

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO



FACULTAD DE INGENIERÍA EN SISTEMAS, ELECTRÓNICA E INDUSTRIAL

PROGRAMA DE MAESTRÍA EN QUÍMICA COHORTE 2021

Tema: “Biadsorción de cromo (III) provenientes del pre-tratamiento de residuos acuosos en plantas de curtiembre mediante un biofiltro a base de fibras naturales”

Trabajo de Titulación, previo a la obtención del Título de Cuarto Nivel de Magister en Química.

Modalidad del Trabajo de Titulación: Proyectos de Desarrollo

Autor: Químico, Juan Daniel Laguna Chango

Director: Doctor Jorge Efrén Silva Yumi PhD.

Ambato –Ecuador

2023

A la Unidad Académica de Titulación de la Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial.

El Tribunal receptor del Trabajo de Titulación, presidido por: Ingeniera Elsa Pilar Urrutia Urrutia Magister, e integrado por los señores: Químico Lander Vinicio Pérez Aldás Magister y Ingeniera Nelly del Pilar Pazmiño Miranda Magister, designados por la Unidad Académica de Titulación de la Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial de la Universidad Técnica de Ambato, para receptor el Trabajo de Titulación con el tema: “Biadsorción de cromo (III) provenientes del pre-tratamiento de residuos acuosos en plantas de curtiembre mediante un biofiltro a base de fibras naturales” elaborado y presentado por el señor Químico Juan Daniel Laguna Chango, para optar por el Título de cuarto nivel de Magíster de Magíster en Química; una vez escuchada la defensa oral del Trabajo de Titulación, el Tribunal aprueba y remite el trabajo para uso y custodia en las bibliotecas de la UTA.

Ing. Elsa Pilar Urrutia Urrutia Mg.

Presidente y Miembro del Tribunal

Quim. Lander Vinicio Pérez Aldás Mg.

Miembro del Tribunal

Ing. Nelly del Pilar Pazmiño Miranda Mg.

Miembro del Tribunal

AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

La responsabilidad de las opiniones, comentarios y críticas emitidas en el Trabajo de Titulación presentado con el tema: “Biadsorción de cromo (III) provenientes del pre-tratamiento de residuos acuosos en plantas de curtiembre mediante un biofiltro a base de fibras naturales”, le corresponde exclusivamente a: Químico, Juan Daniel Laguna Chango, Autor bajo la Dirección de Dr. Jorge Efrén Silva Yumi PhD, Director del Trabajo de Titulación, y el patrimonio intelectual a la Universidad Técnica de Ambato.

Quím. Juan Daniel Laguna Chango

c.c.:1804790606

AUTOR

Dr. Jorge Efrén Silva Yumi PhD

c.c.: 0603045329

DIRECTOR

DERECHOS DE AUTOR

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que el Trabajo de Titulación, sirva como un documento disponible para su lectura, consulta y procesos de investigación, según las normas de la Institución.

Cedo los Derechos de mi trabajo, con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de este, dentro de las regulaciones de la Universidad.

Quím. Juan Daniel Laguna Chango

c.c.:1804790606

ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS

PORTADA.....	i
A LA UNIDAD ACADÉMICA DE TITULACIÓN DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA EN SISTEMAS, ELECTRÓNICA E INDUSTRIAL.....	ii
AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN.....	iii
DERECHOS DE AUTOR.....	iv
ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS.....	v
ÍNDICE DE TABLAS	viii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	ix
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xi
AGRADECIMIENTO	xii
DEDICATORIA	xiii
RESUMEN EJECUTIVO	xv
CAPÍTULO I EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	16
1.1. Introducción	16
1.2. Justificación.....	18
1.3. Objetivos	19
1.3.1. General.....	19
1.3.2. Específicos	19
CAPITULO II MARCO TEÓRICO.....	20
2.2. Fundamentación científica.....	25
2.2.1. Generación de efluentes industriales	25
2.2.2. Proceso de curtiembre y generación de residuos	25

2.2.3.	El cromo	28
2.2.4.	Procesos específicos para la eliminación de cromo en efluentes líquidos.....	28
2.2.5.	Procesos de adsorción.....	29
2.2.6.	Bioadsorción	32
2.2.7.	Características Totora (<i>Schoenoplectus californicus</i>)	35
2.2.8.	Procesos de activación bioadsorbente.....	36
CAPITULO III MARCO METODOLÓGICO.....		39
3.1.	Enfoque y tipo de investigación	39
3.2.	Población y muestra	39
3.3.	Hipótesis.....	39
3.4.	Pregunta científica.....	39
3.5.	Recolección de información	40
3.6.	Procesamiento de la información y análisis estadístico	40
3.7.	Elementos de la investigación	40
3.7.1.	Equipos y Materiales	40
3.7.2.	Insumos	41
3.7.3.	Obtención de la materia prima.....	41
3.7.4.	Obtención de la muestra de agua residual.....	42
3.7.5.	Preparación del bioadsorbente	42
3.7.6.	Medición de la concentración del adsorbato mediante Uv-visible.....	42
3.7.7.	Pretratamiento del agua residual.....	43
3.7.8.	Caracterización morfológica totora	43
3.7.9.	Caracterización mediante espectrofotometría infrarroja	43
3.7.10.	Medición del rendimiento del adsorbato, mediante Uv-visible.....	44
CAPITULO IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN		45

4.1.	Identificación botánica y caracterización fibra natural de totora (<i>Schoenoplectus californicus</i>)	46
4.2.	Caracterización fibra natural de totora por espectrofotometría infrarroja	50
4.3.	Activación de la totora (<i>Schoenoplectus californicus</i>).....	52
4.4.	Caracterización muestras hidrolizadas de totora (<i>Schoenoplectus californicus</i>) .	53
4.5.	Caracterización fibra hidrolizada de totora por espectrofotometría infrarroja	55
4.6.	Pretratamiento agua residual	58
4.7.	Medición de la concentración de adsorbato mediante Uv visible	58
4.8.	Medición de rendimiento de adsorbato mediante Uv visible	60
CAPÍTULO V		64
CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES, BIBLIOGRAFÍA, ANEXOS.....		64
CAPÍTULO VI		67
PROPUESTA.....		67
6.1.	Título.....	67
6.2.	Descripción	67
6.3.	Desarrollo de la propuesta	70
6.4.	Cronograma.....	71
BIBLIOGRAFÍA		73
ANEXOS		80

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Capacidad máxima de adsorción (mg/g) para diferentes bioadsorbentes	33
Tabla 2. Taxonomía Totora (<i>Schoenoplectus californicus</i>)	47
Tabla 3. Identificación de grupos funcionales por espectrofotometría infrarroja presentes en la muestra de totora (<i>Schoenoplectus californicus</i>) natural 300 μm	51
Tabla 4. Identificación de grupos funcionales contenidos en la muestra de totora (<i>Schoenoplectus californicus</i>) hidrolizada.....	57
Tabla 5. Cálculo absorbancia estándar equipo UV-visible	59
Tabla 6. Cálculo porcentaje de adsorción y rendimiento para los diferentes tamaños de totora hidrolizada (<i>Schoenoplectus californicus</i>), para el agua residual del proceso de curtiembre y el agua de control.....	61
Tabla 7. Investigaciones uso de bioadsorbentes para la remoción de cromo III	68

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación sitio de recolección hojas de totora	41
Figura 2. Ubicación Curtiembre Quisapincha, sector Quisapincha, Ambato.....	45
Figura 3. Recolección de agua residual después del pretratamiento en la Curtiembre Quisapincha sector Quisapincha	46
Figura 4. Imagen totora (<i>Schoenoplectus californicus</i>)	47
Figura 5. Caracterización morfológica de fibra natural totora (<i>Schoenoplectus californicus</i>) con tamaño de muestra 300 μm usando microscopio óptico.....	48
Figura 6. Caracterización morfológica de fibra natural totora (<i>Schoenoplectus californicus</i>) con tamaño de muestra 425 μm usando microscopio óptico.....	49
Figura 7. Caracterización morfológica de fibra natural totora (<i>Schoenoplectus californicus</i>) con tamaño de muestra 850 μm usando microscopio óptico.....	49
Figura 8. Barrido Infrarrojo de 540 cm^{-1} a 4000 cm^{-1} en fibra de totora natural (<i>Schoenoplectus californicus</i>) con tamaño de muestra 300 μm , detección e identificación de grupos funcionales.	50
Figura 9. Muestras fibra totora (<i>Schoenoplectus californicus</i>) hidrolizadas con KOH.....	53
Figura 10. Caracterización morfológica de fibra de totora (<i>Schoenoplectus californicus</i>) hidrolizada con tamaño de muestra 300 μm	54
Figura 11. Caracterización morfológica de fibra de totora (<i>Schoenoplectus californicus</i>) hidrolizada con tamaño de muestra 425 μm	54
Figura 12. Caracterización morfológica de fibra de totora (<i>Schoenoplectus californicus</i>) hidrolizada con tamaño de muestra 850 μm	55
Figura 13. Barrido Infrarrojo de 520 cm^{-1} a 4000 cm^{-1} , en fibra de totora hidrolizada con KOH con tamaño de muestra 300 μm , detección e identificación de grupos funcionales.	56
Figura 14. Barrido Uv-Visible, solución estándar de Cr (III) grado reactivo, a una longitud de onda de 232 nm.....	59

Figura 15. Comparación % de adsorción y rendimientos para agua residual y agua de control cromo (III)	62
Figura 16. Comparación rendimiento para agua residual y agua de control cromo (III) para los diferentes tamaños de muestra	63
Figura 17. Cronograma de actividades. Propuesta de escalamiento básico a nivel industrial de un sistema de adsorción de Cromo (VI) utilizando totora (<i>Schoenoplectus californicus</i>) hidrolizada como material adsorbente.....	72

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Preparación muestras totora (<i>Schoenoplectus californicus</i>)	80
Anexo 2. Determinación grupos funcionales presentes muestras de totora (<i>Schoenoplectus californicus</i> por espectrofotometría infrarroja	81
Anexo 3. Activación muestras de totora con KOH al 1%	82
Anexo 4. Secado muestras totora hidrolizadas, utilizando estufa a temperaturas entre 40°C y 60°C por 4 Horas	83
Anexo 5. Muestra de totora hidrolizada, seca y triturada	84
Anexo 6. Pretratamiento aguas residuales provenientes del proceso de curtiembre	85
Anexo 7. Preparación solución control cromo (III), concentración 1,15 mg/mL.....	86
Anexo 8. . Picos obtenidos por barrido Uv-visible.....	87
Anexo 9. Espectro Uv-Visible, Absorbancia estándar mediante Cr (III) grado reactivo, a una longitud de onda de 232 nm.	88
Anexo 10. Interpolación Concentración de cromo (III) presente en distintas soluciones estándares mediante UV-Visible	89

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, agradezco a mis padres María y Juan por inculcarme cada día para poder cumplir todos mis objetivos personales y académicos. Ellos son los que con su cariño me han impulsado siempre a perseguir mis metas y nunca abandonarlas frente a las adversidades. También son los que me han brindado el soporte material y económico para poder concentrarme en los estudios y nunca abandonarlos, Le agradezco a mi familia por motivar mis esfuerzos e impulsar mis caminos al éxito, muy profundamente a mi tutor por su dedicación y paciencia, impulsando más mis conocimientos para poder llegar a esta instancia tan anhelada.

Daniel

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a
Dios por ser el mi guía y
dirección en cada paso,
mostrándome cada día
cosas grandes y
maravillosas que aún no
conozco.

Daniel

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA EN SISTEMAS, ELECTRÓNICA E INDUSTRIAL
MAESTRÍA EN QUÍMICA
COHORTE 2021

TEMA:

BIADSORCIÓN DE CROMO (III) PROVENIENTES DEL PRE-TRATAMIENTO DE RESIDUOS ACUOSOS EN PLANTAS DE CURTIEMBRE MEDIANTE UN BIOFILTRO A BASE DE FIBRAS NATURALES

MODALIDAD DE TITULACIÓN: Proyectos de desarrollo

AUTOR: Quim. Juan Daniel Laguna Chango

DIRECTOR: Dr. Jorge Efrén Silva Yumi PhD.

FECHA: Veinte y seis de octubre del dos mil veinte y tres

RESUMEN EJECUTIVO

La presente investigación tuvo por objeto evaluar la bioadsorción de cromo (III) proveniente del pretratamiento de residuos acuosos de curtiembre mediante un biofiltro a base de fibras naturales. Se empleó como bioadsorbente hojas de totora (*Schoenoplectus californicus*) previamente sometidas a activación química mediante la aplicación de KOH al 1% para mejorar la capacidad de adsorción de la fibra. Las aguas residuales fueron tomadas en la Curtiembre Quisapincha, ubicada en la ciudad de Ambato, provincia de Tungurahua. Este tipo de industrias se caracterizan por generar grandes volúmenes de aguas residuales con gran contenido de elementos químicos, entre ellos cromo, el cual puede presentarse en diversos estados de oxidación. El Cr (III) es considerado el curtidor universal de pieles, no presenta movilidad ni toxicidad, pero bajo ciertas condiciones puede oxidarse y convertirse en Cr (VI) el cual es altamente tóxico, carcinogénico y mutagénico, lo expuesto evidencia la importancia de remover el cromo (III) para evitar su posible conversión a cromo (IV) con los riesgos ambientales que ello involucra.

Para llevar a cabo la experimentación, las hojas de totora fueron trituradas y tamizadas para preparar muestras de 300 μm , 420 μm y 850 μm . Para la caracterización morfológica antes y después de la activación, se hicieron observaciones a través del microscopio electrónico, lo que permitió verificar en la fibra la presencia de ranuras indicativas de sitios disponibles para adsorción. Se utilizó espectrofotometría infrarroja para determinar los grupos funcionales presentes en la totora, los cuales fueron: O-H, C-H, C=O y C-C.

La concentración y el rendimiento del adsorbato se determinaron mediante espectrofotometría de Uv-visible. Los porcentajes de adsorción para el agua colectada en la curtiembre varían entre 59,23% y 73,3%, lo cual permite asegurar que las hojas de totora permiten obtener elevados porcentajes de eliminación de cromo (III) contenidos en aguas de la industria de curtiembres.

DESCRIPTORES: BIOADSORCIÓN, TOTORA (*Schoenoplectus californicus*), ELIMINACIÓN CROMO (III), TRATAMIENTO DE AGUAS, ACTIVACIÓN QUÍMICA.

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. Introducción

Al agua se le denomina vital líquido, porque es una sustancia imprescindible para la preservación de la vida en la Tierra, pero su disponibilidad es limitada. En el planeta existen 1.400 millones de kilómetros cúbicos de agua, pero únicamente el 2,5% de ese volumen es agua dulce y apenas el 0,3% está disponible (World Bank, 2013). A este panorama, se le debe sumar que, debido a las actividades del hombre, muchos cuerpos de agua están contaminados, principalmente por el vertido de aguas residuales sin tratar, tanto de origen municipal como industrial.

En Ecuador, los procesos productivos generan vertidos industriales que descargan a ríos, lagunas, lagos o directamente al mar, muchas veces sin ser sometidos a un tratamiento previo, introduciendo contaminantes a las fuentes hídricas y generando riesgos para la población que hace uso de los mismos con diferentes fines: riego, como fuente de agua potable, uso recreativo, entre otros. Muchos de los contaminantes generados por la actividad industrial son bioacumulables, por lo que pueden provocar patologías crónicas y agudas (Morales, 2022). Entre las sustancias que contienen este tipo de efluentes, se encuentran los metales pesados, los cuales pueden tener efectos nocivos sobre el hombre y diversos ecosistemas (Pabón *et al*, 2022).

Entre las industrias que generan efluentes con elevadas concentraciones de metales pesados y otros contaminantes y que además utilizan grandes volúmenes de agua, se encuentran las curtiembres. (Parada *et al.*, 2019). Durante el proceso de curtido se utiliza cromo, el cual es un metal pesado que presenta dos estados de oxidación estables el cromo trivalente (Cr (III)) y el hexavalente (Cr (VI)). El cromo trivalente es considerado el curtidor universal, pero las pieles absorben a lo sumo un 70% de la cantidad añadida, y el restante es incorporado a los residuos líquidos generados en la curtiembre (Basantes y Lozano, 2018).

En Ecuador, en la localidad de Ambato, provincia de Tungurahua, se estima que el 95% de las industrias dedicadas al proceso de curtiembre emplean sales de cromo y que el 40% de las mismas no disponen de sistemas de tratamiento para eliminar los contaminantes presentes en

sus efluentes líquidos, los cuales son descargados al río Ambato ocasionando la contaminación del mismo (Basantes y Lozano, 2018).

Como respuesta a la necesidad disponer de alternativas efectivas y a bajos costos para dar tratamiento a las aguas generadas en las curtiembres surge el presente proyecto para evaluar el proceso de bioadsorción de cromo (III) generados en el pre-tratamiento de residuos acuosos en plantas de curtiembre mediante un biofiltro a base de fibras naturales (hojas de totora), para lo cual se recolectaron, acondicionaron y caracterizaron las hojas de totora. Se colectaron muestras de efluentes industriales en la Curtiembre Quisapincha del sector Quisapincha, de la ciudad de Ambato, provincia de Tungurahua, las cuales fueron sometidas al proceso de bioadsorción y posteriormente analizadas para establecer el grado de depuración alcanzado.

Aunque el cromo trivalente no está normado en Ecuador para descarga a cuerpos de agua, con este proyecto es posible verificar si a través del proceso de bioadsorción con hojas de totora, se pueden reducir las concentraciones del referido ion metálico, disminuyendo así los riesgos de que el mismo se convierta a cromo (VI), cuyos impactos sobre el medio ambiente y la salud humana están ampliamente documentados.

Esta investigación permitió evidenciar que los porcentajes de adsorción alcanzados para el agua colectada en la curtiembre varían entre 59,23% y 73,3%, lo cual lleva a concluir que las hojas de totora permiten obtener elevados porcentajes de eliminación de Cr (III) contenidos en los volúmenes de agua que son descargados una vez utilizados en los procesos de curtiembre, por lo que pueden ser utilizadas como bioadsorbentes.

El presente proyecto está constituido por:

Capítulo I. El problema de investigación: donde se introduce el tópico que se pretende estudiar, así como los elementos que justifican el desarrollo del mismo y los objetivos que se quieren alcanzar.

Capítulo II. Marco teórico: bajo este título se reportan investigaciones previas desarrollados en el área objeto de estudio y se expone la fundamentación científica, detallando información de interés sobre las variables asociadas a la investigación.

Capítulo III. Marco Metodológico: se describe en este apartado el tipo de investigación a realizar, se establecen la población y muestra objeto de estudio, así como las hipótesis vinculadas al mismo. Adicionalmente se presenta información sobre los instrumentos y técnicas a emplear para la recogida, procesamiento y evaluación de los resultados y se dan detalles de la metodología experimental empleada.

Capítulo IV. Resultados y discusión: se detallan bajo este título los resultados que se obtuvieron durante la fase de experimentación y se realiza el análisis de los mismos.

