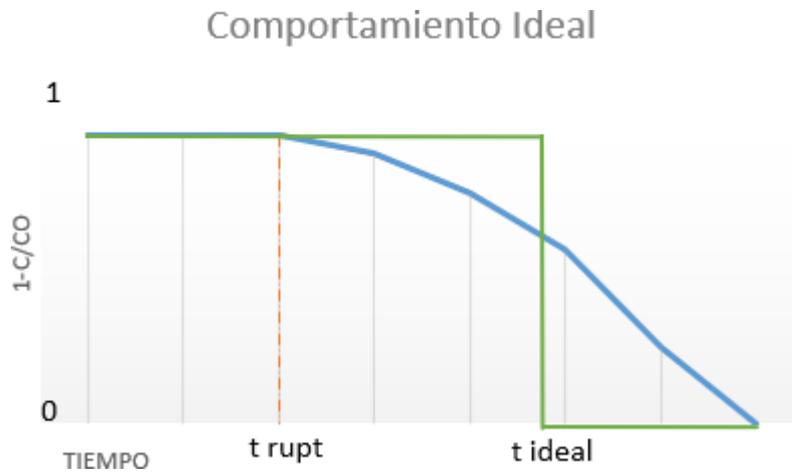
Donde:

- $m_A^{sat}$  = masa soluto saturada

En dado caso que el proceso sea lineal, donde la velocidad de la transferencia de masa sea tan alta que no se tendría gráficamente una zona de transferencia de masa, sino que al entrar en contacto el sólido con el fluido se daría inmediatamente la transferencia encontrando el equilibrio, es decir que no se tendría una curva de ruptura sino un comportamiento lineal y se aprovecharía 100% el material biosorbente en la columna. El comportamiento que se tendría en un proceso lineal sería el descrito en la *Figura 31*.

**Figura 31.**

*Comportamiento ideal en la adsorción*



**Nota.** En el comportamiento lineal de la adsorción se determina un tiempo promedio en el que se ha adsorbido una gran parte de adsorbato sin llegar este a la saturación.

Como podemos observar el área bajo la curva tanto para el comportamiento ideal como para el comportamiento de la curva de ruptura se asemeja, se compensan los espacios utilizados por cada proyección correspondiendo a la misma área bajo la curva. Teniendo esto en cuenta en la Ec 4.6. la función  $1 - \frac{C}{C_0}$  se evaluará en dos valores, 1 que será cuando el tiempo sea menor al tiempo idealizado y 0 cuando el tiempo es superior al tiempo idealizado, como se observa en la gráfica de comportamiento ideal.

$$1 - \frac{C}{C_0} = \begin{cases} 1 & t < t_{ideal} \\ 0 & t > t_{ideal} \end{cases} \quad Ec. 4.6.$$

De esta manera la integral propuesta en la Ec. 4.5 se puede separar a diferentes tiempos, inicialmente se estipula la integral desde cero al tiempo idealizado junto a la integral desde el tiempo idealizado al infinito, obedeciendo a los valores establecidos por la Ec 4.6. sustituimos la primera integral por uno y la segunda integral por cero de manera que el resultado a obtener será el tiempo ideal, lo anterior propuesto en la Ec 4.7.

$$\int_0^{\infty} 1 - \frac{C}{C_0} dt = \int_0^{t_{ideal}} 1 - \frac{C}{C_0} dt + \int_{t_{ideal}}^{\infty} 1 - \frac{C}{C_0} dt = \int_0^{t_{ideal}} 1 dt + 0 dt = t_{ideal} \quad Ec. 4.7$$

Teniendo en cuenta esto se toma que la masa hasta la saturación equivale a la Ec 4.8.

$$m_A^{sat} = F * C_0 * t_{ideal} \quad Ec 4.8$$

Es importante evaluar la masa del soluto hasta que llegue al punto de ruptura, por lo tanto, se estima de la siguiente manera Ec 4.9.

$$m_A^{rupt} = F * C_o \int_0^{t_{rupt}} 1 - \frac{c}{c_o} dt \quad Ec 4.9.$$

Luego, con el fin de hallar la cantidad adsorbida por el sólido se plantea la *Ec 4.10*.

$$q_A = \frac{m_A}{m_s} = \frac{F * C_o \int_0^t 1 - \frac{c}{c_o} dt}{m_s} \quad Ec 4.10$$