Capítulo V. Conclusiones y recomendaciones: donde se muestran las conclusiones y recomendaciones, vinculadas al cumplimiento de los objetivos específicos planteados en el estudio.

Capítulo VI. Propuesta: se presenta un proyecto de investigación futura, que amplíe, refuerce y permita aplicar los hallazgos de la presente investigación.

1.2. Justificación

La descarga a fuentes hídricas de químicos contenidos en los efluentes generados en los procesos de curtiembre, donde se transforman las pieles de animales en cueros empleados en la industria de marroquinería, ha degradado las características de los referidos cuerpos de agua, debido a la ineficiente gestión de los residuos líquidos. En las curtiembres se utilizan grandes volúmenes de agua con concentraciones elevadas de cromo trivalente y cromo hexavalente, que suponen una amenaza para la salud humana y para distintos ecosistemas (Silva y Salinas, 2022).

Para remover contaminantes generados durante los procesos de curtiembre, se han venido realizando investigaciones con el propósito de evaluar diversas técnicas, entre las cuales destaca el uso de filtros empleando distintos tipos de materiales como material filtrante, con el fin de proporcionar una alternativa que permita obtener un efluente libre de metales contaminantes (Punguil, 2017). Muchas investigaciones han incluido el uso de bioadsorbentes, muchos de ellos residuos de procesos agroindustriales, lo cual tiene un doble propósito ambiental, la gestión de los residuos y su aprovechamiento para el tratamiento de efluentes (Fernández, 2019).

Los diversos estudios han demostrado la efectividad del uso de los bioadsorbentes, lo que proporciona una alternativa técnica y económicamente viable para tratar los residuos líquidos

del proceso de curtiembre, que puede ser empleada por las pequeñas y medianas industrias del cuero, permitiéndoles cumplir con la normativa ambiental de una manera más sostenible.

En Ecuador la industria del cuero, está localizada principalmente en el cantón Ambato, y constituye un rubro que realiza aportes importantes a la economía del país, es fuente de empleo y abastece al mercado de distintos productos de cuero (Andrade, 2023). Disponer de alternativas para que estas industrias puedan seguir funcionando sin causar daños al ambiente es otro de los beneficios asociados al presente proyecto.

1.3. Objetivos

1.3.1. General

Evaluar la bioadsorción de cromo (III) proveniente del pretratamiento de residuos acuosos de curtiembre mediante un biofiltro a base de fibras naturales.

1.3.2. Específicos

1. Procesar las fibras naturales mediante métodos químicos para la activación de sitios activos que permitan la adsorción de cromo (III).
2. Caracterizar las fibras procesadas mediante métodos instrumentales avanzados para determinar los grupos funcionales e identificación botánica.
3. Determinar el porcentaje de adsorción de cromo (III) mediante ensayos en el biofiltro para determinar el efecto del tamaño de partícula.

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

Se muestra en este apartado la base científica que da sustento teórico al presente trabajo de titulación. Se emplearon buscadores como *google académico*, *redalyc*, *semantic scholar*, *connected papers*, entre otros, para ubicar investigaciones relacionadas con el tema, y que tuvieran una data máxima de 5 años. Se realizó también la búsqueda en la biblioteca virtual de la Universidad Técnica de Ambato, así como en los repositorios de otras universidades tanto en Ecuador como a nivel internacional.

2.1. Antecedentes investigativos

Dadas las características, carcinogénicas, teratogénicas y mutagénicas de los metales pesados en general, la investigación sobre el tratamiento de los residuos líquidos que presentan concentraciones, en ocasiones muy elevadas, de estos compuestos es amplia. Todo ello con el propósito de encontrar metodologías eficientes a bajos costos, lo cual decanta las opciones hacía el uso de tratamientos de tipo biológico, como la bioadsorción, procesos que presentan la ventaja adicional de generar una menor cantidad de residuos.

En el ámbito de la bioadsorción, desarrolló su investigación Puente (2019), cuyo objetivo fue medir la eficacia del uso de *Moringa oleífera* como tratamiento terciario de efluentes industriales generados en curtiembres artesanales. Para alcanzar el objetivo fue necesario caracterizar y llevar a cabo pruebas de reactores *batch* para establecer la correspondencia entre las dimensiones de la partícula y la capacidad adsorción de Cr (VI), evaluando la influencia del tiempo de contacto, mediante pruebas en discontinuo, para luego construir en función de los resultados las isothermas de adsorción (Langmuir y Freundlich) de la *Moringa oleífera*. Finalmente se realizaron distintos experimentos en reactores *batch*, para establecer el porcentaje de eliminación de Cr (VI).

Entre las conclusiones, el autor señala, que la *Moringa oleífera* presenta en su estructura superficial porosidades y una forma irregular, por lo que se le puede considerar como un buen adsorbente, lo cual se corresponde con el elevado porcentaje de remoción de Cr (VI) alcanzado (98% en 60 minutos) lo que permite reducir la concentración del metal a valores inferiores al límite máximo establecido en la normativa ecuatoriana vigente, convirtiéndola en una opción

viable para el tratamiento terciario de los líquidos producidos en las industrias artesanales dedicadas a la curtiembre.

Un estudio similar fue realizado por Sandoval (2020), empleando como adsorbente cáscara de coco (*Cocos nucifera L*) para eliminar cromo (VI) de efluentes de curtiembres, estableciendo los valores óptimos de pH, dosis de adsorbente y tiempo de contacto, utilizado espectrofotometría para las determinaciones analíticas. El autor obtuvo porcentajes de remoción de hasta 87% y estableció que el proceso puede ser modelado utilizando las ecuaciones de Langmuir y de Freundlich.

Otra investigación orientada a evaluar la eliminación de cromo (VI) en soluciones acuosas, es la presentada por Calvache (2022) quien comparó el uso de restos orgánicos de naranja y huevo para el referido propósito. Definir las concentraciones de cromo (VI) a emplear, elaborar a escala de laboratorio los sistemas de filtración, cuantificar mediante espectrofotometría UV-Vis las concentraciones de cromo hexavalente y establecer cuál de los sistemas era más eficiente para la remoción del referido metal, fueron los aspectos considerados para alcanzar los objetivos establecidos.

La autora destaca que el uso de biofiltros ha venido evaluándose como alternativa para la eliminación de contaminantes en agua dada la alta relación costo/beneficio que presenta este tipo de sistemas al ser comparados con metodologías tradicionales. En función de las evidencias obtenidas en la fase de experimentación, se concluyó que la filtración empleando cáscaras de naranja fue el más efectivo permitiendo alcanzar porcentajes de remoción de hasta 96,73%.

La concha de naranja (*Citrus sinensis*) también fue utilizada para la adsorción de cromo (VI) en el trabajo de Baca (2018), quien evaluó como el pH y la granulometría de la cáscara de *Citrus sinensis*, influyen en la bioadsorción de cromo en las aguas residuales generadas en la etapa de curtido, de la empresa Curtiembre Ecológica del Norte. El autor pudo verificar el impacto de los parámetros antes mencionados en la bioadsorción, obteniendo para las condiciones óptimas de estas variables porcentajes de remoción de 45,35% que no permiten llevar la concentración de cromo a niveles inferiores al límite máximo permitido en la legislación peruana vigente. En función de este resultado el investigador concluyó que la cáscara de naranja no es efectiva a concentraciones elevadas.

También para eliminar cromo (VI) de una industria de curtiembre, se presenta el estudio de Andrade (2023) quien utilizó para los fines descritos concha de limón, determinando al igual que en otros estudios ya citados el efecto del pH, el tamaño de la partícula y también el período de contacto entre el bioadsorbente y el efluente, se llevó a cabo el estudio cinético y se elaboraron las isotermas de adsorción.

El porcentaje de remoción obtenido fue del 89,77% para las mejores condiciones de operación establecidas, con lo cual la investigadora concluyó que la cáscara de limón puede ser utilizada para eliminar cromo (VI) en aguas residuales a pH bajo, con un tamaño de partícula pequeño y una concentración mayor de bioadsorbente.

También con el propósito de eliminar cromo (VI) en agua Pérez *et al.* (2020) emplearon cáscaras de cacao, obteniendo porcentajes de remoción máximos del 24%, mientras que Ardila *et al.* (2022) evaluaron con el mismo propósito lirio acuático (*Eichhornia crassipes*), lo cual permite, además de eliminar el cromo, darle utilidad a una planta catalogada como plaga para diversos ecosistemas acuáticos a nivel mundial.

En el mismo contexto de la utilización de biofiltros para eliminar metales pesados, cromo (III) específicamente, se presenta la investigación de Buñay (2022) quien evaluó un sistema de filtración con polvo de *Vicia faba* para mitigar la contaminación por cromo (III) en los efluentes líquidos de la curtiembre El al-ce ubicada en el cantón Guano. El trabajo se inició con el diagnóstico de la industria y la realización de análisis a las aguas residuales producidas en la curtiembre, para establecer posteriormente las condiciones de filtración adecuadas para la adsorción de Cr (III) utilizando como adsorbente polvo de la vaina de haba y determinando el porcentaje de adsorción máximo del metal en medio acuoso.

La investigadora concluyó que se pueden alcanzar porcentajes máximo de adsorción de Cr (III) de 99%, en medios acuosos empleando como adsorbente polvo de vaina de habas. Se validó la experimentación utilizando análisis de varianza, verificando la reproducibilidad del mismo.

Otro trabajo para evaluar la adsorción de cromo III en aguas residuales utilizando biomasa de cáscara de maracuyá (*Passiflora edulis*) fue ejecutado por Campos (2019). Las variables que se evaluaron en la investigación fueron la concentración de Cr (III) y de bioadsorbente y el pH. El desarrollo del proyecto permite señalar que el proceso evaluado se puede representar utilizando los modelos de Langmuir y Freundlich y que es posible alcanzar porcentajes de remoción de cromo (III) de un 50% empleando biomasa de cáscara de maracuyá, la cual con

un tratamiento mínimo puede ser utilizada como adsorbente para tratar aguas residuales que contengan Cr (III).

Vargas (2022) en su investigación empleó kikuyo (*Pennisetum clandestinum* Hochst). La biomasa empleada se activó químicamente a través de hidrólisis ácida y básica con el propósito de mejorar su contenido de lignina, siendo posteriormente caracterizada utilizando Microscopía Electrónica de Barrido (SEM). Se empleó análisis de Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR) para la caracterización fisicoquímica y el área superficial se calculó mediante isoterma BET.

Vargas (2022) empleó un equipo de pruebas de jarras para evaluar como las dimensiones de la partícula, el pH de la solución y la dosis de bioadsorbente influyen la adsorción de Cr (III), la autora realizó el análisis estadístico utilizando el software *Stargraphics* centurión 18, lo que le permitió establecer una correlación matemática del proceso de adsorción con las variables consideradas en el estudio. Se sometieron al proceso de adsorción, muestras provenientes de la Industria Peletera ASAPES, obteniendo una capacidad de adsorción de 37,6 mg/g.

Otro estudio que evaluó la remoción de cromo III y plomo, utilizando carbón activo generado a partir de semillas de guayaba, fue desarrollado por Landy (2022), quien determinó los valores óptimos de pH, así como los tiempos de contacto y las concentraciones del bioadsorbente a emplear, para alcanzar la capacidad máxima de adsorción. El autor realizó también, los estudios cinéticos y estableció las isotermas de adsorción de cromo y plomo de acuerdo a los valores óptimos previamente establecidos y sometiendo las muestras de efluentes de la etapa de curtido a biofiltración para determinar el porcentaje de eliminación de los metales señalados, llegando a obtener valores de 89,87% y 81,89% para la remoción de plomo y cromo, respectivamente. Para ambos metales se determinó que los procesos pueden ser descritos mediante la isoterma de Freundlich.

Similar al estudio de Landy (2022) en cuanto a la metodología y variables empleadas, pero empleando como bioadsorbente semilla de *Jatropha curcas L.*, fue llevado a cabo por González (2017) con el propósito de presentar una alternativa de tratamiento sostenible para eliminar cromo (III) de efluentes industriales. El autor señala entre sus conclusiones que la cáscara de *Jatropha curcas L.*, muestra un elevado potencial como bioadsorbente para la remoción de iones de cromo (III), que la variable que presenta mayor influencia en la adsorción es el pH,

dado el efecto que tiene este, sobre la activación de los sitios de interacción del bioadsorbente, la segunda variable de importancia es el tamaño de la partícula.

Las variaciones en la temperatura, no evidenciaron mayor incidencia en la capacidad de adsorción de la *Jatropha curcas L.* Se obtuvo un porcentaje de remoción de 90% sin modificación previa del adsorbente, por lo que se considera una alternativa viable el uso de la especie señalada para remover cromo (III).

La remoción de metales pesados por biosorción, fue también investigado por Fernández (2019) enmarcado en el uso de subproductos y desperdicios de la industria agroalimentaria para disminuir la concentración de metales pesados contenidos en corrientes de residuos líquidos industriales. El propósito principal del proyecto fue utilizar el orujillo hidrolizado para separar los metales pesados presentes en efluentes industriales mediante bioadsorción. Se estudió la afinidad del bioadsorbente para la eliminación de cromo, manganeso, níquel, cobre, plomo y zinc. También se evaluó el uso de columnas en serie, la influencia del volumen de eliminación, la regeneración y uso de biosorbente, así como la influencia del escalamiento y los usos potenciales del biosorbente una vez agotado.

A juicio de Fernández (2019), con el estudio quedó demostrado que el orujillo permite remover metales pesados de residuos líquidos industriales de distintas características, verificando el escalamiento a escala piloto y comprobando la validez del material en los ciclos de generación con lo cual queda demostrado la viabilidad de emplear el método a escala industrial.

Orientado al tratamiento de residuos líquidos generados en industrias de curtiembre, se enfocó la investigación de Jacome *et al.* (2021) quienes perseguían eliminar los metales pesados y otros constituyentes como sulfatos, fosfatos, nitritos y nitratos, empleando microalgas. Para la remoción de cromo los géneros *Scenedesmus* y *Espirulina* mostraron una eficiencia por encima del 85%, lo que le permite concluir a los investigadores que este tipo de metodología es más eficiente y amigable con el ambiente que otro tipo de procesos, como por ejemplo los tratamientos fisicoquímicos.

Otra material que ha sido empleado como bioadsorbente son las hojas de totora (*Schoenoplectus californicus*), tal es el caso de Pacheco (2021) quien utilizó esta especie vegetal para la adsorción de plomo (II) de líquidos contaminados, los cuales fueron acondicionados para posteriormente valorar su capacidad de adsorción, la cual supero en todas

las pruebas el 50% de remoción, y lleva a concluir que las hojas de totora son una opción viable para la bioadsorción de iones de plomo (II) disueltos en aguas contaminadas.

Al igual que Pacheco (2021), las hojas de totora fueron utilizadas para remover el plomo contenido en aguas provenientes de la minería, en la investigación llevada a cabo por Bernabe (2020) quien señala que la especie totora puede ser utilizada para la remoción de plomo, pero no en concentraciones tales que permitan dar cumplimiento a los niveles establecidos en las normas ambientales que rigen la materia.

El uso de biomasa como bioadsorbente, requiere del acondicionamiento previo (activación) para mejorar la capacidad adsorbente del material, para evaluar diferentes opciones de activación desarrollo su proyecto Sánchez (2019). Se comparó el uso de KOH y NaOH para producir la activación, obteniendo mejores resultados al utilizar NaOH.

2.2. Fundamentación científica

Se muestra a continuación información relevante sobre las variables de interés para llevar a cabo la investigación.

2.2.1. Generación de efluentes industriales

El ser humano utiliza el agua para diversas actividades, y al utilizarla les incorpora contaminantes que pueden ser físicos, químicos y/o biológicos. En el sector industrial específicamente, el uso del agua tiene tal relevancia que muchas veces la ubicación de la industria, está condicionada por la disponibilidad del agua, bien para ser usada como materia prima, en los procesos de lavado, para el intercambio de calor y para el transporte de energía, entre otros usos (Fernández, 2019). Esas aguas son descargadas a las fuentes hídricas, en muchos casos, sin ser tratadas previamente, provocando el deterioro de las mismas, afectando los diferentes ecosistemas, todo ello pese a las restricciones legales que existen al respecto. Es necesario, por tanto, aplicar tratamientos con los que se puedan adecuar la calidad de los efluentes a los límites máximos establecidos en las normas, evitando así la polución de los cuerpos de agua receptores.

2.2.2. Proceso de curtiembre y generación de residuos

Las curtiembres, también llamadas tenerías, se dedican al procesamiento de pieles de animales vacunos, ovinos y caprinos, que son putrescibles añadiendo productos químicos

transformándolos en cuero para que puedan ser utilizados para la manufactura de bienes de consumo, a través de procedimientos en los que se adicionan elementos químicos como el cromo, bases, fenoles y cloratos. También se añaden muchas sales y un secuestrante de oxígeno disuelto del agua. Los procesos de curtiembre generan gran cantidad de contaminantes lo que representa riesgos para el medio ambiente y para la salud (Chipana, 2020; Urbina *et al.* 2021).

Las pieles una vez eliminadas los pelos, lanas y carnazas, son tratadas con distintas sustancias químicas, las cuales provocan modificaciones en las fibras de colágeno, lo que genera un cuero duradero y estable. El curtido de cuero se realiza utilizando principalmente dos metodologías: una utiliza agentes vegetales y la otra emplea sales de cromo (Ministerio de Salud y Protección Social, 2015). El proceso de curtido de cuero, está constituido por las siguientes etapas:

- a) Recibimiento de materia prima: dado que las pieles antes de ser acondicionadas presentan un elevado porcentaje de humedad, se lleva a cabo un examen visual para detectar desperfectos en la piel, que puedan generar productos finales defectuosos.
- b) Pre-tratamiento: en esta etapa se determina el peso de las pieles y se clasifican según la especie de procedencia y el tamaño, se cortan las partes correspondientes a extremidades, cola y cuello, las pieles son lavadas para rehidratarlas y eliminar restos de estiércol y sangre.
- c) Curado y desinfectado: el curado de las pieles, se realiza añadiendo sal y reduciendo el porcentaje de humedad. Usualmente se utiliza sal de dos formas: curado con salmuera o salazón húmeda, lavándolas posteriormente con agua para eliminar la materia orgánica, restos de estiércol, sangre y la tierra adherida a la piel. Para el curado con salmuera, las pieles se sumergen en recipientes donde se han añadido desinfectantes (bicloruro de mercurio y ácido férrico), bactericidas (ácido bórico y sulfato de sodio) y una solución de sal, aproximadamente por un período de 16 horas.
- d) Pelambre: una vez escurridas se elimina el pelaje y la capa que recubre la piel, para lo cual se sumergen en una solución de cal y sulfuro de sodio, agitando de manera constante.
- e) Desencalado: para retirar la cal y el sulfuro, la piel es lavada utilizando grandes volúmenes de agua, con el propósito de prevenir, en las etapas posteriores de curtido, posibles interferencias. Para llevar a cabo esta operación, se utilizan ácidos orgánicos (clorhídrico, sulfúrico, bórico y fórmico), peróxido de hidrogeno, bisulfito de sodio, sales de amonio, melazas y azúcares.

- f) Descarnado: involucra la separación de carnazas y grasas que aún permanezcan pegadas a la parte interna de la piel, utilizando máquinas especiales. Seguidamente las pieles son lavadas para eliminar cualquier residuo.
- g) Desengrasado: para eliminar la grasa de la piel, esta se sumerge en una solución con detergente, dejándola en reposo según el tiempo determinado para el tipo de piel. Para eliminar las proteínas y limpiar los poros de la misma, se emplea cloruro de amonio, lo que la hace homogénea y más elástica en la superficie.
- h) Piquelado: a través de este proceso se prepara químicamente la piel para luego ser sometida al proceso de curtido. Generalmente se utilizan para el piquelado, soluciones de ácido fórmico y ácido sulfúrico.
- i) Curtido: durante esta etapa se adicionan a la piel agentes curtientes minerales para estabilizar el colágeno, transformando la piel. Para realizar curtidos minerales se utilizan sales de cromo en diferentes concentraciones, previo a someter a la piel al proceso de curtido, esta se pone a escurrir para retirar la mayor cantidad de humedad. El curtido se lleva a cabo en una máquina conocida con el nombre de divididora, en medio ácido (ácido clorhídrico) para convertir gracias a la acción del cromo la piel en cuero.
- j) El cromo excedente, no absorbido por la piel es reusado. La preparación posterior al curtido permite darle al cuero un espesor homogéneo y específico, además se neutraliza, se recurte, tiñe y se engrasa.
- k) Secado: en esta etapa además de eliminarse el contenido de humedad del cuero se llevan a cabo reacciones químicas que forman parte del proceso de manufactura del mismo. En la etapa de secado la temperatura y el espesor del cuero son factores determinantes.
- l) Engrasado: el cuero se engrasa para suavizarlo, hacerlo más flexible, más fuerte y evitar el cuarteamiento, para ello se impregna con aceites emulsionados que se incorporan a las fibras del cuero, para darle el acabado deseado (Ministerio de Salud y Protección Social, 2015).

Los procesos de curtiembre utilizan grandes volúmenes de agua, se ha establecido que por cada kilogramo de piel salada se emplean entre 50 y 100 litros de agua, aproximadamente, las cuales tras el proceso de curtido pasan a considerarse efluentes líquidos industriales cuyas características varían según el tipo de curtiembre, sin embargo, en general estas aguas presentan altos contenidos de sólidos suspendidos, materia orgánica, compuestos oxidables, sustancias

químicas y productos tóxicos. Evidencian además una coloración oscura y olor desagradable (Esparza y Gamboa, 2001).

En Ecuador se manejan alrededor de 350 mil cueros al año, cuyo procesamiento conlleva elevados riesgos de contaminación ambiental, debido a la utilización de químicos tanto inorgánicos como orgánicos, muy tóxicos y difíciles de eliminar, entre ellos cromo trivalente y hexavalente, adicionalmente las medidas que se suelen implementar para disminuir el impacto de los metales pesados tales como el cromo, no son estrictas (Buñay, 2022). Dado el poco control que se aplica sobre las industrias ha provocado que muchas de ellas no implementen procesos de tratamiento eficaces para eliminar contaminantes, entre ellos el cromo.

2.2.3. El cromo

El cromo (Cr) es un metal, blanco plateado, resplandeciente, con alta resistencia a procesos corrosivos, duro y quebradizo. El Cr presenta varios estados de oxidación Cr II (+2), Cr III (+3) y Cr IV (+6), de estas especies las más estables son el cromo trivalente Cr III (+3) y el estado hexavalente o Cr VI (+6), esta última es la que presenta mayor importancia en el aspecto toxicológico (Andrade, 2013; Tejada *et al.*, 2014).

Las formas del cromo que presentan menor toxicidad es el cromo III y se encuentran de manera natural en el planeta (suelo, rocas, animales y plantas), mientras que el cromo (VI) es generado fundamentalmente durante actividades industriales. El cromo (III), adicionalmente, es un oligoelemento, que de manera natural se encuentra en el organismo, participa en múltiples procesos biológicos y es fundamental para el metabolismo del colesterol, la glucosa y ácidos grasos. El cromo (VI), bajo ciertas condiciones, puede transformarse a la forma más estable cromo (III) (Ministerio de Producción y Trabajo. Presidencia de la Nación, 2019).

Por otro lado, el Cr (III) en altas concentraciones y ambientes anóxicos se oxida a Cr (VI) llegando a ser tóxico, proceso que tiene serias implicaciones ambientales Ordoñez *et al.* (2019). El cromo (III) se emplea en las industrias de curtiembre, donde se producen residuos líquidos que requieren ser tratados previo a su descarga al ambiente.

2.2.4. Procesos específicos para la eliminación de cromo en efluentes líquidos

Con el propósito de remover metales pesados de soluciones acuosas, se han implementado diversas técnicas, las cuales generalmente resultan muy costosas, complejas, con elevados

requerimientos de operación y mantenimiento. Adicionalmente son generadoras de importantes cantidades de desechos que deben ser tratados previo a su disposición final (Meneses *et al.* 2019). Entre otras metodologías se pueden citar: coagulación química, fotodegradación, biodegradación, adsorción, ozonación, electrocoagulación y ósmosis inversa (Urbina *et al.* 2021). Según señala Landy (2022) se ha determinado que la adsorción es el proceso más eficaz para disminuir la concentración de cromo y otros metales pesados en soluciones acuosas, porque además que permite alcanzar elevadas eficiencias es económicamente accesible.

Durante los últimos años como alternativa sustentable se han desarrollado numerosas investigaciones, enfocadas en el empleo de bioadsorbentes a partir de biomásas residuales, la cual es además eficiente y económica. Estas biomásas están constituidas por compuestos químicos que presentan grupos funcionales óptimos para la adsorción de metales, su composición depende de la naturaleza del material, entre ellos se pueden citar: lignina, celulosa, y hemicelulosa (Tejeda *et al.*, 2014).

2.2.5. Procesos de adsorción

Se denomina adsorción a la operación mediante la cual “se extrae materia de una fase y se concentra sobre la superficie de otra fase (generalmente sólida). Por ello se considera como un fenómeno subsuperficial. La sustancia que se concentra en la superficie se llama adsorbato y la fase adsorbente se llama adsorbente” (Quiñones, *et al.*, 2014, p.28). La adsorción es un proceso complejo y está vinculado básicamente a la química de la superficie o la naturaleza del sorbente, el sorbato y las condiciones del sistema entre las dos fases (Patel, 2019).

La adsorción se emplea de manera frecuente para remover iones metálicos en diferentes residuos líquidos industriales, el proceso se lleva a cabo cuando un soluto líquido o gaseoso se deposita en la superficie de un líquido o sólidos (adsorbente), dando lugar a una película molecular o atómica (Vargas, 2022). El adsorbente convencional que más se emplea en la actividad es el carbón activado gracias a sus características altamente porosas y polimórficas, se utilizan también biopolímeros, arcillas, perlas de sílice, entre otros (Fernández, 2019).

a) Tipos de adsorción

En función de las características de las fuerzas con que se interrelacionan el adsorbente y el adsorbato, bien sea física o química, se pueden señalar tres tipos de adsorción:

- Adsorción física o fisisorción: debida a fuerzas de Van der Waals o de dipolos instantáneos. En este tipo de proceso, la molécula adsorbida no se encuentra sujeta a una zona específica de la superficie del adsorbente, sino que está en libertad de moverse dentro de la interfase. La adsorción física prevalece a bajas temperaturas (González, 2017).
- Adsorción química o quimisorción: se presenta cuando la interacción entre el adsorbato y el adsorbente es de naturaleza química. Las energías de adsorción que se producen químicamente son elevadas, de la magnitud de un enlace químico, dado que entre el adsorbato y el adsorbente se llevan a cabo enlaces localizados fuertes en los centros de actividad de este último. Este tipo de adsorción prevalece a altas temperaturas (González, 2017).
- Adsorción electrostática o por intercambio: se lleva a cabo cuando el adsorbato y los sitios activos del adsorbente tiene carácter iónico al igual, por lo que los iones de una sustancia se localizan en una zona del mismo producto de la atracción electrostática en los sitios cargados que presenta la superficie (González, 2017).

Generalmente los procesos de adsorción se dan como una combinación de los fenómenos previamente descritos. Dependiendo del tipo de interface, la adsorción puede ser líquido-líquido, líquido-gas y líquido-sólido, siendo esta última la empleada para el tratamiento de aguas (Patel, 2019).

b) Tipos de adsorbente

Existen diferentes tipos de adsorbentes, según señala Patel (2019) estos se clasifican en:

- Adsorbente sintético: son producidos en el laboratorio empleando diferentes métodos que permiten la obtención de productos porosos con una alta capacidad de adsorción. Los costoso de los procesos de fabricación, constituye la desventaja que presentan este tipo de productos.
- Adsorbente natural: hace referencia a las raíces y hojas de plantas, así como los desechos agrícolas, que son acondicionados (se secan, trituran, tamizan y se lavan) para luego ser empleados en el tratamiento de aguas tanto sintéticas como naturales. Son materiales más económicos que los sintéticos, pero tienen una menor capacidad de adsorción.

- Adsorbente semisintético: se producen cuando los adsorbentes naturales son sometidos a activación química y/o física, para incrementar el volumen de poros. Este tipo de adsorbentes presentan las siguientes ventajas: bajos costos de fabricación, elevada eficiencia, disminución de la producción de lodos biológicos o químicos, no requieren de la adición de nutrientes, ni la regeneración del adsorbente. Permiten además la posibilidad de recuperar los metales eliminados del agua.

c) Adsorción en columnas de adsorción de lecho fijo

Para eliminar contaminantes en aguas residuales tanto sintéticas como naturales, se considera que la columna de lecho fijo es la más recomendada. En estas columnas, el mecanismo de adsorción está basado en fenómenos como “la dispersión axial, la resistencia a la difusión de la película, la resistencia a la difusión intrapartícula (difusión tanto en los poros como en la superficie) y el equilibrio de sorción con el adsorbente” (Patel, 2019, p. 45).

El desarrollo y operación de las columnas de adsorción de lecho fijo dependen de parámetros como la capacidad del adsorbente, la vida útil de operación y el tiempo de regeneración. Los modelos matemáticos para el estudio de la adsorción en columnas de lecho fijo consideran dispersión axial, difusión intrapartícula, isothermas no lineales y transferencia de masa externa. Entre las correlaciones matemáticas que se han propuesto para evaluar el comportamiento de las columnas de lecho fijo se encuentran el modelo de Adams y Bohart, Yoon-Nelson, Clark, Wolborska, el tiempo de servicio de profundidad de cama de Thomas, y el modelo dosis-respuesta modificado, siendo el más utilizado el de Thomas (TM) (Patel, 2019).

d) Técnicas de evaluación de la capacidad adsorbente de un material

González (2017) señala que, en los sistemas en estado estacionario o *batch* se produce una adsorción estática, lo que involucra básicamente poner en contacto una cantidad específica de adsorbente con el adsorbato a diferentes concentraciones, agitando para favorecer la mezcla, con lo que se reportan porcentajes de remoción superiores al 50%. El autor destaca que, la relevancia de utilizar este tipo de pruebas experimentales radica en que estado estacionario, la adsorción se produce de manera completa, lo que permite establecer todo el potencial de

adsorción del adsorbente. Se pueden realizar estudios posteriores en estado no estacionarios (adsorción dinámica) para establecer los parámetros cinéticos que regulan el proceso de interacción adsorbato-adsorbente bajo estas condiciones. En general en condiciones dinámicas la capacidad del adsorbente presenta valores por debajo de los obtenidos en condiciones estacionarias.

2.2.6. Bioadsorción

En la actualidad las biomásas obtenidas como subproductos de las prácticas agrícolas están siendo ampliamente estudiadas, dado que muchos de ellos han sido utilizados para diseñar adsorbentes comerciales alcanzando elevadas eficiencias. La bioadsorción es un procedimiento que permite la captación pasiva o activa de iones metálicos, dado que, una gran variedad de biomásas vivas o muertas poseen propiedades que les permiten enlazar y acumular, contaminantes a través de diferentes mecanismos (Buñay, 2022). La utilización de subproductos vegetales, facilita la gestión de estos desechos y abarata los costos de los procesos de eliminación de metales. Quiñones *et al.* (2014) señalan que, los “bioadsorbentes más usados incluyen cortezas de árboles, residuos de madera, semillas y hojas de diferentes árboles, cáscaras de frutos, residuos de cereales, flores, y cítricos” (p. 1).

Para que el proceso de bioadsorción sea efectivo, es necesario que exista una gran afinidad entre el metal que se quiere remover y los grupos funcionales de la biomasa, ya que, para que se produzcan los mecanismos de enlace, el ion metálico debe ser atraído hacia el sólido (González, 2017).

La interacción entre iones metálicos y el bioadsorbente es complicado, dado que se estima intervienen en el proceso tres mecanismos: complejación, micro-precipitación e intercambio iónico, los cuales se producen debido a la presencia tanto en la superficie como en los poros del bioadsorbente grupos funcionales como el hidroxilo, carboxilo, tiol y amino, entre otros (Sánchez *et al.*, 2020).

Entre las variables que tienen influencia en el proceso de bioadsorción, se pueden citar:

- pH

El pH influye en la bioadsorción en dos aspectos: la especiación del adsorbato y la disponibilidad de los potenciales sitios de enlace en el adsorbente.

- Temperatura

El proceso de adsorción generalmente es exotérmico, por lo que el equilibrio de adsorción se verá favorecido a bajas temperaturas, de acuerdo a lo establecido en el principio de Le Chatelier.

- Concentración inicial del contaminante

La especiación del adsorbato es afectada por la concentración del adsorbato y, por consiguiente, en su disponibilidad para ser captado por el adsorbente.

- Cantidad de adsorbente

El área utilizable para la adsorción está directamente relacionada con la cantidad de adsorbente, así como, con el número de posibles grupos funcionales ubicados en la superficie disponibles para captar al adsorbato.

- Tamaño de partícula

Este parámetro varía de forma proporcional a la superficie que se dispone para la interacción adsorbente-adsorbato (Lagos, 2016).

La Tabla 1 muestra las capacidades máximas de adsorción que se han evaluado para diferentes bioadsorbentes.

Tabla 1. Capacidad máxima de adsorción (mg/g) para diferentes bioadsorbentes

Material	Zinc	Cobre	Manganeso	Níquel	Plomo	Cadmio	Cromo
ALGAS							
<i>Sargassum sp.</i>		94,1		79,7			
<i>Fucus vesiculosus</i>				70,1	516,3	143,2	
<i>Sargassum filipendula</i>			50,0				
RESIDUOS AGRÍCOLAS							

Material	Zinc	Cobre	Manganeso	Níquel	Plomo	Cadmio	Cromo
Alfalfa		20			43		
Fibras de yute	3,5	4,2		3,3			
Raíces de lechuga hidropónica	23,0	24,6	5,9				
Bagazo de caña de azúcar	0,8	0,8	0,5				
RESIDUOS FORESTALES							
Corteza de pino silvestre							8,7
Pino Silvestre					9,7	9,2	
Abeto	13,4	12,7				5,9	
Cedro Deodar						73,6	
Nogal				6,4	4,4	4,5	
Roble		3,6		3,3			1,7
CENIZAS							
Cenizas de cáscara de arroz			4,8				
Cenizas de <i>Jatropha curcas</i> <i>L. Seed</i>					263,1		
Cenizas de hoja de cedro	4,8				7,2		

Fuente: Adaptado de Fernández (2019)

Como se puede observar en la Tabla 1, son múltiples las opciones que se han evaluado para la eliminación de metales por bioadsorción. Obteniéndose las máximas capacidades de adsorción para algunos tipos de las algas y de cenizas. Es necesario destacar, lo señalado por González (2017), quien señala, que la capacidad de adsorción de las distintas especies, también se ve influenciada por la textura, la cual viene dada por lo joven o vieja que pueda ser la planta, la zona geográfica y el período estival, entre otras.

2.2.7. Características Totora (*Schoenoplectus californicus*)

La totora (*Schoenoplectus californicus*) es una especie de la familia *Cyperaceae*, la cual presenta un rizoma leñoso cubierto de escamas, es un considerado un macrófito emergente, vinculado a ecosistemas pantanosos. Crece a orillas de ríos, lagunas o lagos y su presencia se observa desde el sur de los Estados Unidos hasta Tierra del Fuego en la Patagonia Argentina (De Avila, 2021). La totora es una planta endémica de los humedales de la región del Altiplano en Suramérica (Blanco, 2019).

Schoenoplectus californicus es una especie herbácea perenne, que alcanza generalmente alturas de 4 m, llegando a 6 m en algunos casos. La totora es una subespecie de la espadaña gigante, crece en las costas de lagos y ríos, a profundidades de agua que oscilan entre 2,5 a 3 m, pero esto puede variar especialmente en zonas proclives a inundaciones estacionales. La capacidad de desarrollarse en hábitat extremos, le permite a la totora soportar altos niveles de rayos ultravioleta, variaciones de los niveles de agua, así como de temperatura (Blanco, 2019).

La totora ha sido utilizada por muchas culturas desde el pasado, para una vasta gama de aplicaciones, entre las que se pueden citar: la utilización como materia prima para la manufactura de artesanía, en la construcción tradicional de embarcaciones e incluso islas flotantes artificiales (Hidalgo, 2019)

Blanco (2019), señala que la totora puede soportar altas concentraciones de una mezcla de múltiples contaminantes y metales pesados, por lo que la califica como un multihiperacumulador, lo que unido a la alta producción de biomasa, las bajas ratas de descomposición, respaldan su uso para la eliminar metales pesados y otros contaminantes.

2.2.7.1. Morfología

La totora, posee epidermis muy delgada, lo que facilita el movimiento de agua, nutrientes y gases. Posee grandes zonas intercelulares que permiten la formación de una malla de conductos huecos donde se mueve y se acumula el oxígeno del aire, lo que facilita la transferencia de oxígeno desde el aire y órganos que participan en la fotosíntesis, hacia las raíces (Bernabe, 2020).

- a) Tamaño: puede alcanzar hasta 4 metros de altura, generalmente una parte de la planta se encuentra por encima de la superficie del agua y la otra sumergida.

- b) Tallo: se observa un tallo recto, elástico, sin rugosidades, liviano, nervudo, triangular, parecido al césped. No muestra tuberosidades en la base.
- c) Hojas: conforman una vaina que cubre al tallo en la parte inferior. Están fraccionadas en dos zonas: las de la zona baja exhiben vainas foliares sin láminas, las de la parte superior las desarrollan de forma ocasional (Pacheco, 2021).