Donde

- $q_A$  =Cantidad adsorbida por el sólido
- $m_s$  =Masa de sólido

Refiriéndonos a la cantidad adsorbida hasta la saturación, es decir la capacidad que posee nuestro sólido para adsorber, procedemos a identificar el  $q_A^{max}$  que viene relacionada directamente con la saturación del lecho  $q_A^{sat}$  tomando en cuenta el tiempo idealizado se establece la *Ec 4.11*.

$$q_A^{max} = q_A^{sat} = \frac{m_A^{sat}}{m_s} = \frac{F * C_o * t_{ideal}}{m_s} \quad Ec 4.11$$

Por otro lado, se evalúa la capacidad de adsorción en el tiempo de ruptura, el cual viene dado por el cambio de la concentración a medida que avanza el tiempo evaluado en la integral, presenta en la *Ec 4.12*.

$$q_A^{rupt} = \frac{m_A^{rupt}}{m_s} = F * C_o \int_0^{t_{rupt}} 1 - \frac{c}{c_o} dt \quad Ec 4.12.$$

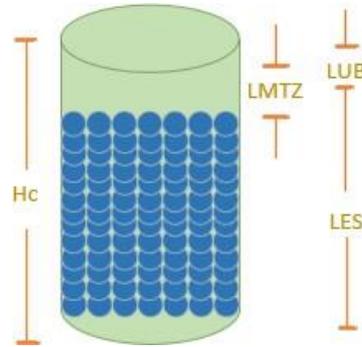
### 4.3. Fracción de la capacidad utilizada

Con respecto a la altura de la columna  $H_c$ , esta se puede separar en dos componentes *Figura 32* lo que sería por un lado la altura de sólido completamente agotado LES y la altura de sólido sin agotar LUB, esto sucede en el momento en el que la zona de transferencia de masa alcanzó el otro extremo de la columna de manera que existirá una parte de sólido que se considerara completamente saturado y otra que no. Esta altura se encuentra definida como la *Ec 4.13*

$$H_c = LES + LUB \quad Ec 4.13$$

**Figura 32.**

*Altura de la columna*



**Nota.** LES: capacidad adsorbida LUB: capacidad de adsorción Hc: Altura de la columna

Podemos obtener una fracción de la capacidad utilizada definida como la cantidad adsorbida hasta el punto de ruptura  $q_A^{rupt}$  entre la capacidad adsorbida hasta la saturación  $q_A^{max}$ , lo cual se especifica como se muestra en la Ec 4.14 tomando en cuenta que también podemos aproximarlo a un tiempo de ruptura entre un tiempo ideal.

$$f_{\text{útil}} = \frac{q_A^{rupt}}{q_A^{max}} = \frac{\frac{F \cdot C_0}{m_S} \int_0^{t_{rupt}} \left(1 - \frac{C}{C_0}\right) dt}{\frac{F \cdot C_0}{m_S} t_{ideal}} = \frac{t_{rupt}}{t_{ideal}} \quad \text{Ec 4.14}$$

$$f_{\text{no útil}} = 1 - f_{\text{útil}}$$

Donde:

- $f_{\text{útil}}$  = fracción de la capacidad utilizada
- $f_{\text{no útil}}$  = fracción de la capacidad no utilizada

En una columna donde tenemos un área transversal constante, la fracción de sólido que se utiliza es proporcional a la fracción de la longitud utilizada de manera que el LES se puede tomar en términos de volumen (VES) o masa (MES) la fracción será descrita como la Ec 4.15.

$$\text{fracción del sólido utilizada} = \text{fracción de longitud utilizada} \quad \text{Ec 4.15.}$$

$$\text{fracción va a ser} = \frac{H_C \cdot f_{\text{útil}} = \text{LES}}{H_C \cdot f_{\text{no útil}} = \text{LUB}} \quad \text{Ec 4.16.}$$

#### 4.4. Escalamiento

Para proceder a realizar el escalamiento oportunamente debemos tener en cuenta los siguientes factores propuestos desde nuestra experimentación y adicionalmente asumir valores de diámetro y altura para el lecho basado en información teórica y bibliografía, los parámetros a tener en cuenta son:

- Flujo
- Concentración inicial
- Área transversal (asumir)
- Altura (asumir)