La totora ha sido empleada para el tratamiento de residuos líquidos industriales, dada la capacidad que presentan estas plantas de adaptarse a diferentes situaciones, donde resalta la facultad que tiene de transportar oxígeno desde sus partes aéreas hasta la raíz, lo que propicia la supervivencia de microorganismos que contribuyen a diseminar los contaminantes, mejorando las características del agua gracias a la adsorción de nutrientes (P y N) y metales pesados (Pacheco, 2021).

2.2.8. Procesos de activación bioadsorbente

Previo a la utilización de la biomasa en los procesos de adsorción, es beneficioso mejorar sus características como adsorbente, lo que se traduce en incrementar el volumen de poros y con ello los sitios de adsorción. La activación puede ser física o química:

- a) Activación física: este tipo de activación, se lleva a cabo en dos fases:” la carbonización del precursor y la gasificación controlada del carbonizado. La carbonización es la transformación de la materia prima a carbón en la cual se eliminan el hidrógeno y el oxígeno del precursor, para dar lugar a un esqueleto carbonoso con una estructura porosa rudimentaria” (Sánchez, 2019, p. 6).

En la segunda etapa el material es sometido a una atmósfera oxidante, con temperaturas que oscilan entre 800 °C y 1000°C, lo que provoca la eliminación de compuestos volátiles, e incrementa el volumen de los poros, generando en la superficie del carbón millones de poros microscópicos (Landy, 2022). Este proceso generalmente se produce en hornos rotatorios construidos con materiales resistentes a las altas temperaturas (acero inoxidable y materiales refractarios usualmente) (Sánchez, 2019).

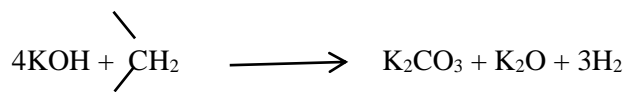
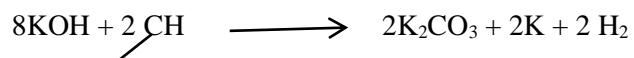
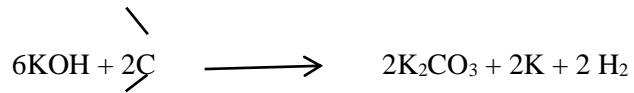
- b) Activación química: se debe impregnar al precursor empleando un agente hidratante entre los que se pueden mencionar el cloruro de zinc, ácido fosfórico e hidróxido de potasio. Seguidamente se realiza el tratamiento térmico y luego de debe eliminar el

reactivo químico, haciendo repetidos lavados dejando el material con una gran porosidad, listo para su uso (Sánchez, 2019;Alcañiz *et al.*, 2022).

La activación química puede realizarse aplicando diversas vías, Vargas (2022) señala que entre otras se incluyen:

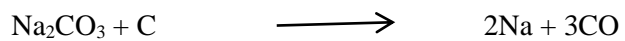
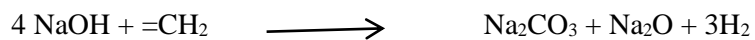
- Hidrólisis ácida: generalmente se realiza por calentamiento de una solución ácida diluida, donde los ácidos transforman las cadenas de polisacáridos que constituyen la biomasa (hemicelulosa) en sus monómeros básicos, emergiendo sus grupos funcionales. Para llevar a cabo la hidrólisis ácida, generalmente se utilizan ácidos fuertes como el sulfúrico, clorhídrico, perclórico o débiles como el acético y fórmico.
- Hidrólisis básica: consiste en el rompimiento de los enlaces tipo éster entre la celulosa, la lignina y la hemicelulosa, aumentando la porosidad y el área superficial de la biomasa. Se utilizan para la hidrólisis básica bases fuertes como el KOH y el NaOH., este último es preferido debido a que su costo es más bajo que el del KOH. Los mecanismos de activación con KOH, se acuerdo a lo expresado por Sánchez (2019) es el producto de cinco (5) aspectos determinantes, que se llevan a cabo de manera consecutiva:
 - i) El hidróxido se reduce a metal libre.
 - ii) Se produce el enlace entre el metal libre y las capas del carbón mediante un proceso de intercalación.
 - iii) Se da un proceso de expansión producido por la intercalación del átomo libre en las capas del carbón.
 - iv) El calentamiento progresivo, provoca la eliminación del átomo de las capas del carbón producto del proceso de exfoliación, formando poros. Este proceso se ve influenciado en gran medida por la temperatura aplicada y por la concentración de KOH en la impregnación.
 - v) Se produce la activación física debido a la oxidación parcial generada principalmente por el átomo de oxígeno proveniente del KOH. La porosidad que se produce en este paso es generalmente despreciable.

Se han presentado diversas reacciones para explicar el proceso de activación utilizando KOH, Monteiro (2013) indica que las más utilizadas son las que se muestran a continuación:



En estas reacciones el KOH reacciona con el precursor carbonoso para producir K_2CO_3 , K_2O y potasio metálico, que se eliminan en la etapa posterior de lavado, mostrando la porosidad del carbón activado (Monteiro, 2013).

En cuanto a las reacciones que se producen durante la activación con NaOH, Sánchez (2019), reporta las siguientes:



CAPITULO III

MARCO METODOLÓGICO

3.1. Enfoque y tipo de investigación

El trabajo de investigación se enmarca en un enfoque cuantitativo de tipo experimental, según Hernández-Sampieri *et al.* (2014) la investigación experimental es aquella que “requiere la manipulación intencional de una acción para analizar sus posibles resultados” (p. 129). En este sentido, este tipo de investigación se adapta al estudio actual, considerando que evalúa la capacidad de la fibra natural (totora) como biosorbente del contaminante cromo (Cr III) determinando las diferentes propiedades fisicoquímicas, capacidad de biosorción y capacidad de remoción, en función de las independientes las que van hacer manipuladas como tamaño de partículas de totora y diferentes concentraciones de solución de Cr (III).

3.2. Población y muestra

Según Arias (2012) la población se conforma de la totalidad del universo de estudio, mientras que la muestra la conforma por una porción representativa de la población. en este contexto, la población en este estudio se integra por los efluentes líquidos que contienen cromo (III) generados en las curtiembres ubicadas en el sector Quisapincha del cantón Ambato. La muestra, por su parte, la constituyen las alícuotas de aguas residuales que se utilizan para realizar la experimentación.

3.3. Hipótesis

H₁: El incremento en la concentración de cromo disminuye el porcentaje de remoción de cromo. Al disminuir el tamaño de partícula se logra una mayor capacidad de adsorción de cromo (III).

3.4. Pregunta científica

¿Es posible absorber contaminantes de cromo (III) presenten en residuos acuosos de curtimbres a partir de un biofiltro a base de fibras?

3.5. Recolección de información

Todo proceso de investigación requiere emplear técnicas para la obtención de los datos, dichas técnicas se caracterizan por la forma cómo el investigador accede a la información requerida y depende, en grado sumo, al enfoque y tipo de investigación empleado (Hueso y Cascant, 2012). En efecto, debido a que el trabajo de titulación es de tipo experimental, para la recogida de datos primarios se llevarán a cabo ensayos experimentales, observación directa de los resultados de los ensayos físico-químicos ejecutados en el laboratorio. En lo relativo a los datos secundarios, se recolectarán de revisiones bibliográficas en libros, artículos y revistas científicas.

3.6. Procesamiento de la información y análisis estadístico

Los datos generados durante la experimentación, fueron almacenados, analizados y procesados utilizando Microsoft Excel.

3.7. Elementos de la investigación

3.7.1. Equipos y Materiales

- Estufa (Rango: 30-300 °C; Ap.± 1 °C)
- Balanza analítica (Rango: 0-200 g; Ap.± 0.01 g)
- Vasos de precipitación (Rango: 0-250 ml; Ap.± 25 ml)
- ph-metro Mettler toledo (Rango: 0-14 (H+); Ap.± 0.1 H+)
- Espectrómetro Uv-visible
- Espectrofotómetro Infrarrojo
- Balón aforado (Capacidad 100 ml)
- Balón aforado (Capacidad 250 ml)
- Balón aforado (Capacidad 10 ml)
- Balón aforado (Capacidad 25 ml)
- Embudo
- Varilla de agitación
- Papel de aluminio
- Papel filtro
- Guantes de nitrilo
- Columna

- Pinzas
- Soporte metálico
- Tijera
- Triturador
- Torre de tamizaje (medidas de 350 μm , 425 μm , 850 μm , base)

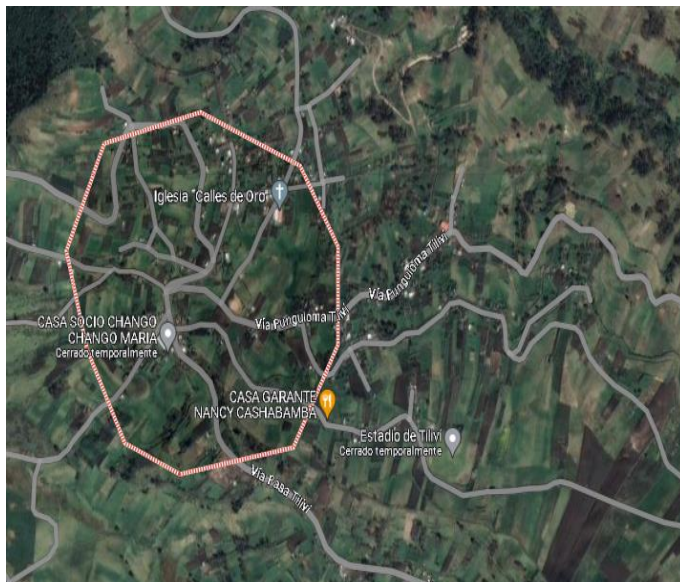
3.7.2. Insumos

- Hidróxido de potasio KOH (s)
- Agua destilada
- Sulfato de cromo grado reactivo
- Sulfato de cromo grado industrial

3.7.3. Obtención de la materia prima

Las hojas de totora fueron recolectadas en comunidad de Tiliví, parroquia Pasa donde se desarrollan en las faldas de las montañas y son comercializadas por los campesinos de la comunidad (ver Figura 1).

Figura 1. Ubicación sitio de recolección hojas de totora



Fuente: *google maps*

3.7.4. Obtención de la muestra de agua residual

La muestra de efluentes líquidos fue colectada en la Curtiembre Quisapincha, del Sector Quisapincha, cantón Ambato.

3.7.5. Preparación del bioadsorbente

Una vez colectada la muestra se procedió a lavarla, pelarla y extraer la parte fibrosa, seguidamente se realizó a la activación química para mejorar el área superficial de contacto de la fibra de totora, según se describe:

- 1) Preparar una solución 1% de hidróxido de potasio (KOH).
- 2) Sumergir a la solución la muestra molida y agitar durante 30 minutos.
- 3) Retirar la muestra de la solución (filtrar o decantar).
- 4) Realizar mínimo tres lavados con agua destilada la muestra.
- 5) Secar la muestra a una temperatura de entre 40 °C a 60 °C según la naturaleza de la muestra, hasta obtener un peso constante.

Los tamaños de las muestras están determinados por los tamices disponibles en el laboratorio.

3.7.6. Medición de la concentración del adsorbato mediante Uv-visible

Para la calcular la concentración del adsorbato a la salida de los procesos, se empleó la técnica de medición por espectrofotometría UV-visible, basada en el proceso de absorción de la radiación ultravioleta-visible.

- 1) Preparar al menos cinco soluciones a concentraciones conocidas de sulfato de cromo (0,5; 0,7; 1,0; 1,2 y 1,5 mg/ml) a partir de la solución concentrada.
- 2) En el espectrofotómetro de UV-visible, hacer un barrido utilizando un blanco (agua destilada) y posteriormente una solución de concentración media, para establecer la longitud de onda que se ajuste a la muestra.
- 3) El equipo muestra una gráfica con varios picos, elegir la longitud de onda donde se encuentre el valor máximo.
- 4) Para obtener la curva de calibración se determina el espectro de absorción ajustando la longitud de onda y tras realizar el blanco, se realizan las mediciones con las muestras de concentración conocida, en orden creciente de concentración.

- 5) En Excel con la data previamente determinada, elaborar la curva de calibración absorbancia vs concentración, determinar la línea de tendencia y su respectiva ecuación.
- 6) Iniciar una nueva toma de muestras para obtener datos de absorbancia respectivos a cada muestra de final de proceso.
- 7) Con los datos de absorbancia interpolar en la gráfica de calibración para obtener valores de concentración correspondientes.

3.7.7. Pretratamiento del agua residual

- 1) Añadir a las aguas residuales de curtiembre, hidróxido de calcio (cal industrial K_4O) para reducir la concentración de cromo (VI) a cromo (III).
- 2) Filtrar al vacío el agua residual con el fin de eliminar la mayor cantidad de partículas suspendidas.

3.7.8. Caracterización morfológica totora

La caracterización morfológica en la muestra de fibra de totora, tanto en estado natural como hidrolizada, se lleva a cabo empleando un microscopio óptico, siguiendo los siguientes pasos:

- 1) Triturar la fibra natural y tamizar a según los tamaños previamente establecidos.
- 2) Colocar las muestras en un porta muestras.
- 3) Encender el microscopio óptico y colocar la muestra en su fuente luminosa.
- 4) Enfocar la muestra de tal manera que se pueda visualizar las medidas de sus longitudes

3.7.9. Caracterización mediante espectrofotometría infrarroja

Para la caracterización de la fibra de totora mediante espectrofotometría infrarroja, se sigue el siguiente procedimiento:

- 1) Triturar la fibra natural y tamizar a diferentes tamaños.
- 2) Seleccionar la muestra más pulverizada y llevar al detector del equipo.
- 3) Realizar un barrido espectral en un rango de longitud de onda entre 500 cm^{-1} a 4000 cm^{-1} .
- 4) Determinar la longitud de onda (cm^{-1}) y transmitancia (%) para cada pico espectral e identificar cada uno de ellos.

3.7.10. Medición del rendimiento del adsorbato, mediante Uv-visible

- 1) Preparar soluciones de igual concentración tanto para la muestra como para la solución estándar.
- 2) Hacer el montaje de la columna y colocar la totora hidrolizada, dejar caer cada solución a analizar.
- 3) Colocar las soluciones en un vaso de precipitación, posterior a ello homogenizar la celda de cuarzo del equipo Uv-visible con cada solución antes de cada lectura.
- 4) En el equipo de espectrofotometría UV-visible realizar lecturas por triplicado para cada muestra usando un blanco (agua destilada) y posterior una solución estándar de concentración conocida.
- 5) Determinar la absorbancia de cada muestra y calcular el porcentaje de adsorción, mediante la ecuación 1:

$$\% \text{ Adsorción} = \left(\frac{Absm}{Absst} \right) * 100 * F \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde:

Absm: Absorbancia emitida por la muestra (%)

Absst: Absorbancia emitida por el estándar de referencia (%)

F: Factor de corrección (Concentración relativa/concentración real)

- 6) Calcular el rendimiento restando el porcentaje de adsorción para el 100% .

$$\text{Rendimiento} = 100\% - \% \text{ adsorción} \quad (\text{Ec. 2})$$

- 7) Realizar una gráfica de regresión lineal e indagar si existen cifras significativas o una variación entre la muestra y la solución estándar.

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se muestran a continuación, los resultados que se obtuvieron durante la fase experimental de esta investigación. Todos los análisis se ejecutaron en los laboratorios de la Universidad Politécnica de Chimborazo.

Las muestras de totora como ya se mencionó, fueron colectadas en la comunidad de Tiliví, parroquia Pasa, posteriormente fueron lavadas y peladas para extraer la parte fibrosa. Por su parte las aguas residuales contaminadas con cromo se obtuvieron en la Curtiembre Quisapincha del Sector Quisapincha (Ver Figura 2), se tomó una muestra discreta que se corresponde con un muestreo aleatorio simple.

Figura 2. *Ubicación Curtiembre Quisapincha, sector Quisapincha, Ambato.*



Fuente: *Google maps*

La muestra de agua se tomó específicamente en el tanque final de pretratamiento previo a la descarga a la tanquilla (ver Figura 3), empleando un envase plástico previamente esterilizado el cual fue debidamente refrigerado para su preservación.

Figura 3. *Recolección de agua residual después del pretratamiento en la Curtiembre Quisapincha sector Quisapincha*



Fuente: elaboración propia

Dado que no se contaba con el equipamiento requerido para la realización de análisis, no fue posible caracterizar las referidas aguas.

4.1. Identificación botánica y caracterización fibra natural de totora (*Schoenoplectus californicus*)

a) Identificación

La identificación botánica, se realizó por comparación de las características de las muestras de la planta, detectables por inspección visual y las características de la totora (*Schoenoplectus californicus*) descritas en la bibliografía (Blanco, 2019; Bernabe, 2020; Pacheco, 2021). En general se observó:

- Planta Herbácea
- Tallo: tallo erecto, flexible, liso, liviano
- Hojas: erectas, largas, planas y alargadas
- Altura: entre uno y tres metros

Se muestra en la tabla 2, la taxonomía de la totora (*Schoenoplectus californicus*).

Tabla 2. Taxonomía Totora (*Schoenoplectus californicus*)

Reino	<i>Plantae</i>
Filo	<i>Magnoliophyta</i>
Clase	<i>Liliopsida</i>
Orden	<i>Cyperales</i>
Familia	<i>Cyperaceae</i>
Género	<i>Schoenoplectus</i>
Especie	<i>S. californicus</i>
Autor	(C.A. Mey.) Soják

Fuente. Tomado de Universidad Nacional de Colombia (Universidad Nacional de Colombia, s.f.)

En la figura 4, se puede observar una muestra de la totora (*Schoenoplectus californicus*) utilizada en la fase experimental de esta investigación.

Figura 4. Imagen totora (*Schoenoplectus californicus*)



Fuente: elaboración propia

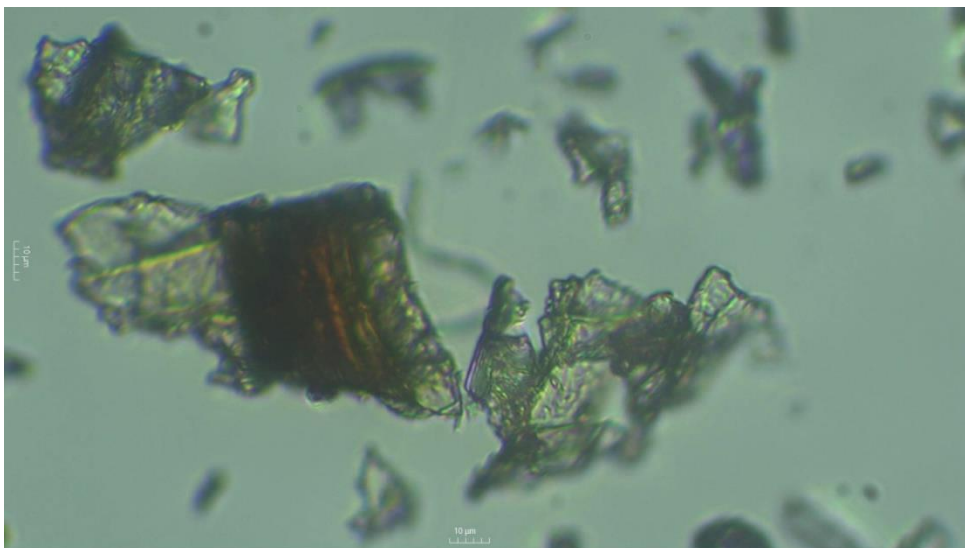
A simple vista, es posible observar el tallo erecto que caracteriza a la totora (*Schoenoplectus californicus*).

b) Caracterización

Para la caracterización de las fibras naturales de totora, las hojas previamente fueron trituradas y tamizadas para disponer de muestras de diferentes tamaños (300 μm , 420 μm y 850 μm), para evaluar la influencia del tamaño del adsorbente en el proceso de adsorción de Cromo. Las muestras se empaquetaron y etiquetaron debidamente para su posterior uso. Como ya se mencionó, se emplearon estos tamaños de partícula, por ser las mallas disponibles en el laboratorio. En el anexo 1, se muestran imágenes del proceso de trituración y tamizaje. Este procedimiento de acondicionamiento de las hojas de totora es similar al utilizado en otros estudios de bioadsorción de iones metálicos (Andrade, 2023; Puente, 2019).

La morfología de las muestras de totora, se efectuó por microscopía óptica, técnica que permite observar las unidades básicas de las muestras mediante la interacción con un haz de luz, aun habiendo sido sometidas a procesos mecánicos para reducir el tamaño. Estas determinaciones tienen como propósito caracterizar de manera cualitativa las muestras de la fibra natural de totora y compararlas con las estructuras una vez llevada a cabo la activación de las mismas. En la figura 5, se puede observar una muestra de totora natural de 300 μm

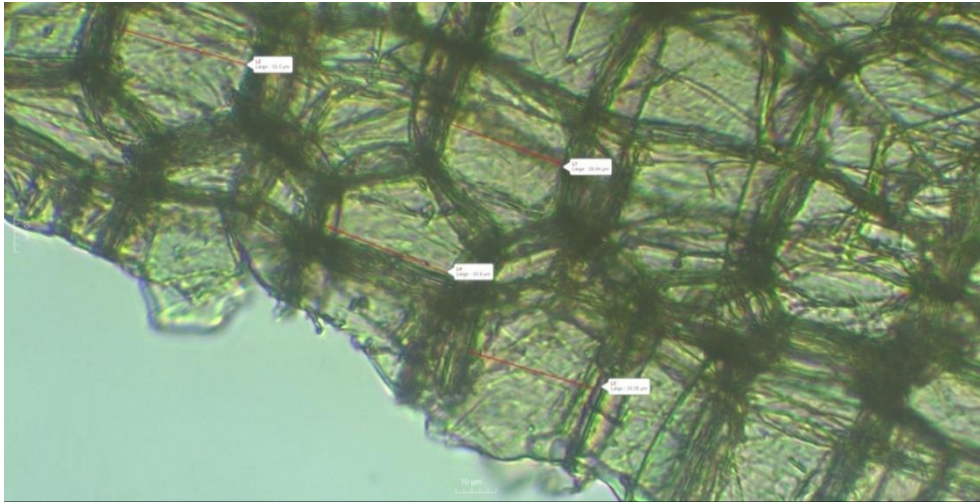
Figura 5. Caracterización morfológica de fibra natural totora (*Schoenoplectus californicus*) con tamaño de muestra 300 μm usando microscopio óptico



Fuente: Elaboración propia

La figura 6 exhibe la imagen de microscopio correspondiente a la fibra natural de totora de 425 μm . Las imágenes proyectaron similitud de celdas en relación con la muestra con tamaños distancias de L1 33,05; L2: 33,3 μm ; L3:33,05 μm y L4: 33,08 μm

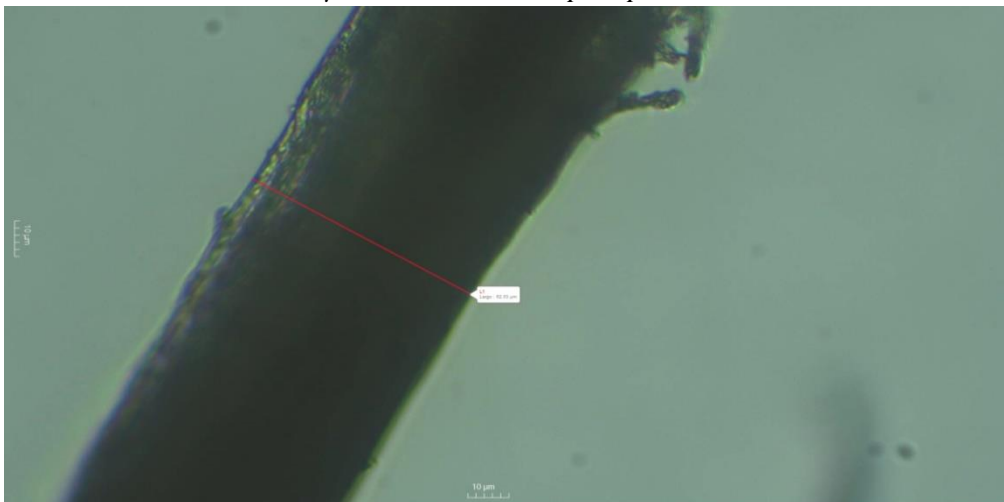
Figura 6. *Caracterización morfológica de fibra natural totora (Schoenoplectus californicus) con tamaño de muestra 425 μm usando microscopio óptico*



Fuente: Elaboración propia

La figura 7, muestra la morfología obtenida empleando microscopio óptico para la muestra de totora natural de 850 μm .

Figura 7. *Caracterización morfológica de fibra natural totora (Schoenoplectus californicus) con tamaño de muestra 850 μm usando microscopio óptico*



Fuente: Elaboración propia

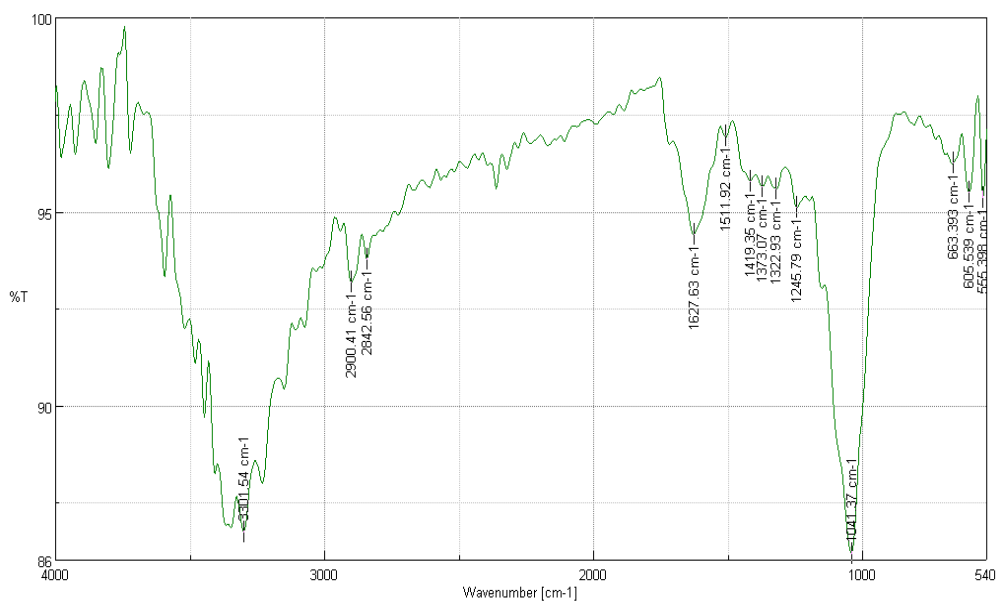
Las imágenes proyectaron evidencia de fibras naturales en relación con la muestra con distancias de 62,63 μm .

Las observaciones con el microscopio óptico, evidencian en la muestra de totora, la presencia de zanjas indicativas de los sitios disponibles para que se lleve a cabo la adsorción de los iones metálicos. También se observa el contorno irregular, propio de las fibras vegetales (Salinas, 2014) .

4.2. Caracterización fibra natural de totora por espectrofotometría infrarroja

Los grupos funcionales de la totora fueron determinados utilizando un espectrofotómetro de infrarrojo (ver Anexo 2). En la Figura 8, se presenta el barrido infrarrojo para la muestra de totora natural de 300 μm , donde en el eje de las abscisas está representada la longitud de onda y en las ordenadas el porcentaje de transmitancia correspondiente. Los picos espectrales en la curva indican los grupos funcionales contenidos en la muestra. El análisis no pudo ser realizado para las muestras de 425 μm y 850 μm , porque el espectrofotómetro no realiza lecturas para muestras de gran tamaño.

Figura 8. Barrido Infrarrojo de 540 cm^{-1} a 4000 cm^{-1} en fibra de totora natural (*Schoenoplectus californicus*) con tamaño de muestra 300 μm , detección e identificación de grupos funcionales.



Fuente: Elaboración propia

La determinación permitió reconocer los principales grupos funcionales (picos en el espectro) presentes en la muestra natural de totora sin hidrolizar, basados en el hecho de que cada grupo funcional absorbe una cantidad específica de radiación, sin que haya dependencia con la molécula a la cual este unido y que estos valores están debidamente documentados en la bibliografía relacionada con el tema (Mondragón, 2020) . Para la muestra de totora analizada, se evidencia grupos O-H a 3301.54 cm^{-1} ; C-H a 2900.41 cm^{-1} y 2842.56 cm^{-1} ; C=O 1627.63 cm^{-1} ; C-C a 1041.37 cm^{-1} En la tabla 3, se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 3. Identificación de grupos funcionales por espectrofotometría infrarroja presentes en la muestra de totora (*Schoenoplectus californicus*) natural $300\ \mu\text{m}$

Longitud de Onda (cm^{-1})	Transmitancia (%)	Rango	Grupo Funcional
3301,54	86,7372	Entre 3500 y 3200 cm^{-1} el enlace O-H, presente en el agua, produce una banda muy amplia y alta	O-H
2900,41	93,1762	Las bandas vinculadas al enlace de estiramiento C-H, se muestran entre 3000 y 2800 cm^{-1}	C-H
2842,56	93,777		
1627,63	94,3982	El enlace C=O produce una banda intensa que aparece, entre 1830 y 1650 cm^{-1} , dependiendo del compuesto	C=O

Longitud de Onda (cm ⁻¹)	Transmitancia (%)	Rango	Grupo Funcional
1041.37	86,1763	Entre 1500 y 600 cm ⁻¹ , dependiendo del compuesto, se presenta una banda intensa asociada con el enlace C-C	C-C

Fuente: Elaboración propia

Los grupos encontrados son propios de la biomasa lignocelulósica, según señalan (Tejada *et al.*, 2014). Resultados similares son reportados por Pacheco (2021) y Lagos (2016), quienes señalan que el pico intenso que se presenta entre 3340 y 3600 cm⁻¹, evidencia el estiramiento del grupo hidroxilo (O-H) vinculado a vibraciones de los enlaces de celulosa, hemilcelulosa, agua, pectina, agua absorbida y lignina. Los picos que se producen en números de onda cercanos a 1748,15 cm⁻¹ se deben al estiramiento del carbonilo C=O lo que señala la vibración del grupo carboxilo de la pectina, hemicelulosa y lignina. El pico próximo a 1444,43 cm⁻¹ es debido a la presencia de enlaces carbono-hidrógeno, tanto de cadena abierta como de cadena cerrada, grupos en el plano de deformación, vibraciones de enlaces metilo, metileno y grupo metoxi. La presencia de grupos funcionales con oxígeno, favorece la adsorción de metales pesados (Pacheco, 2021).

4.3. Activación de la totora (*Schoenoplectus californicus*)

Para incrementar la capacidad de adsorción de la totora (aumentando su porosidad), las muestras previamente acondicionadas, fueron sometidas a una hidrólisis ácida utilizando una solución de KOH al 1%. El proceso de activación aplicado, se corresponde con el utilizado por Sánchez (2019).

En la Figura 9, se pueden observar las imágenes de las muestras de totora de diferentes tamaños hidrolizadas. En el Anexo 3, se muestra la fase de aplicación de KOH a la totora, en el Anexo 4 el proceso de secado de la fibra y en el Anexo 5 se muestra la totora hidrolizada y seca.

Figura 9. Muestras fibra totora (*Schoenoplectus californicus*) hidrolizadas con KOH



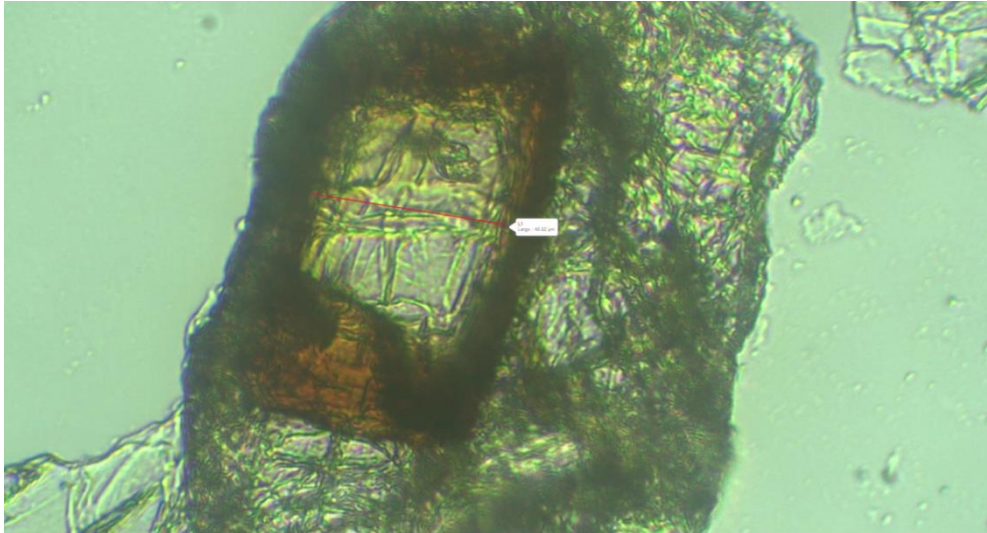
Fuente: Elaboración propia

El proceso de activación con KOH, permite obtener una mayor porosidad en la fibra, al ser comparado con los procesos físicos (Andrade D. , 2016).

4.4. Caracterización muestras hidrolizadas de totora (*Schoenoplectus californicus*)

Una vez realizada la hidrolisis se procedió a caracterizar las diferentes muestras utilizando el microscopio óptico a objeto de compararlas, como ya se mencionó con las fibras naturales, y verificar el efecto de la activación química. Las evidencias obtenidas llevan a concluir que se trata de una fibra natural cuya estructura fue modificada incrementando su capacidad porosa lo que lleva a considerarla adecuada para ser utilizada como adsorbente. La Figura 10, muestra la imagen correspondiente a la muestra de 300 μm .

Figura 10. Caracterización morfológica de fibra de totora (*Schoenoplectus californicus*) hidrolizada con tamaño de muestra 300 μm

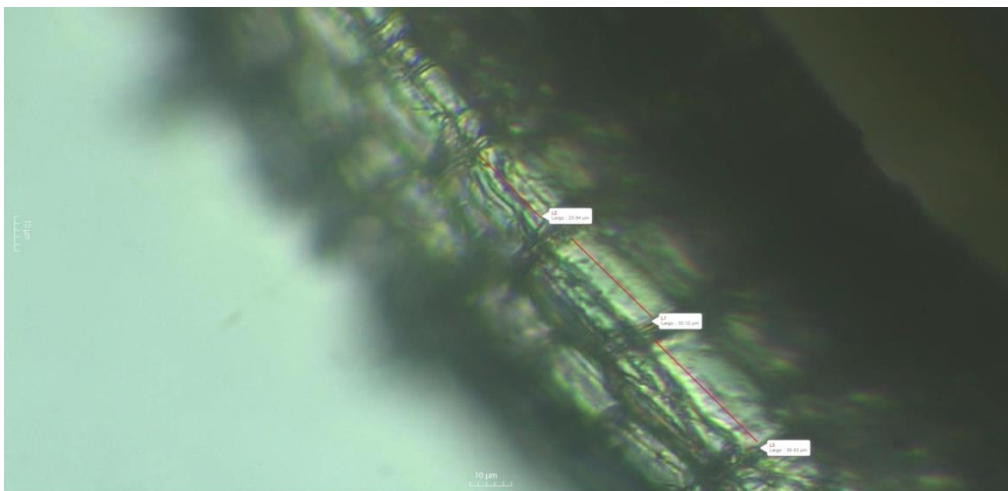


Fuente: elaboración propia

La figura 10 proyecta la muestra triturada y previamente hidrolizada con KOH a una concentración del 1 % p/v. demostrando un cambio de coloración por la acción de la hidrólisis con una distancia de L1: 42.81 μm .

La imagen correspondiente a la muestra de 425 de totora hidrolizada, se exhibe en la figura 11.

Figura 11. Caracterización morfológica de fibra de totora (*Schoenoplectus californicus*) hidrolizada con tamaño de muestra 425 μm

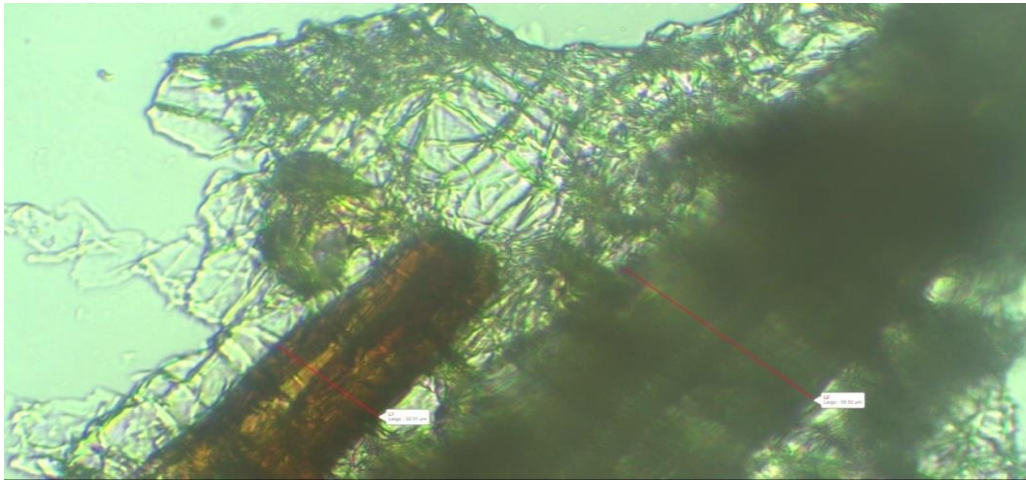


Fuente: elaboración propia

Para la fibra de totora hidrolizada de 425 μm , se evidencian las estructuras para las distancias L: 30,12 μm , L2: 23,94 μm y L3: 38,43 μm .