Teniendo en cuenta lo descrito anteriormente se plantea la Ec 4.17. donde la altura de la columna estará dada en términos de volumen

$$H_c = \frac{V_{lecho}}{A_c} = \frac{VES+VUB}{A_c} \quad Ec 4.17.$$

Donde:

- VEB: Volumen sin utilizar del lecho
- VES: volumen del sólido agotado

A continuación a partir de datos que se asumen para escalar debemos saber  $F_{ESC}$ ,  $C_0$  con estos datos se puede saber el tiempo que deseamos ( $t_{rup,diseño}$ ) entre las regeneración de sólido o cambio de columna, ya que en este proceso se trabaja con dos columnas una primera que está en operación y la segunda que está en proceso de regeneración o en reposo antes de volver a entrar en operación, para esto tenemos que conocer los parámetros antes nombrados ( $F_{ESC}$ ,  $C_0$ ,  $t_{rup,diseño}$ )

multiplicando los anteriores datos se obtiene la cantidad de sustancia de soluto que requerimos remover idealmente, ya que se está eligiendo algunos datos.

$$m_A^{ideal} = F_{ideal} * C_0 * t_{rup,diseño} \quad Ec 4.18.$$

Teniendo en cuenta que la capacidad máxima de adsorción del soluto es

$$q_A^{max} = \frac{m_A^{sat}}{m_s} \quad Ec 4.19.$$

En este momento se tiene que determinar la masa de sólido adsorbente que se requiere de la siguiente manera a condiciones de escala

$$m_s^{ideal} = \frac{F_{ESC} * C_0 * t_{run, diseño}}{q_A^{max}} \quad Ec 4.20.$$

Por consiguiente, conociendo la masa y si se conoce la densidad del lecho se puede calcular el volumen del lecho, una vez se determina el área transversal de la columna, sabremos qué altura debería tener la columna idealmente o sea el LES

$$LES = \frac{\frac{m_s}{\rho_{lecho}}}{A_c} \quad Ec 4.21.$$

Sin embargo, se tiene en cuenta que siempre debe haber una zona de transferencia de masa, por lo tanto, se le tiene que agregar un poco más de sólido lo que sería el LUB el cual no se llega a agotar.

Ahora considerando la velocidad del flujo en la columna, en la que tiene que ver directamente el área transversal ( $A_c$ ) de la columna y el flujo como tal, puesto que entre el área transversal sea más grande, la altura de transferencia de masa es más pequeña y se va a aprovechar mayormente la cantidad del sólido de manera que el LUB va a ser más pequeño, por otro lado si la velocidad es muy grande, se desaprovecha el sólido, ya que se requerirá más para que el flujo contaminado pase por todo este y remueva el suficiente como a la velocidad que va.

$$LUB \propto LMTZ \propto \frac{u_s * dp^2}{Def_f} \quad Ec 4.22.$$

Donde

- $u_s$  = velocidad superficial del fluido a través del lecho
- $dp^2$  = diámetro de partícula del sólido
- $Def_f$  = difusividad efectiva
- $\propto$  = símbolo directamente proporcional

De manera que se puede generar una proporción entre dos LUB,  $LUB_1$  y  $LUB_2$  el de las condiciones de escalamiento y las condiciones de laboratorio respectivamente.

$$\frac{LUB_1}{LUB_2} = \frac{U_{S1} * dp_1^2 * Def_{f2}}{U_{S2} * dp_2^2 * Def_{f1}} \quad Ec 4.23.$$

Entonces, si se mantiene un sólido con las mismas características, de iguales diámetros de partícula este parámetro no va a influir y si también se mantienen las mismas difusividades por ejemplo temperatura, presiones entre otras, este dato tampoco tendrá que influir y solo

afectaría en razón de las velocidades donde se pueden describir de la siguiente manera

$$u_s = \frac{F}{A_c} \quad \text{Ec 4.24.}$$

Una vez estipuladas las ecuaciones para el escalamiento, se procede al dimensionamiento de la columna con una concentración de entrada y caudal específico a su vez asumiendo la altura de la columna junto con el diámetro como se muestra en la *Tabla 23*.

**Tabla 23.**

*Datos diseño columna de lecho fijo escala piloto*

<b>Concentración inicial (mol/m<sup>3</sup>)</b>	0,22
<b>Altura de la columna (m)</b>	1
<b>Diámetro de la columna (m)</b>	0,12
<b>Tiempo ideal(min)</b>	60
<b>Tiempo de utilización de la columna (días)</b>	4
<b>Masa sólida (g)</b>	903,75

*Nota.* Resumen datos propuestos para el diseño del lecho

Teniendo en cuenta los valores asignados en el diseño de la torre se obtienen los siguientes resultados.

**Tabla 24.***Datos escalado columna de lecho fijo*

$m_A^{sat}(mg/g)$	0,0254
$m_s(g)$	903,75
$q_A^{max}(mg/g)$	0,01016
$q_A^{rupt}(mg/g)$	0,00871
$A_c(m^2)$	0,0103
$\rho_{lecho}(g/m^3)$	0,71
$f_{\acute{u}til}$	0,857
$f_{no\ util}$	0,142
$m_A^{ideal}$	79,542
$m_s^{ideal}$	7825,87
<b>LES(m) Esc</b>	0,857
<b>LUB(m) Esc</b>	0,142
$u_{s1}(m/seg)$	0,252
$u_{s2}(m/seg)$	21,939

*Nota.* Resultado escalamiento con modelo conceptual

## **5. EVALUACIÓN DE COSTOS DE ESCALADO COLUMNA DE LECHO FIJO**

Para la estimación de costes del escalamiento de la torre de adsorción de lecho fijo, se ha recurrido a catálogos industriales y proyectos bibliográficos relacionados, mediante los cuales obtuvimos la información pertinente para estipular globalmente los costos de planta piloto.

Para la estimación del coste de la columna, se ha elegido una columna de acero inoxidable dado que es compatible con el agua a tratar y nuestro biosorbente.

El diseño escalado de la columna de adsorción tiene una altura de 1 m (metro) y un diámetro de 0,12 m (metros), para utilizar un lecho de una masa 903,75 g y esta trabaja a un caudal de 0,0000627 m<sup>3</sup>/min, por un tiempo de 4 días (5760 min), también se considera parámetros fijos y constantes como lo son el pH, la velocidad de flujo y la temperatura, se debe tener en cuenta que esta columna no se está diseñando para una empresa industrial, ya que es un diseño a escala piloto.

Para costos de la masa total de materia se estima que se recolecta la cáscara con empresas en las cuales en el desperdicio se encuentre la cáscara de banano, principalmente plazas de mercado de la ciudad de Bogotá y se pagará un total de \$1.200 por kilo de cáscara de banano.

**Tabla 25.***Presupuesto del equipo y el material a utilizar*

<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>UNIDADES</b>	<b>PRECIO (UND)</b>	<b>DESCRIPCIÓN EQUIPOS</b>
Masa total de material adsorbente	6.79 Kg	\$1.200 por kilo	Cáscara de banano
Columnas de adsorción lecho fijo	2	\$8'683.231,37	Torre dimensiones estipuladas en acero inoxidable
Horno	1	\$12.709.574	-Estufa de 161 L Circulación de aire natural -Single 1 Display -Incluye 2 Rejillas
Molino	1	\$719.900	Molino Eléctrico cuchillas, con motor de 1 hp de fuerza, 1730 rpm 110 voltios, Estructura en hierro calibre 19, pintados con pintura electrostática martillada horneada. Tolva en acero inoxidable. Tiene 2 bandejas plásticas.
Tamiz	1	\$9.667.500	iScreen 12" x 24" Tamiz Vibratorio Pequeño
Tanque almacenamiento	3	\$269.400	Tanque colempaques Homecenter 500 L