En la figura 12, se exponen los resultados de la morfología obtenida empleando microscopio óptico para la muestra de totora hidrolizada de 850 μm .

Figura 12. Caracterización morfológica de fibra de totora (*Schoenoplectus californicus*) hidrolizada con tamaño de muestra 850 μm



Fuente: elaboración propia

Se puede verificar la conservación de la fibra natural después del proceso de hidrolizado con distancias de L1: 32.51 μm ; L2: 59.52 μm .

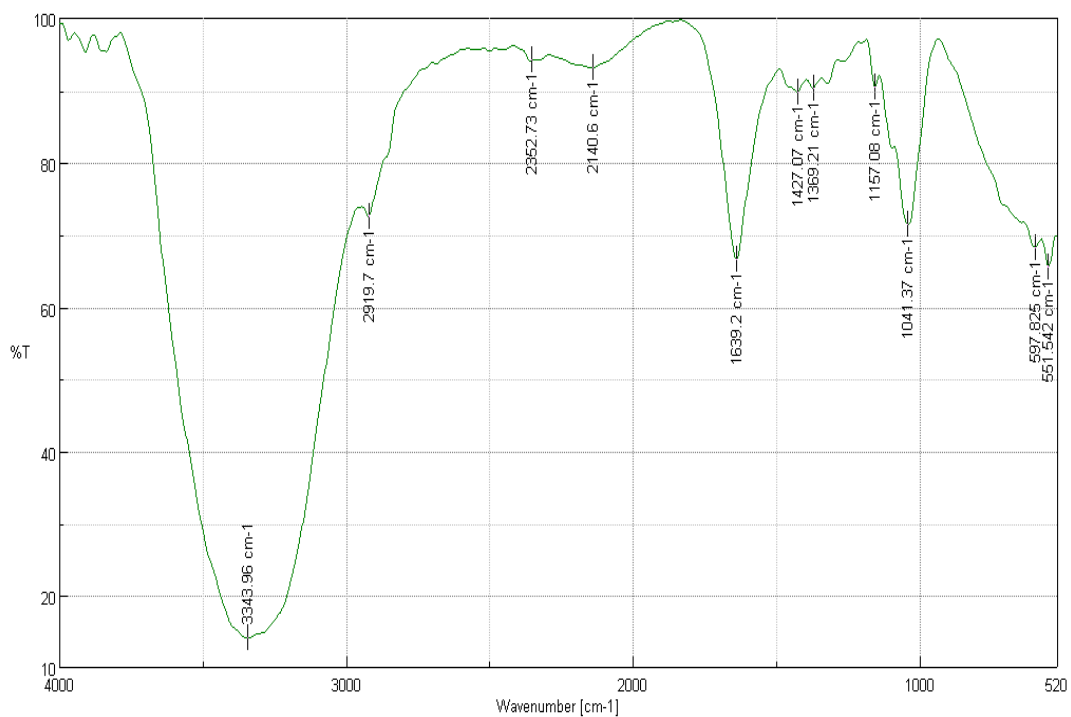
En las muestras una vez hidrolizadas, se puede observar una mayor porosidad, lo cual incrementa a su vez, la capacidad de adsorción de la fibra de totora (*Schoenoplectus californicus*)

4.5. Caracterización fibra hidrolizada de totora por espectrofotometría infrarroja

Los grupos funcionales como ya se mencionó fueron determinados utilizando un espectrofotómetro de infrarrojo. En la Figura 13, se puede observar el barrido infrarrojo para

la muestra de totora hidrolizada de 300 μm , donde en el eje de las abscisas está representada la longitud de onda y en las ordenadas el porcentaje de transmitancia correspondiente. Los picos espectrales en la curva indican los grupos funcionales contenidos en la muestra. El análisis no pudo ser realizado para las muestras de 425 μm y 850 μm , porque el espectrofotómetro no realiza lecturas para muestras de gran tamaño.

Figura 13. Barrido Infrarrojo de 520 cm^{-1} a 4000 cm^{-1} , en fibra de totora hidrolizada con KOH con tamaño de muestra 300 μm , detección e identificación de grupos funcionales.



Fuente: elaboración propia

Con la medición, se pudieron identificar los principales grupos funcionales presentes en la muestra de totora hidrolizada con KOH, la cual evidencias grupos O-H a 3343.96 cm^{-1} ; C-H a 2919.7 cm^{-1} ; C=O 1639.2 cm^{-1} ; C-C a 1041.37 cm^{-1} . Ver resultados en la tabla 4.

Tabla 4. Identificación de grupos funcionales contenidos en la muestra de totora (*Schoenoplectus californicus*) hidrolizada

Longitud de Onda (cm ⁻¹)	Transmitancia (%)	Rango	Grupo Funcional
3343,96	14,0619	Entre 3500 y 3200 cm ⁻¹ el enlace O-H, del agua, proporciona una banda muy amplia y alta	O-H
2919,7	72,5571	Entre 3000 y 2800 cm ⁻¹ se observan bandas vinculadas al enlace de estiramiento del enlace C-H.	C-H
1639,2	66,5776	Dependiendo del compuesto que se estudie, 1830 y 1650 cm ⁻¹ aparece una banda intensa asociada con el enlace C=O	C=O
1041,37	71,4498	Entre 1500 y 600 cm ⁻¹ , dependiendo del compuesto, se presenta una banda intensa asociada con el enlace C-C	C-C

Fuente: elaboración propia

Al analizar los resultados para la totora antes y después de la activación, se observa la presencia de los mismos grupos funcionales (O-H, C-H, C=O, C-C), pero para la fibra natural los valores de transmitancia que se obtienen son menores, indicativo de las modificaciones llevadas a cabo en la estructura de la totora debido a la hidrólisis, lo que genera un incremento del volumen de los poros en la superficie, producto de la estratificación en la corteza de la fibra lo cual se corresponde con lo reportado por Sánchez (2019).

4.6. Pretratamiento agua residual

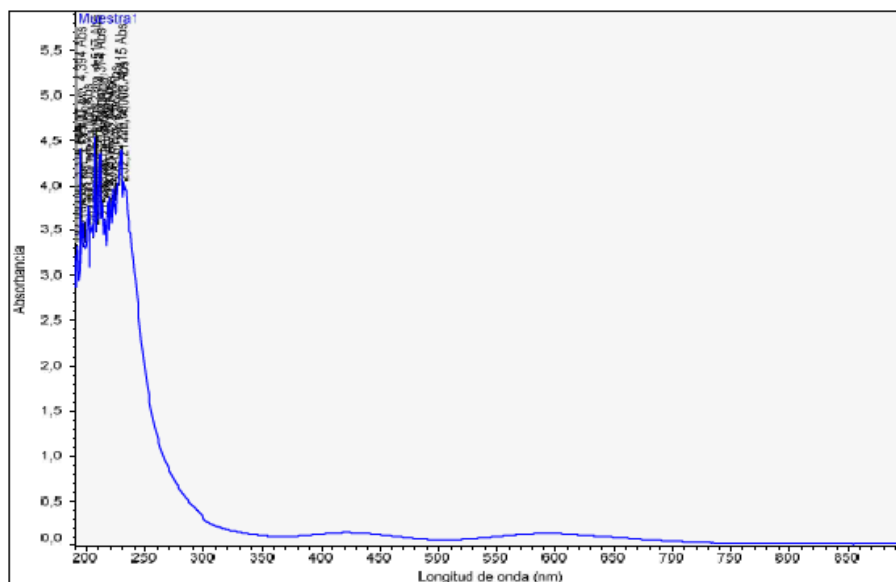
Como ya se mencionó el agua residual fue tomada, en la curtiembre Quisapincha, específicamente, en el tanque final de pretratamiento antes del sitio de descarga a la tanquilla, utilizando un recipiente plástico debidamente esterilizado. No fue posible realizar mediciones de parámetros en sitio por no contar con los equipos necesarios, pero se observó en la muestra coloración oscura, olor desagradable, gran contenido de sólidos en suspensión, lo cual coincide con lo descrito por Esparza y Gamboa (2001) para efluentes de curtiembres.

Previo a llevar a cabo las pruebas de adsorción, los efluentes líquidos provenientes del proceso de curtiembre fueron sometida a pretratamiento para reducir la cantidad de cromo (VI) a cromo (III), aplicando a las aguas residuales de curtiembre hidróxido de calcio (cal industrial K40) y filtración al vacío para eliminar los sólidos en suspensión, según se muestra en el anexo 6.

4.7. Medición de la concentración de adsorbato mediante Uv visible

La medición de la concentración de adsorbato (agua contentiva de cromo III) en las muestras de agua residual, se realizó mediante espectrofotometría de luz visible. Para ello, se generó la curva de calibración partiendo de una solución control de sulfato de cromo (III) de concentración de 1,15 mg/ml (ver anexo 7). y se realizó un barrido para establecer la longitud de onda que se adapta a la muestra, dando como resultado 232,21 nm (ver anexo 8). La figura 14, muestra el barrido de Uv-visible a la longitud de onda de 232 nm.

Figura 14. Barrido Uv-Visible, solución estándar de Cr (III) grado reactivo, a una longitud de onda de 232 nm.



Fuente: elaboración propia

Seguidamente se realizaron tres lecturas de la solución estándar presente en Cr (III) grado reactivo, para calcular a partir de allí, utilizando el programa Excel, la absorbancia media, según se muestra en la tabla 5

Tabla 5. Cálculo absorbancia estándar equipo UV-visible

Longitud de onda (nm)	Absorbancia 1	Absorbancia 2	Absorbancia 3	Absorbancia media estándar
232	4,175	4,037	4,037	4,138

Fuente: elaboración propia

Los datos que se muestran, presentan una desviación estándar (calculada usando la herramienta Excel) de 0,065, por tanto, no hay dispersión apreciable entre ellos y pueden ser utilizados para realizar la interpolación en la obtención de las concentraciones de adsorbato en las distintas muestras.

4.8. Medición de rendimiento de adsorbato mediante Uv visible

Las muestras de totora hidrolizada de los tamaños ya descritos: 300 μm , 425 μm y 850 μm , fueron cargadas en un equipo de filtración a escala de laboratorio (en proceso de patentamiento por lo que no se muestran detalles de la configuración, ni de las variables de operación de la misma), procediendo a filtrar las muestras de agua residual y las muestras de concentración conocida a fin de calcular la capacidad de adsorción de la totora, para su posterior comparación.

Aplicando técnica colorimétrica, utilizando el equipo de Uv-Visible y correlacionando los resultados con las de las soluciones conocidas, se estableció la concentración presente en el agua residual mediante absorbancias a concentraciones de 0,5; 0,7; 1,0; 1,2 y 1,5 mg/ml.

A efectos estadísticos, se realizaron por triplicado mediciones de Uv-Visible para cada tamaño de muestra, se calculó el valor promedio correspondiente y el porcentaje de absorción para agua residual obtenida de una planta de curtiembre. Los valores se resumen en la tabla 6.

Los resultados que se obtuvieron, muestran para la muestra de 300 μm un porcentaje de adsorción de 72,70 % que se corresponde con un rendimiento del 27,30 %. La muestra de 425 μm presentó 72,06% de adsorción y un rendimiento del 27,94%, por su parte para la muestra de 850 μm el porcentaje de adsorción obtenido fue de 59,38% con un rendimiento del 40,62%. Por comparación, se determinaron los valores para el agua control de cromo (III) de grado comercial utilizado en industrias de curtiembre, obteniéndose para 300 μm un porcentaje de adsorción de 75.36% con un rendimiento del 24,64%, para la totora de 425 μm se obtuvo 70,01% de porcentaje de adsorción con un rendimiento del 29,99% y para la de 850 μm un porcentaje de adsorción de 58,53% que se corresponde con un rendimiento del 41,47%. Los cálculos se realizaron utilizando el software Excel.

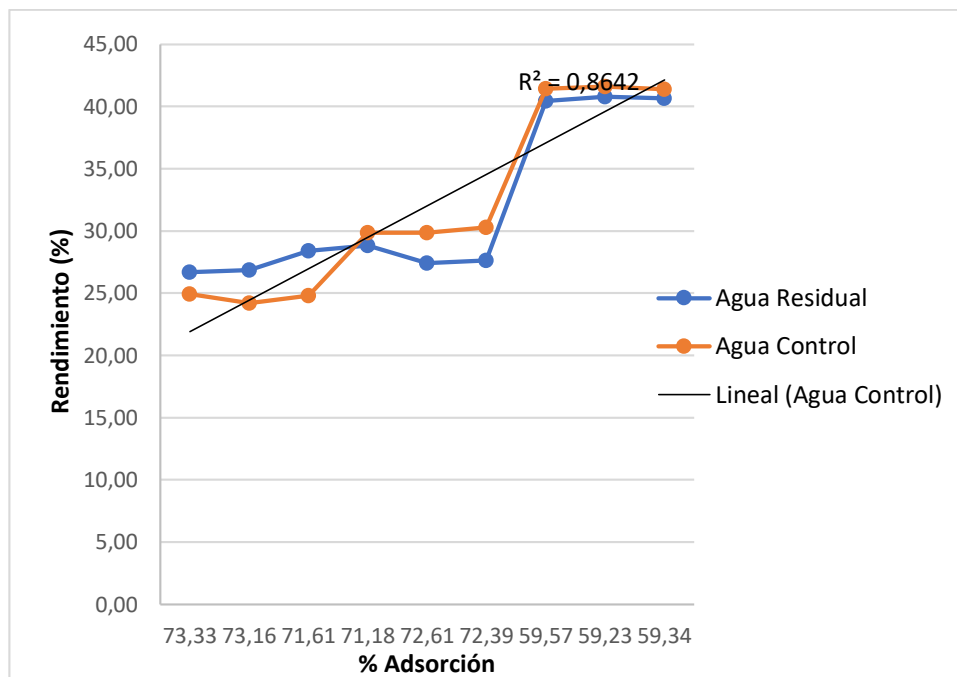
Como se puede observar los mejores resultados se obtienen para la muestra de menor tamaño (300 μm) debido a que presenta una mayor área superficial, para ambos tipos de agua. Este comportamiento es similar al reportado por Pacheco (2021) para eliminar plomo (II) en aguas contaminadas, el autor señala que la superficie externa total por unidad de volumen es mayor para las partículas de menor tamaño, aportándole una mayor superficie externa para la transferencia de masa. Igual comportamiento reportan Andrade (2016) y González (2017), en contraste Lagos (2016) en su investigación, concluyó que el tamaño de l bioadsorbente (borra de café) no influía de manera apreciable en la capacidad de adsorción.

Tabla 6. Cálculo porcentaje de adsorción y rendimiento para los diferentes tamaños de totora hidrolizada (*Schoenoplectus californicus*), para el agua residual del proceso de curtiembre y el agua de control

Parámetros			Agua de cromo (III) Residual			Agua de cromo (III) Control		
Muestras	Absorbancia Estándar (%)	Longitud de onda (nm)	Absorbancia	Porcentaje de Adsorción (%)	Rendimiento de Adsorción (%)	Absorbancia (%)	Porcentaje de Adsorción (%)	Rendimiento de Adsorción (%)
300 µm								
1	4,138	232	3,958	73.33	26.67	4,052	75.07	24.93
2			3,949	73.16	26.84	4,091	75.80	24.20
3			3,865	71.61	28.39	4,059	75.20	24.80
			PROMEDIO	72.70	27.30		75.36	24.64
425 µm								
1	4,138	232	3,842	71.18	28.82	3,787	70.16	29.84
2			3,919	72.61	27.39	3,785	70.13	29.87
3			3,907	72.39	27.61	3,764	69.74	30.26
			PROMEDIO	72.06	27.94		70.01	29.99
850 µm								
1	4,138	232	3,215	59.57	40.43	3,162	58.58	41.42
2			3,197	59.23	40.77	3,153	58.42	41.58
3			3,203	59.34	40.66	3,163	58.60	41.40
			PROMEDIO	59.38	0.62		58.53	41.47

Se realizó un análisis de regresión lineal, para verificar si existen diferencias significativas entre los valores obtenidos para la muestra de aguas residuales y la solución estándar (Ver figura 15)

Figura 15. Comparación % de adsorción y rendimientos para agua residual y agua de control cromo (III)



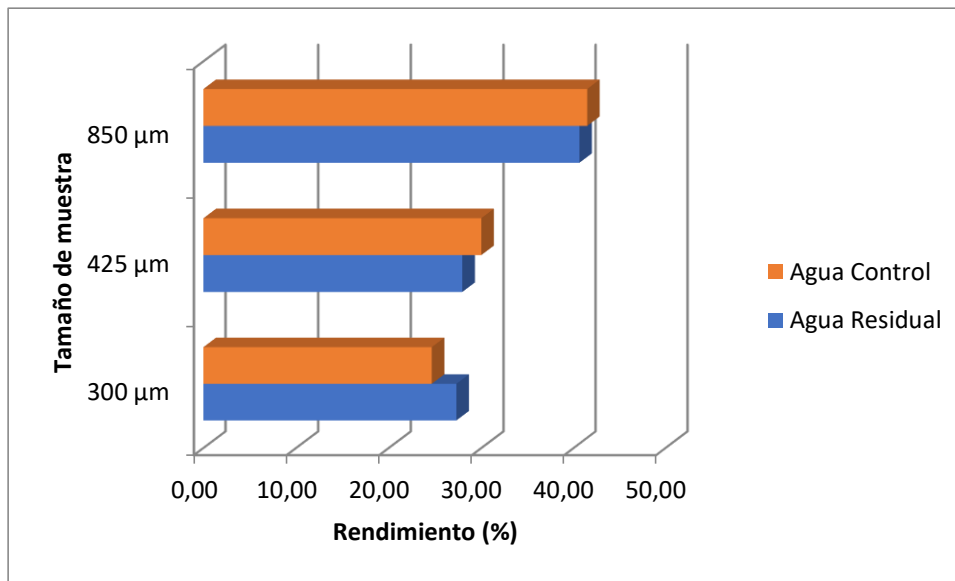
Fuente: elaboración propia

Se puede observar tanto para el agua residual como para el agua de control, que existe una dependencia lineal (inversa) entre el porcentaje de adsorción y el rendimiento. Se observa también que ambas líneas están prácticamente superpuestas motivado a que no hay variaciones apreciables entre los valores obtenidos para cada caso.

En la figura 16 se muestran los porcentajes de adsorción para los diferentes tamaños de muestra, tanto para las aguas provenientes de la curtiembre como de la solución control de

romo (III) preparada en el laboratorio. El rendimiento obtenido fue de 40,66% para el agua residual, correspondiente a la muestra de mayor tamaño (850 μm).

Figura 16. Comparación rendimiento para agua residual y agua de control cromo (III) para los diferentes tamaños de muestra



Fuente: Elaboración propia

Se observa que los rendimientos obtenidos son similares para la muestra de agua residual y el agua control. Asimismo, es posible verificar en el gráfico a mayor tamaño de muestra, los rendimientos también se incrementan.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES, BIBLIOGRAFÍA, ANEXOS.