**Nota.** Análisis y evaluación tentativa de costos de equipo para puesta en marcha del escalamiento.

**Tabla 26.***Presupuesto puesta en marcha-mano de obra*

DESCRIPCIÓN	UNIDADES	PRECIO / mes										
Transporte	1	\$1.200.000										
Instalación	única vez	\$2.000.000										
Servicios	1	\$2.153.723										
<p>Los costos asociados a los servicios públicos relacionados al proceso se encuentran descritos a continuación:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Acueducto: Valor \$/m3 se encuentra establecido para diciembre 2021 en un importe de \$3.819,48 para el sector de industria, teniendo en cuenta la cantidad de m3 a consumir mensualmente los cuales se predicen a un rango de 400m3, dejando un valor promedio para el servicio de acueducto de \$1.527.792.</li> <li>○ Consumo energía: El valor estipulado por la compañía Enel para el año 2021 referente a al valor \$/kWh es un importe de \$507,44 para la industria, tomando en cuenta nuestro proceso indica un consumo promedio mensual de 475 kWh para un total de tarifa de servicio igual a \$241.034.</li> <li>○ Gas: El valor determinado para el valor por m3 es \$159,18, para nuestro proceso se indica un consumo mensual de 2.418 m3 de gas, por ende, la tarifa mensual a cancelar rodea los \$384.897.</li> </ul>												
Operarios	1	\$1.296.000										
<p>Costos implicados en el salario del trabajador se encuentran descritos a continuación:</p> <table style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr> <td>SMLV:</td> <td>\$ 908.526,00</td> </tr> <tr> <td>Aux Transporte:</td> <td>\$ 106.454,00</td> </tr> <tr> <td>Prestaciones sociales:</td> <td>\$130.925,87</td> </tr> <tr> <td>Parafiscales:</td> <td>\$36.341,04</td> </tr> <tr> <td>Seguridad social:</td> <td>\$113.765,63</td> </tr> </table>			SMLV:	\$ 908.526,00	Aux Transporte:	\$ 106.454,00	Prestaciones sociales:	\$130.925,87	Parafiscales:	\$36.341,04	Seguridad social:	\$113.765,63
SMLV:	\$ 908.526,00											
Aux Transporte:	\$ 106.454,00											
Prestaciones sociales:	\$130.925,87											
Parafiscales:	\$36.341,04											
Seguridad social:	\$113.765,63											

**Nota.** Análisis y evaluación tentativa de costos de mano de obra para puesta en marcha del escalamiento.

Los valores considerados en este apartado son tentativos, el valor de la columna de adsorción se realiza de acuerdo al tamaño de la estipulada en nuestro escalamiento, así como las respectivas cotizaciones de los equipos utilizados en el proceso experimental. Una vez estipulados los valores tentativos para el proceso considerados en la *Tabla 5.1* y *Tabla 5.2* se tiene un valor total de \$47'929.507 para los costos de escalado de la adsorción propuesta experimentalmente.

## 6. CONCLUSIONES

El agua que se caracterizó fue tomada de la empresa Curtiembres Curtrinc S.A.S del Barrio San Benito, Bogotá. Tal y como hemos podido comprobar la industria de curtiembre en Bogotá, tiene una problemática ambiental, ya que ha tenido gran cantidad de inconvenientes a la hora de cumplir con los parámetros de cromo en su agua residual, el agua tratada, la cual ya ha pasado por una precipitación de cromo y filtrado, aún contiene un 0.22mg/L de cromo inicial y el valor permitido por la resolución de la normativo colombiana 2115 de 2007, establece que el valor máximo debe ser de 0.05mg/L expresada como cromo total, el pH de las muestras tomadas dieron en un rango de 2,32 a 2,64.

La temperatura utilizada en el secado de cáscara de plátano fue de 92°C, por un tiempo de 4 horas aproximadamente, el cual fue suficiente para lograr la consistencia quebradiza de la cáscara de banano que se requería para triturar sin inconvenientes.

El modelo isotérmico de adsorción que más se ajustó a los datos experimentales fue la isoterma de Freundlich, teniendo en cuenta su coeficiente de correlación de  $R^2=0.882$ , por lo tanto, resultó ser bueno según la “tabla 3.6. relación obtenida” en donde muestra los intervalos de calificación del modelo, por otro lado, aunque el modelo de Langmuir también dio en el rango de modelo bueno este es menor con una correlación de  $R^2= 0.07692$ .

El modelo cinético de adsorción que mejor se ajustaron a los datos experimentales según el criterio de selección de las gráficas, de la ecuación de la línea recta, fue el modelo de Pseudo Primer Orden con un coeficiente de correlación de  $R^2=0.9487$ , presentando una mayor linealidad, debido a que describe mejor la velocidad de adsorción a la que el material biosorbente remueve el contaminante del agua industrial.

Dado el escalamiento se consideran grandes volúmenes de biosorbente para dar abasto a una columna mucho más grande, lo que considera un mayor uso de biomasa, esto puede resultar una ventaja dado la gran cantidad de residuo que se puede reutilizar si generar contaminación ambiental y desperdicio de esta biomasa.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] G. Petro Urrego y M. S. Muhamad González, «Guía de producción más limpia para el sector curtiembres de Bogotá,» 2014. [En línea]. Available: [https://oab.ambientebogota.gov.co/wp-content/uploads/dlm\\_uploads/2018/11/GuiaProduccionMasLimpiaSectorCurtiembresBogota.pdf](https://oab.ambientebogota.gov.co/wp-content/uploads/dlm_uploads/2018/11/GuiaProduccionMasLimpiaSectorCurtiembresBogota.pdf).
- [2] L. Daza Vásquez, «Las curtiembres en el barrio San Benito, Bogotá. Un análisis bioético en la perspectiva de Hans Jonas,» Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá D.C., 2012.
- [3] O. L. B. Prada, «Evaluación y reducción de los niveles de cromo en muestras de aguas residuales provenientes de curtiembres,» 03 Noviembre 2016. [En línea]. Available: <http://revistas.ustatunja.edu.co/index.php/lingenieux/article/view/1230>.
- [4] J. A. Diaz Martinez y C. A. Granada Torres, «Efecto de las actividades antrópicas sobre las características fisicoquímicas y microbiológicas del río Bogotá a lo largo del municipio de Villapinzón, Colombia,» Revista de la facultad de Medicina, 2018.
- [5] Innovation for customers , «Nitto, tecnología de polimerización,» 2016. [En línea]. Available: <https://www.nitto.com/eu/es/rd/base/paint/polymer/>.
- [6] R. Lopez Salazar y J. Carrillo, «Escalamiento y trabajo: El caso de la industria electrónica de Tijuana,» México, 2010.
- [7] F. Carrasquer Alonso, «Estudio de la capacidad de adsorción de lindano presente en corrientes acuosas con materiales nanocarbonosos,» 2018. [En línea]. Available: <https://core.ac.uk/download/pdf/289997028.pdf>.
- [8] L. M. Hernandez Mestanza, «Elaboración de un material biosorbente a partir de la cáscara de banano (Musa sp) para ser utilizado en la remoción de cromo VI,» San Salvador, 2015.
- [9] D. 3930, «Usos del agua y residuos líquidos y se dictan otras disposiciones.,» 2010.
- [10] D. 2667, «Recurso-hidrico,» 2012.
- [11] R. 3956, Secretaría Distrital de Ambiente, 2009.
- [12] L. 9, Protección del medio ambiente, 1979.

- [13] R. 3957, Secretaría Distrital de Ambiente, 2009.
- [14] R. 0631, Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, 2015.
- [15] Google, «Indicaciones de Google Maps para llegar al barrio San Benito, sector curtiembres,» [En línea]. Available: <https://www.google.com/maps/place/San+Benito,+Tunjuelito,+Bogot%C3%A1/@4.563161,-74.1385058,16.34z/data=!4m9!1m2!2m1!1sSan+benito+!3m5!1s0x8e3f9f4f4eaf3683:0xac7d2fc71fe89210!8m2!3d4.5621143!4d-74.1342726!15sCgpTYW4gYmVuaXRvkgEMbmVpZ2hib3Job29k..> [Último acceso: Septiembre 2021].
- [16] G. P. Urrego, «Guía de producción más limpia sector de curtiembre Bogotá,» Secretaría Distrital de Ambiente, Bogotá D.C., 2012.
- [17] J. E. Vega, «Curtiembres en la localidad de san Benito, Bogotá; identificación de alternativas para reducción de impactos ambientales, generados por sus vertimientos,» Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD, 2020. [En línea]. Available: <https://repository.unad.edu.co/jspui/bitstream/10596/36682/3/jevega.pdf>.
- [18] L. K. Amaya Ochoa, L. D. Mendieta Campos y A. Garibello, «Curtiembres Rio LTDA,» [En línea]. Available: <https://es.calameo.com/read/005186126c3b961f4909b>.
- [19] N. B. Morales Posada y G. E. Acosta Niño, «istema de electrocoagulación como tratamiento de aguas residuales galvánicas,» 2010.
- [20] J. A. Garzon Santamaria y L. A. Gonzalez Lopez, «Adsorción de Cr utilizando carbon activado a partir de cáscara de naranja,» Cartagena de Indias, 2012.
- [21] S. J. Cardenas Salazar y J. C. Ortega Revilla, «Modelamiento y simulación de una columna de adsorción de lecho fijo para la remoción de Cr (VI) de soluciones acuosas utilizando aserrin como adsorbente,» 2015. [En línea]. Available: <http://repositorio.unsa.edu.pe/bitstream/handle/UNSA/4003/IQorrejc085.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- [22] O. E. Garcia Muñoz y L. N. Ramirez Rdoriguez, «Evaluación de una propuesta para el sistema de tratamiento de aguas residuales de curtiembre y marroquinería F.B.,» 2019. [En línea]. Available:

<https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/7378/1/6132093-2019-1-IQ.pdf>.