5.1. Conclusiones

En un intento por implementar sistemas de tratamiento efectivos y a bajos costos para eliminar contaminantes de los efluentes líquidos industriales, específicamente los metales pesados, se han desarrollado múltiples investigaciones para evaluar la efectividad de utilizar bioadsorbentes, toda vez que ha sido demostrado que los procesos de adsorción son los que mejores resultados proporcionan, ya que permiten alcanzar eficiencias elevadas a bajos costos al ser comparados con otras metodologías, para tratar este tipo de efluentes. El uso de elementos naturales, muchas veces desecho de actividades agrícolas, favorece la economía del proceso y colabora con la sostenibilidad en el planeta.

Las curtiembres son industrias donde se utilizan y por ende se generan grandes volúmenes de agua con elevadas concentraciones de cromo III y cromo VI, siendo este último altamente contaminantes para el ambiente y nocivo para el ser humano. El cromo trivalente, por su parte, es un elemento indispensable para el hombre, pero dado que bajo ciertas condiciones este puede modificarse y pasar a cromo VI, es conveniente eliminarlo para evitar que se presente la situación planteada.

Son muchos los bioadsorbentes que han sido empleados para la eliminación de cromo y otros metales en agua. En este trabajo se utilizan hojas de totora (*Schoenoplectus californicus*) por ser una planta que se desarrolla en varias zonas del país, por lo que puede ser recolectada de manera sencilla. Por comparación con la información bibliográfica, se realiza la identificación botánica de la planta.

Las hojas de totora (*Schoenoplectus californicus*) son modificadas mediante activación química para incrementar el volumen de los poros en su superficie e incrementar con ello el número de sitios activos para que se lleven a cabo los procesos que permiten eliminar el cromo (III). La activación se realiza empleando hidróxido de potasio (KOH).

Se verifica la efectividad de la activación mediante métodos instrumentales, comparando las fibras de totora naturales y las fibras hidrolizadas, lo cual se detecta por los cambios en la

coloración de las muestras visibles a través del microscopio óptico y cambios perceptibles en la superficie de la fibra, producto del incremento de la porosidad. Así mismo se emplea la espectrofotometría de infrarrojo para identificar los grupos funcionales, encontrándose para este caso: O-H, C-H, C=O, C-C. Las mediciones se realizan para las fibras crudas y las hidrolizadas, registrándose menores absorbancias para las muestras después de la hidrólisis. Los grupos encontrados son propios de la biomasa lignocelulósica, que caracteriza a fibras vegetales como la totora (*Schoenoplectus californicus*).

Tomando como referencia soluciones control de cromo (III) de concentración conocida y empleando un sistema de filtración, empleando como adsorbente las hojas de totora, se determinan para los diferentes tamaños el porcentaje de adsorción tanto para la solución estándar como para las aguas generadas durante el curtido, se determina también el porcentaje de rendimiento del adsorbato.

Los porcentajes de adsorción para el agua colectada en la curtiembre varían entre 59,23% y 73,3%, lo cual permite asegurar que las hojas de totora permiten obtener elevados porcentajes para eliminar cromo III contenido en residuos líquidos del proceso de curtiembre. Se observa también que el tamaño de la partícula tiene influencia en la adsorción del ion metálico, obteniendo los porcentajes más altos para la muestra de menor tamaño, debido a la mayor área superficial disponible para que se desarrolle la adsorción.

Los resultados obtenidos, aunado a su disponibilidad a nivel local de la totora (*Schoenoplectus californicus*, su carácter renovable, hacen viable emplear la totora como bioadsorbente para remover cromo (III) contenidos en aguas contaminadas provenientes de la industria de curtiembres, lo cual representa una alternativa económica y sostenible para las industrias del sector.

5.2. Recomendaciones

Para la presente investigación, por no disponer de los equipos para ello, no fue posible medir al momento de coleccionar la muestra, parámetros como pH, temperatura y conductividad, que pueden tener algún impacto en los resultados. Se recomienda para estudios posteriores, caracterizar los efluentes en sitio y verificar el efecto de los mismos en las determinaciones.

Dada la importancia del proceso de activación de los bioadsorbentes, se deben seguir con rigurosidad los procedimientos para llevar a cabo la hidrólisis.

Asimismo, se recomienda, una vez patentado el sistema de filtración, realizar experiencias que permitan establecer el efecto de la altura del bioadsorbente, velocidad de filtración, entre otros aspectos.

Dadas la multiplicidad de variables que intervienen en los procesos de bioadsorción, cualquier estudio que se realice al respecto debe definir con exactitud las condiciones de aplicación, a objeto de que los resultados puedan ser reproducibles. Asimismo, se recomienda realizar un riguroso análisis estadístico para poder valorar el potencial como adsorbente de las distintas biomásas que pueden ser utilizadas para tal fin. Para ello se puede utilizar, entre otros, un análisis de homogeneidad de varianza (homocedasticidad).

CAPÍTULO VI

PROPUESTA

6.1. Título

Propuesta de escalamiento básico a nivel industrial de un sistema de adsorción de cromo (III) utilizando totora (*Schoenoplectus californicus*) hidrolizada como material adsorbente.

6.2. Descripción

Dada la elevada toxicidad que presentan los metales pesados, lo que constituye una amenaza para la salud y el ambiente, en la actualidad se desarrollan diversas investigaciones orientadas a la implementación de sistemas de tratamiento para su eliminación. Los metales pesados, son generados especialmente en procesos industriales. Uno de ellos, es el cromo, el cual presenta dos estados de oxidación estables: Cr (III) y Cr (VI); el cromo trivalente es relativamente inofensivo y no tiene movilidad, no obstante, puede oxidarse y convertirse en cromo hexavalente el cual tiene carácter carcinogénico y mutagénico (Buñay, 2022).

Diversas industrias generan efluentes con altos contenidos de cromo, entre otras se pueden citar: la galvanoplastia y las curtiembres Parada *et al.* (2019).. Estás última con un importante desarrollo en Ecuador, por lo que son una fuente de empleo, pero muchas de ellas no disponen de plantas de tratamiento para la remoción de estos contaminantes antes de descargarlos al ambiente.

Los metales pesados, pueden ser removidos por diferentes métodos, pero está demostrado que la adsorción es el método más recomendable por su elevada eficiencia y bajos costo (Landy, 2022). Esta alternativa se hace aún más recomendada cuando se emplean bioadsorbentes, dado que muchos de ellos son desechos agrícolas (Quiñones *et al.*, 2014) lo cual disminuye los costos asociados al proceso y contribuye a la sostenibilidad. Una planta cuyo potencial de adsorción ha sido evaluado es la totora (*Schoenoplectus californicus*, la cual crece de manera silvestre en varias zonas del país (Blanco, 2019).

Dados los resultados obtenidos en este trabajo y otras investigaciones previas (Ver tabla 7) en cuanto al uso de la totora para ser utilizada como adsorbente en un sistema de filtración, se plantea realizar un escalamiento del equipo con el propósito de que pueda ser utilizado con

finés comerciales, considerando que existen en Ecuador, pequeñas industrias dedicadas al proceso de curtiembre que no cuentan con los recursos para la instalación de sistemas de tratamiento de elevados costos tanto de inversión inicial como operativos y que de esta manera contarían con una alternativa para tratar sus efluentes, dando cumplimiento a lo establecido en la normativa ambiental y contribuyendo a la preservación del ambiente.

Tabla 7. *Investigaciones uso de bioadsorbentes para la remoción de cromo III*

Autor	Título	Objetivo
Buñay (2022)	Adsorción de cromo (III) de aguas residuales de la curtiembre “el al-ce” del cantón Guano mediante filtración con polvo de vicia faba para reducir el nivel de contaminación	Adsorber el Cr ⁺³ de aguas residuales de la curtiembre “EL AL-CE” del cantón Guano mediante filtración con polvo de Vicia faba para reducir el nivel de contaminación
Landy (2022)	Remoción de cromo III y plomo II en solución acuosa, utilizando carbón activo obtenido de las semillas de guayaba	Remover el Cromo III y Plomo II en solución acuosa, utilizando carbón activo obtenido de las semillas de Guayaba.
Campos (2019)	Parámetros óptimos de adsorción de cromo III en aguas contaminadas mediante biomasa de cáscara de maracuyá (<i>Passiflora eduli</i>	Determinar los valores óptimos de pH y concentración de biomasa de cáscara de maracuyá (BCM), para la adsorción de cromo III en aguas contaminadas

González (2017)	Evaluación de la cáscara de semilla de <i>Jatropha Curcas</i> L. como bioadsorbente de Cromo III	Determinar la capacidad adsorbente de la cáscara de semilla de <i>Jatropha Curcas</i> L; sobre los iones cromo III
Ordoñez <i>et al.</i> (2019)	Remoción de cromo trivalente en aguas residuales de curtiembres mediante un proceso biótico-abiótico basado en el uso de <i>Yarrowia lipolytica</i> y <i>Candida fluviatilis</i> .	Evaluar la capacidad de remoción de cromo trivalente en aguas del curtido del cuero a partir de microorganismos acidófilos, nativos de aguas residuales de curtiembres, en biorreactores tipo lote.

Fuente: elaboración propia

Al hablar de escalamiento se hace referencia a al proceso de arrancar y operar con éxito un equipo o sistema tamaño comercial, cuyo diseño y condiciones de operación están basados en gran medida en datos experimentales y demostraciones realizadas a escalas menores (Bisio y Kabel, 1985) El escalamiento es un una herramienta fundamental para los ingenieros químicos, porque permite disminuir errores al realizar diseños de manera directa, producto de la falta de información o al uso de correlaciones inadecuadas, un elemento adicional que da valor a la propuesta más allá del aspecto ambiental.

Los procesos de cambio de escala requieren de una óptima planificación y conocimiento profundo de todas las variables involucradas y que deben corresponderse con la cinética química, las leyes de equilibrio y los balances de energía, masa y cantidad de movimiento para cada una de las fases (Fontaine y Rojas, 2006).

6.3. Desarrollo de la propuesta

Las fases para llevar a cabo la propuesta, han sido formuladas sobre la base de que el sistema de filtración ya fue diseñado y probado, por lo que no se está considerando la realización de pruebas para establecer las condiciones óptimas de operación del sistema (tamaño del lecho filtrante, tamaño de las partículas del bioadsorbente, número de columnas, etc.) a escala de laboratorio. A continuación, se describen las fases:

Fase 1, Estado del arte: revisión documental sobre procesos de escalamiento para sentar las bases teóricas de esta propuesta. Se debe realizar una revisión detallada de las investigaciones previas realizadas tanto para el diseño como para las pruebas experimentales del sistema de filtración a escala de laboratorio, para la recogida de los datos de interés fundamento para el desarrollo de esta propuesta.

Fase 2. Escalamiento: en esta etapa se deben analizar y establecer los aspectos básicos para el diseño, elaborar la documentación correspondiente, y llevar a cabo el análisis de costos y verificar la factibilidad de la propuesta, según se describe:

- a) Definir el factor de escalamiento, partiendo del análisis de investigaciones previas y de heurísticas establecidas.
- b) Diseñar un diagrama de bloques del proceso mediante el cual se puedan identificar el balance de masa global basados en los equipos requeridos previos y posteriores a la adsorción, señalando sus condiciones de operación. Asimismo, se deben incluir los balances de masa y energía para cada uno de ellos.
- c) Establecer las dimensiones de los equipos mayores requeridos en el sistema utilizando heurísticas y variaciones adecuadas de correlaciones reportadas en la bibliografía, registrando los resultados en las hojas de especificaciones de los equipos elaboradas para tal fin.
- d) Evaluar el diagrama de flujos del proceso para detectar las posibles modificaciones de las condiciones de operación que puedan darse durante el funcionamiento del sistema, de esta manera se identificarán las variables sobre las que se debe ejercer control y la forma en que deben ser controladas, es otras palabras, definir los sistemas de control.

- e) Elaborar el diagrama de tuberías e instrumentación del sistema, donde se señalen los elementos de la filosofía de control.
- f) Estimar los costos del sistema (equipos, partes, instrumentos, tuberías)
- g) Hacer el análisis de factibilidad del proyecto.

Fase 3. Análisis de resultados: corresponde durante esta fase realizar la revisión, análisis y discusión de los resultados, para la emisión de las conclusiones y recomendaciones correspondientes.

6.4. Cronograma

En la Figura 17, se presenta el cronograma de las actividades señaladas en el epígrafe anterior.

Figura 17. Cronograma de actividades. Propuesta de escalamiento básico a nivel industrial de un sistema de adsorción de Cromo (VI) utilizando totora (*Schoenoplectus californicus*) hidrolizada como material adsorbente.

Ni	Actividad	Mes 1				Mes 2				Mes 3				Mes 4				Mes 5				Mes 6			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1	FASE 1- Estado del Arte																								
1.1	Revisión bibliográfica	■	■	■																					
1.2	Recogida y análisis datos experimentales proyectos previos				■	■	■																		
2	FASE 2-Escalamiento																								
2.1	Definición factor de escalamiento									■															
2.2	Diseño diagrama de bloques									■	■	■													
2.3	Dimensionamiento de equipos mayores										■	■	■	■											
2.4	Evaluación diagrama de flujo para definir variables que requieren control																■								
2.5	Elaboración diagrama de tuberías e instrumentación																■	■							
2.6	Estimación de costos																	■	■						
2.7	Análisis de factibilidad																			■	■				
3	FASE 3-Análisis de resultados																								
3.1	Revisión, análisis y discusión de resultados																							■	■

Fuente: Elaboración propia

BIBLIOGRAFÍA

- Alcañiz, J., Román, M., & Lillo, M. (2022). Chemical Activation of Lignocellulosic Precursors and Residues: What Else to Consider? *Molecules*, 27(5), 1630. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/molecules27051630>
- Amangandi, G. (2016). *Rediseño de la planta de tratamiento de aguas residuales de la curtiembre Quisapincha, Provincia de Tungurahua*. [Tesis de Licenciatura, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. <http://dspace.espoch.edu.ec/bitstream/123456789/6474/1/96T00351.pdf>
- Andrade, D. (2016). *Proucción de carbón activado a partir de la caña guadua (Guadua angustifolia K) mediante activación química con hidróxido de potasio*. [Tesis de Licenciatura, Escuela Politécnica Nacional]. <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/13009/1/CD-6687.pdf>
- Andrade, M. (2023). *Determinación de la capacidad de bioadsorción de cromo hexavalente en aguas residuales que provienen de la industria de curtiembres utilizando la cáscara de limón*. [Tesis de grado, Universidad Central de Ecuador], Quito. <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/30355>
- Ardila, A., Arriola, E., & Álvarez, W. (2022). Aprovechamiento de residuos de Eichhornia crassipes para la remoción de Cr (VI) en aguas residuales simuladas. *Revista Politécnica*, 18(35), 71-83. <https://www.redalyc.org/journal/6078/607870799006/607870799006.pdf>
- Arias, F. (2012). *El Proyecto de Investigación* (Sexta ed.). Caracas, Venezuela: Episteme, C.A.
- Baca, J. (2018). *Influencia del pH y granulometría de la cáscara de Citrus sinencis (naranja) en la bioadsorción de cromo en efluente de etapa de curtido, Curtiembre Ecológica del Norte*. [Tesis de grado, Universidad César Vallejo], Trujillo-Perú. https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/25320/baca_mj.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Basantes, E., & Lozano, C. (2018). Evaluación de las características físicas de pieles curtidas con un extracto hidroalcolico a partir de Caesalpinia spinosa. *Revista Caribeña de Ciencias Sociales*. <https://www.eumed.net/rev/caribe/2018/12/pieles-curtidas-hidroalcolico.html>

- Bernabe, Y. (2020). *Capacidad de absorción de plomo en la totora (Scirpus californicus), en crecimiento en las aguas en la zona del Delta Upamayo-Lago Chinchaycocha-2019*. [Tesis de grado, Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión]. http://repositorio.undac.edu.pe/bitstream/undac/1986/1/T026_70926676_T.pdf
- Bisio, A., & Kabel, R. . (1985). *Scaleup of Chemical Processes Conversion from Laboratory Scale Tests to Successful Commercial Size Design*. John Wiley & Sons.
- Blanco, J. (2019). Suitability of Totora (*Schoenoplectus californicus*) (C.A. Mey.) Soják for Its Use in Constructed Wetlands in Areas Polluted with Heavy Metals. *Sustainability*, *11*(1). <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/su11010019>
- Buñay, N. (2022). *Adsorción de cromo (III) de aguas residuales de la curtiembre “el al-ce” del cantón Guano mediante filtración con polvo de vicia faba para reducir el nivel de contaminación*. [Tesis de Maestría, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. <http://dspace.espace.edu.ec/bitstream/123456789/17157/1/20T01565.pdf>
- Calvache, G. (2022). *Estudio comparativo de dos sistemas de filtrado a base de residuos orgánicos de huevó y naranja para la retención de Cromo hexavalente (Cr+6) de soluciones acuosas*. [Tesis de grado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba-Ecuador]. <http://dspace.espace.edu.ec/bitstream/123456789/17608/1/236T0607.pdf>
- Campos, G. (2019). *Parámetros óptimos de adsorción de cromo III en aguas contaminadas mediante biomasa de cáscara de maracuyá (Passiflora edulis)*. [Tesis de grado, Universidad Privada del Norte], Trujillo-Perú. <https://repositorio.upn.edu.pe/bitstream/handle/11537/21825/Campos%20Flores%20Gaby%20Yud%20Nery-Parcial.pdf?sequence=4&isAllowed=y>
- De Avila, G. (2021). *Avaliação do estresse oxidativo and compostos elementares em Schoenoplectus californicus (CA Mey.) soják em dois lagos do Litoral Norte do Rio Grande do Sul, Brasil*. [Tesis de grado, Universidade Federal Do Río Grande Do Sul – UFRGS]. <https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/224294>
- Esparza, E. , & Gamboa, N. (2001). Contaminación debida a la industria de curtiembre. *Revista de Química*, *XV*(1), 41-63. <https://revistas.pucp.edu.pe/index.php/quimica/article/view/4756/4757>