- [23] Y. M. Barroso Meneses, P. A. Mantilla Patiño y J. F. Perez Betancur, «Remoción de cromo en aguas residuales industriales mediante el uso de biomasa de *Spirulina* sp, sedimentación primaria y precipitación química,» Diciembre 2018. [En línea]. Available: <https://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/riaa/article/view/2326>.
- [24] V. Lopez, «The Social Water,» 2021.
- [25] P. E. Rios Elizalde, «Cinetico de biadsorción de Arsenico utilizando cascara de banano maduro en polvo,» 2014. [En línea]. Available: <http://repositorio.utmachala.edu.ec/bitstream/48000/1579/7/CD00006-TESES.pdf>.
- [26] C. C. Y. BERNABE, Artist, *Estudio experimental para el uso del hexafluoruro de azufre*. [Art]. Universidad Veracruzana , 1994.
- [27] L. M. P. Arbeláez, «La reutilización del cromo, como método para la conservación del medio ambiente y la perdurabilidad de Pinillarbe,» Bogotá D.C., 2016.
- [28] A. A. Durand, «Escalamiento, el arte de la ingeniería química: Plantas piloto el paso entre el huevo y la gallina,» UNAM, Facultad de química , México D.F., 2008.
- [29] V. Lopez, «The social water,» 11 marzo 2021. [En línea].
- [30] C. Lopez, «Curtiembres e impacto en la salud,» 24 Marzo 2017. [En línea]. Available: <https://curtiembreseimpactoenlasalud.wordpress.com/2017/03/24/que-es-una-curtiembre/>.
- [31] E. S. M. Equihua, «Escalamiento del proceso de obtención de fructooligosacáridos a partir de jugo de caña,» JALISCO , 2016.
- [32] «Significados,» Ciencia, 17 Diciembre 2017. [En línea]. Available: <https://www.significados.com/adsorcion/>.
- [33] D. 3. D. 2010, « Usos del agua y residuos líquidos y se dictan otras disposiciones.».
- [34] D. 2. D. 2012, «Recurso-hidrico».
- [35] G. Maps, «San Benito, Tunjuelito,» [En línea]. Available: <https://www.google.com/maps/place/San+Benito,+Tunjuelito,+Bogot%C3%A1/@4.563161,->

74.1385058,16.34z/data=!4m9!1m2!2m1!!1sSan+benito+!3m5!1s0x8e3f9f4f4eaf3683:0xac7d2fc71fe89210!8m2!3d4.5621143!4d-

74.1342726!15sCgpTYW4gYmVuaXRvkgEMbmVpZ2hib3Job29k.

- [36] J. E. Vega, «Curtiembres en la localidad de san Benito, Bogotá; identificación de alternativas para reducción de impactos ambientales, generados por sus vertimientos.,» Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD, Bogotá D.C., 2020.
- [37] J. A. G. L. L. A. Garzon Santamaria, «Adsorción de Cr (VI) utilizando carbón activado a partir de cáscara,» Universidad de Cartagena de Indias, 2012.
- [38] M. y. T. C. A. Pinzón-Bedoya, « Caracterización de la cascara de naranja para su uso como material bioadsorbente,» 2008.
- [39] Y. S. L., «Diseño y simulación de columnas de adsorción de cromo de aguas tratadas de tenerías utilizando adsorbentes desarrollados en países Iberoamericanos,» Pág.42, 2015.
- [40] N. R. rodriguez, «evaluación de una propuesta para el sistema de tratamiento de aguas residuales de curtiembre y marroquinería f.b,» facultad de ingenieríaS, 2019.
- [41] R. A. M. C. A. P. G. Diego Ivan Caviedes Rubio, «Tratamientos para la Remoción de Metales Pesados Comúnmente Presentes en Aguas Residuales Industriales.,» Revista ingeniería y región , 2015.
- [42] D. d. c. A. y. Forestales, «Cadena de platano,» Minagricultura, 2020.
- [43] J. F. .. Monsalve g. y v. i. y. r. c. a. a. medina de perez, «producción de etanol a partir de la cáscara de banano y de almidón de yuca».
- [44] V. y. D. T. Ministerio de Ambiente, «Toma de muestras de aguas Residuales,» Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, Colombia, 2007.
- [45] G. A. M. C. Gloria Sandra Espinosa Narváez, Alternativas ambientales para la remoción de cromo hexavalente en residuos líquidos de los laboratorios especializados de la Universidad de Nariño, Manizales, Colombia : Facultad de Ciencias Contables, Económicas y Administrativas, 2015.
- [47] G. S. E. Narvaéz.

- [48] G. S. E. N. y. G. A. M. Córdoba, Alternativas ambientales para la remoción de cromo hexavalente en residuos líquidos de los laboratorios especializados de la Universidad de Nariño, Manizales, Colombia : Facultad de Ciencias Contables, Económicas y Administrativas, 2015.
- [49] B. C. Pastor, Uso de la cáscara de banano (*Musa paradisiaca*) maduro deshidratada (seca) como proceso de bioadsorción para la retención de metales pesados, plomo y cromo en aguas contaminadas., Guayaquil Ecuador : maestría en impactos ambientales, 2015.
- [50] B. S. A. Olenka, Efecto del polvo de cáscara de *musa paradisiaca* en la remoción de cromo total de las aguas residuales de Inversiones Harod S.A.C., Trujillo, Trujillo, Perú: Escuela Académico Profesional De Ingeniería , 2016.
- [51] M. L. H. y. M. L. Romero, Remoción de cromo hexavalente en aguas contaminadas utilizando cáscara de plátano (*Musa paradisiaca*) como adsorbente., Managua, Nicaragua. : Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, 2020.
- [52] G. E. M. A. y. E. A. M. M. Laura Marilyn Hernández Mestanza, Elaboración de un material biosorbente a partir de la cáscara de platano (*Musa sp.*) para ser utilizado en la remoción VI proveniente de las aguas residuales de la industria de curtiembre., San Salvador : Escuela De Ingeniería Química E Ingeniería De Alimentos, 2019.
- [53] A. A. Lassman, «Generación y aprovechamiento de bioenergéticos,» *Instituto tecnológico de orizaba* , 2020.
- [54] L. V. Daza, «Las curtiembres en el barrio san benito de bogotá,» pontificia universidad javeriana, Bogotá D.C., 2012.
- [55] D. Figueroa, A. Moreno y A. Hormaza, «Equilibrio, termodinámica y modelos cinéticos en la adsorción de Rojo 40 sobre tuza de maíz,» Revista Ingenierías Universidad de Medellín, Antioquía, Medellín., 2014.
- [56] A. A. P. Redrobán, «Determinación del nivel de filtración que tiene la cáscara de plátano, para reducir metales pesados presentes en agua residuales en la empresa Weatherford, cantón Francisco de Orellana, Provincia de Orellana.,» 2014. [En línea]. Available: <http://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/2715>.

- [57] O. L. Borda Prada, «Evaluación y reducción de los niveles decromo en muestras de aguas residuales provenientes de Curtiembre,» Universidad La Gran Colombia, Bogotá D.C., 2014.
- [58] J. F. Rivero Méndez, «Efecto del polvo de cáscara de Musa paradisíaca en la remoción de cromo total de las aguas residuales de Inversiones Harod S.A.C., Trujillo,» 2016. [En línea]. Available: <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/6584?show=full>.
- [59] L. K. Amaya Ochoa y L. D. Mendieta campos, «Curtiembres Rio LD,» [En línea].

## **ANEXO 1.**

### **RECOMENDACIONES**

Realizar varias pruebas con mayor variedad de concentraciones, para analizar un punto más aproximado al mayor rendimiento de adsorción de cromo por medio de la cáscara de banano.

Ejecutar un análisis del agua a tratar con una mayor cantidad de replicas en dónde se pueda realizar un análisis más a detalle de los cambios que suceden con respecto al agua residual de curtido en distintos tiempos de proceso.

Experimentar con un modelo de adsorción continuo a diferencia del realizado en este proyecto tipo batch, así el escalamiento se puede regir con datos comparativos mucho mejores y se puede suponer la columna de manera más oportuna.

Identificar qué hacer con la biomasa contaminada después de realizado el proceso de purificación.