- Fernández, R. (2019). *Eliminación de metales pesados mediante biosorción: desarrollo de procesos de tratamiento para aguas residuales industriales*. [Tesis Doctoral, Universidad de Granada].
<https://digibug.ugr.es/bitstream/handle/10481/62268/81932.pdf?sequence=4&isAllowed=y>
- Fontaine, D., & Rojas, M. (2006). *Diseño a nivel básico de una planta de adsorción de metales pesados sobre lignina a escala piloto*. [Tesis de grado, Universidad Central de Venezuela].
<http://saber.ucv.ve/bitstream/10872/15175/1/T.E.G.%20Fontaine%20y%20Rojas.pdf>
- González, M. (2017). *Evaluación de la cáscara de semilla de Jatropha Curcas L. como bioadsorbente de Cromo III*. [Tesis de maestría, Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México].
<https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/28542/Gonz%c3%a1lez%20Espinosa%20Mario%20Alberto.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Hernández-Sampieri, R., Fernández, C., & Baptista, M. (2014). *Metodología de la Investigación* (Sexta ed.). México, D.F. : McGRAW-HILL.
- Hidalgo, J. (2019). *Constructive applications of totora (Schoenoplectus californicus) in binderless boards*. [Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid].
<https://oa.upm.es/56706/>
- Jacome, C., Ballesteros, C., Rea, E., Rea, L., & Poma, P. (2021). Microalgas en el tratamiento de aguas residuales generadas en industrias de curtiembres. *Ciencias Ambientales*, 14(2), 47-55. <https://doi.org/https://doi.org/10.18779/cyt.v14i2.502>
- Lagos, L. (2016). *Bioadsorción de cromo con borra de café en efluentes de una industria curtiembre local*. [Tesis de grado, Pontificia Universidad Católica del Perú].
- Landy, J. (2022). *Remoción de cromo III y plomo II en solución acuosa, utilizando carbón activo obtenido de las semillas de guayaba*. [Tesis de grado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo], Riobamba-Ecuador.
<http://dspace.esoch.edu.ec/bitstream/123456789/17751/1/96T00794.pdf>

- Layedra, C. (2023). *Diseño y elaboración de un prototipo del sistema de filtración de agua por columnas que permite su conexión en secuencia mediante impresión 3D*. [Tesis de grado, Escuela Superior Politécnica del Chimborazo].
- Lorena, L., Paz, I., & Sandoval, A. (2020). Uso de cáscara de cacao (*Theobroma cacao*) para la remoción de cromo en solución acuosa. *Revista EIA. Escuela de Ingeniería de Antioquía*, 17(34). <https://doi.org/https://doi.org/10.24050/reia.v17i34.1393>
- Meneses, Y., Patiño, P., & Betancur, J. (2019). Remoción de cromo en aguas residuales mediante el uso de biomasa de *Spirulina SP*, sedimentación primaria y precipitación química. *Revista de Investigación Agraria Ambiental*, 10(1), 141-152. <https://doi.org/https://doi.org/10.22490/21456453.2326>
- Ministerio de Producción y Trabajo. Presidencia de la Nación. (2019). *Guía de Actuación y Diagnóstico de Enfermedades Profesionales. 1.3 Exposición a Cromo y sus compuestos*. Guía.
- Ministerio de Salud y Protección Social. (2015). *Guía para el desarrollo de actividades de promoción y prevención en la industria de curtiembres*. Guía. <https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/VS/PP/SA/6guia-actividades-pyp-curtiembres.pdf>
- Mondragón, P. (2020). Análisis de los espectros de infrarrojo. En *Principios y aplicaciones de la espectroscopia de infrarrojo en el análisis de alimentos y bebidas* (págs. 66-82). <http://ciatej.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1023/743>
- Monteiro, M. (2013). *Preparación de carbones activados con KOH a partir de residuos de petróleo. Adsorción de Hidrógeno*. [Tesis doctoral, Universidad de Alicante]. https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/33258/1/tesis_mateuscarvalho.pdf
- Morales, V. (2022). *Remoción de cromo hexavalente en aguas residuales a partir de tratamientos electroquímicos en la empresa Tenería Núñez*. [Tesis de Maestría, Universidad Técnica de Ambato]. <https://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/34284/1/t1939mqim.pdf>
- Ordoñez, B. , Didier, E. , & Benítez, N. (2019). Remoción de cromo trivalente en aguas residuales de curtiembres mediante un proceso biótico-abiótico basado en el uso de

- Yarrowia lipolytica y Candida fluviatilis. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 35(4), 945-956.
- Pabón, E., Benítez, R., Sarria, A., & Gallo, J. (2022). Contaminación del agua por metales pesados, métodos de análisis y tecnologías de remoción. Una remoción. *Entre Ciencia e Ingeniería*, 14(27), 9-18. <https://doi.org/https://doi.org/10.31908/19098367.0001>
- Pacheco, L. (2021). *Capacidad de Adsorción de plomo (II) mediante el uso de totora (Scirpus californicus), en las aguas contaminadas*. [Tesis doctoral, Universidad Nacional del Centro del Perú]. <http://hdl.handle.net/20.500.12894/7726>
- Parada, M., Manobanda, P., Tapia, Z., Zambrano, M., Rennola, L. , & Castillo, Y. (2019). Estudio de las tecnologías para el tratamiento de los efluentes generados por una planta de curtiembres en Ecuador. *Ciencia e Ingeniería*, 40(2), 138-147. <https://www.redalyc.org/journal/5075/507567825003/html/>
- Patel, H. (16 de marzo de 2019). Fixed-bed column adsorption study: a comprehensive review. *Applied Water Science*, 9(45). <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s13201-019-0927-7>
- Puente, R. (2019). *Determinación de la eficiencia de bioadsorción de cromo hexavalente con restos de moringa oleifera en medio acuoso*. [Tesis de grado, Escuela Politécnica Nacional], Quito.
- Punguil, K. (2017). *Análisis de la grava como filtro en el tratamiento de aguas residuales provenientes de la curtiembre Quisapincha de la Provincia de Tungurahua Cantón Ambato*. [Tesis de grado, Universidad Técnica de Ambato], Ambato-Ecuador. <https://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/27451/1/Tesis%201225%20-%20Punguil%20Narv%C3%A1ez%20Kelly%20Giomara.pdf>
- Quiñones, E., Tejada, C., & Ruiz, V. (2014). Remediación de aguas contaminadas con cromo utilizando diferentes biomateriales residuales. *Ciencias e ingeniería al día*, 25-42. <https://repositorio.unicartagena.edu.co/bitstream/handle/11227/5202/Remedacion%20de%20aguas%20contaminadas.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Ramos, M., Valle, C., & Vallesterio, S. (2020). Tratamiento de aguas residuales del proceso de curtido en tenerías de la Ciudad de León, mediante un proceso de adsorción con biomasa. *Universitas (León): Revista Científica De La UNAN León*, 11(2), 15-19.

- Salinas, P. (2014). Análisis cualitativo de fibras utilizadas en la elaboración de textiles del periodo. *Revista de Tecnología y Ciencias y de la Salud*, 1(1), 1-10. https://handbook.usfx.bo/nueva/areas/Salud/Tecnologia%20Medica/Revista%20Tecnologia%20y%20Ciencias%20de%20la%20Salud/articulo_1.pdf
- Sánchez, A. (2019). *Estudio preliminar de la activación comparativa con hidróxido de sodio e hidróxido de potasio mediante áreas superficiales y microscopía electrónica de barrido (SEM) del carbón pirolítico obtenido de la balsa (ochroma pyramidale)*. [Trabajo de Titulación, Universidad Central del Ecuador], Quito. <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/19239>
- Sanchez, J., González, R., Blancas, F., & Fonseca, A. (2020). Utilización de subproductos agroindustriales para la bioadsorción de metales pesados. *TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*(23), 1-18.
- Sandoval, V. (2020). Tratamiento de aguas residuales del proceso de curtido en tenerías de la ciudad de León, proceso de adsorción con biomasa. *Universitas (LEÓN)*, 11(2), 15-19. <https://doi.org/https://doi.org/10.5377/universitas.v11i2.16293>
- Silva, M., & Salinas, D. (2022). La contaminación proveniente de la industria curtiembre, una aproximación a la realidad ecuatoriana. *Revista Científica, Uisrael*. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.35290/rcui.v9n1.2022.427>
- Tejeda, L., Tejeda, C., Marimón, W., & Villabona, A. (2014). Estudio de modificación química y física de biomasa (*Citrus sinensis* Y *Musa paradisiaca*) para la adsorción de metales pesados en solución. *Luna azul*(39), 124-142. http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S1909-24742014000200008&script=sci_arttext
- Universidad Nacional de Colombia. (s.f.). *COL000086775 - Schoenoplectus californicus (C.A. Mey.) Soják - Cyperaceae*. Retrieved 01 de agosto de 2023, from <http://www.biovirtual.unal.edu.co/es/colecciones/detail/97546/>
- Urbina, N., Machuca, F., & Barajas, A. (2021). Advanced Oxidation Processes and Biotechnological Alternatives for the Treatment of Tannery Wastewater. *Molecules*, 26(11:3222). <https://doi.org/ttps://doi.org/10.3390/molecules26113222>

Vargas, R. (2022). *Biosorción de Cromo (III) de aguas contaminadas utilizando Pennisetum clandestinum* Hochst. Cusco.
<https://repositorio.unsaac.edu.pe/handle/20.500.12918/7142?locale-attribute=en>

World Bank. (6 de septiembre de 2013). *Siete cosas que tal vez no sepa sobre el agua*. Retrieved 23 de julio de 2023, from Banco Mundial Blogs:
<https://blogs.worldbank.org/es/opendata/siete-cosas-que-tal-vez-no-sepa-sobre-el-agua>

ANEXOS

Anexo 1. Preparación muestras totora (*Schoenoplectus californicus*)

Figura A1. Trituración con molino eléctrico

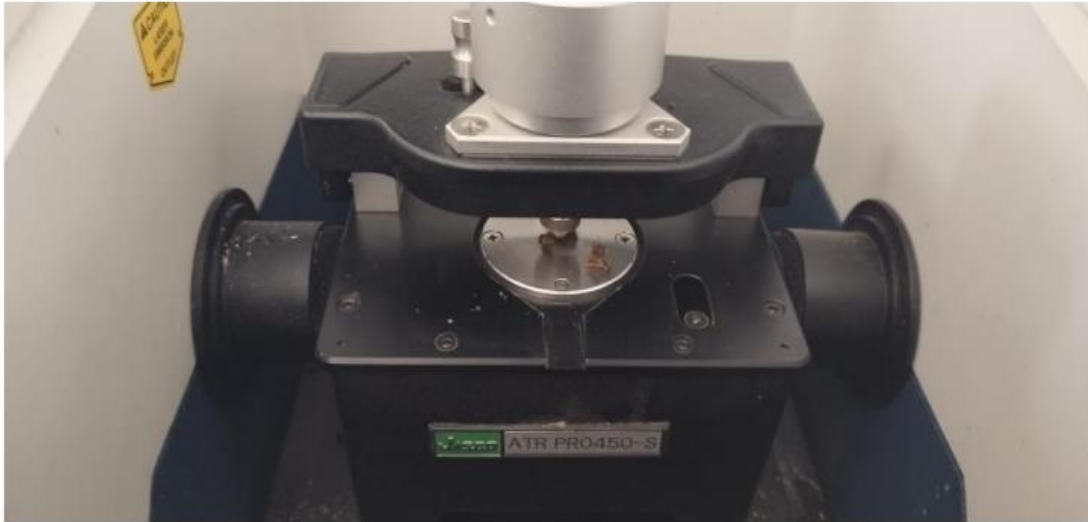


Figura A2. Tamizaje con tamiz eléctrico



Fuente: elaboración propia

Anexo 2. *Determinación grupos funcionales presentes muestras de totora (Schoenoplectus californicus por espectrofotometría infrarroja*



Fuente: elaboración propia

Anexo 3. *Activación muestras de totora con KOH al 1%*



Fuente: Elaboración propia

Anexo 4. Secado muestras totora hidrolizadas, utilizando estufa a temperaturas entre 40°C y 60°C por 4 Horas



Fuente: Elaboración propia

Anexo 5. Muestra de totora hidrolizada, seca y triturada



Fuente: Elaboración propia

Anexo 6. Pretratamiento aguas residuales provenientes del proceso de curtiembre

Figura A6. Pretratamiento de agua residual de curtiembre con hidróxido de calcio K40.

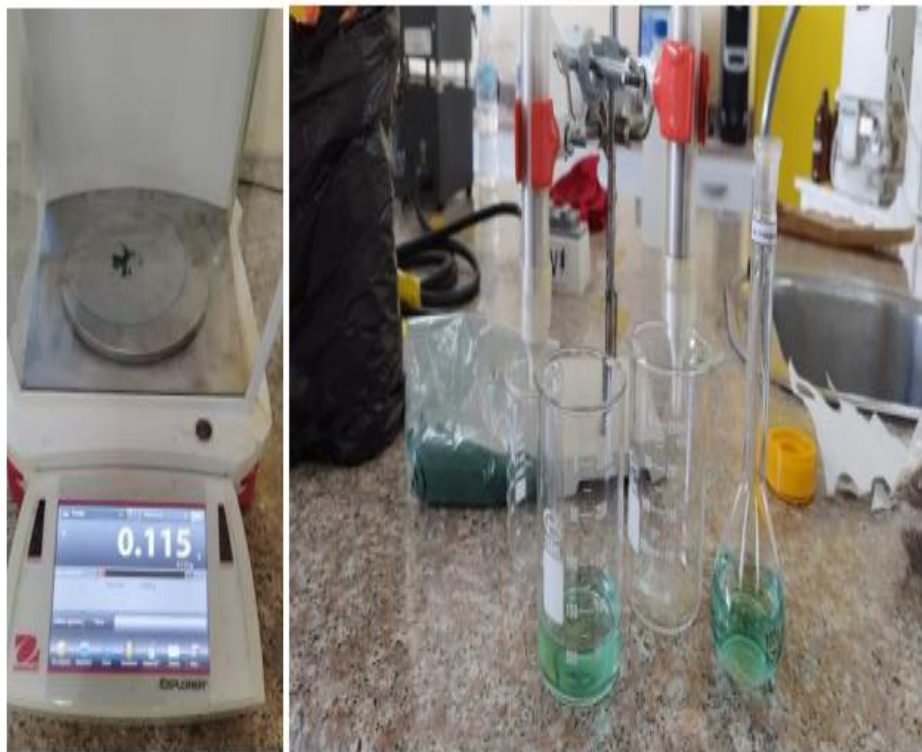


Figura A7. Filtración al vacío para eliminación de sólidos suspendidos



Fuente: elaboración propia

Anexo 7. *Preparación solución control cromo (III), concentración 1,15 mg/mL*



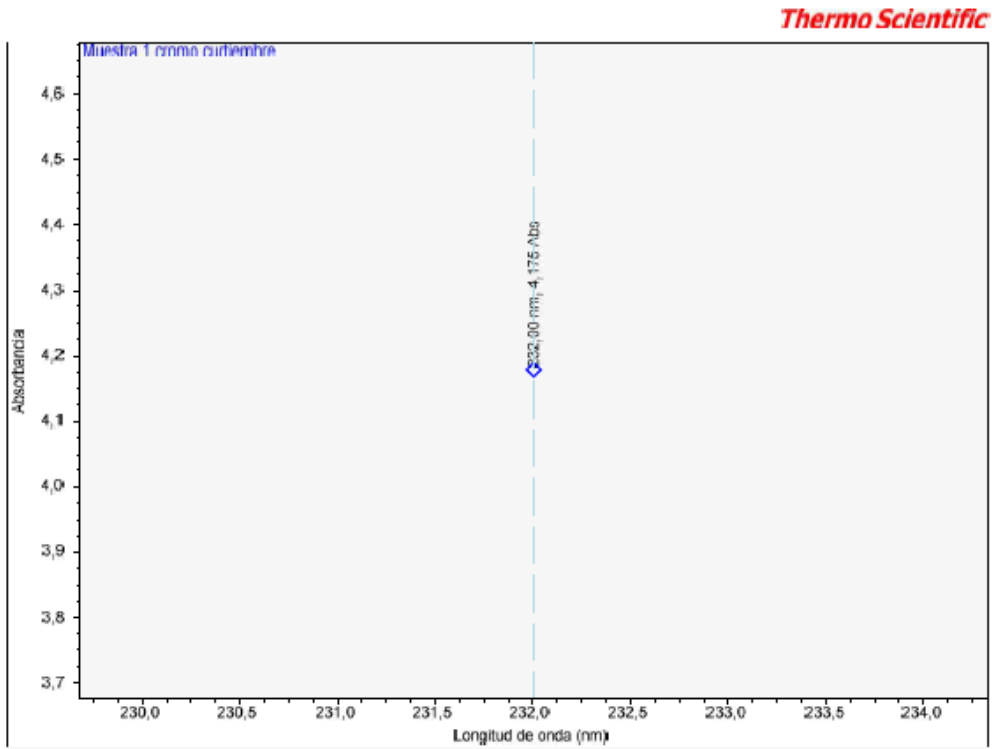
Fuente: elaboración propia

Anexo 8. Picos obtenidos por barrido Uv-visible

Longitud de Onda (nm)	Absorbancia
207,016	4,517
229,681	4,415
195,071	4,394
210,743	4,374
232,210	4,003
223,154	3,963
220,299	3,840
213,261	3,817
218,121	3,782
200,889	3,758
215,860	3,608
196,931	3,577
204,806	3,524
192,047	3,314

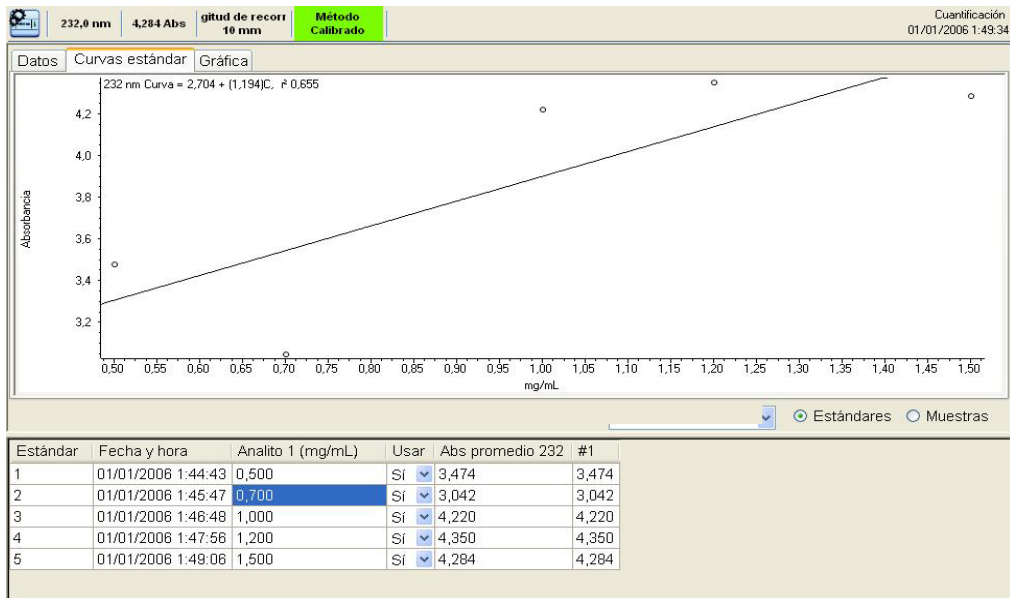
Fuente: elaboración propia

Anexo 9. Espectro Uv-Visible, Absorbancia estándar mediante Cr (III) grado reactivo, a una longitud de onda de 232 nm.



Fuente: Elaboración propia

Anexo 10. Interpolación Concentración de cromo (III) presente en distintas soluciones estándares mediante UV-Visible



Fuente: elaboración propia