



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
CARRERA INGENIERÍA AMBIENTAL

**EFICIENCIA DE LA BIOADSORCIÓN DE CADMIO (II) Y
CROMO (III) EN AGUAS CONTAMINADAS A NIVEL DE
LABORATORIO MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DE CÁSCARA
DE CEBOLLA (*ALLIUM CEPA*)**

Trabajo de Integración Curricular

Tipo: Proyecto de Investigación

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERA AMBIENTAL

AUTORA: MISHHELL ANDREA ZAMBRANO ALCOSER

DIRECTOR: Dr. JOSÉ GERARDO LEÓN CHIMBOLEMA, MSc.

Riobamba – Ecuador

2023

© 2023, **Mishell Andrea Zambrano Alcoser**

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

Yo, Mishell Andrea Zambrano Alcoser, declaro que el presente Trabajo de Integración Curricular es de mi autoría y los resultados del mismo son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autora asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este Trabajo de Integración Curricular. El patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 06 de diciembre de 2023



Mishell Andrea Zambrano Alcoser

C.I. 060580227-1

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
CARRERA INGENIERÍA AMBIENTAL

El Tribunal del Trabajo de Integración Curricular certifica que: El Trabajo de Integración Curricular; Tipo: Proyecto de Investigación, **EFICIENCIA DE LA BIOADSORCIÓN DE CADMIO (II) Y CROMO (III) EN AGUAS CONTAMINADAS A NIVEL DE LABORATORIO MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DE CÁSCARA DE CEBOLLA (ALLIUM CEPA)**, realizado por la señorita: **MISHELL ANDREA ZAMBRANO ALCOSER**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Trabajo de Integración Curricular, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal autoriza su presentación.

	FIRMA	FECHA
Ing. Johanna Elizabeth Ayala Izurieta, Mgs. PRESIDENTE DEL TRIBUNAL		2023-12-06
Dr. José Gerardo León Chimbolema, MSc. DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR		2023-12-06
Ing. Silvana Paola Ocaña Coello, MSc. ASESORA DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR		2023-12-06

DEDICATORIA

A mi padre Miguel por su apoyo incondicional desde el inicio de la carrera. A mi madre Elena por ser mi soporte y animarme en todo momento a seguir cumpliendo mis metas.

Mishell

AGRADECIMIENTO

A Dios por la vida, la salud y por permitirme culminar con satisfacción cada parte de este trabajo. A mis padres por estar presentes con sus palabras de apoyo y estar pendientes en todo lo que necesitaba en cada etapa de mis estudios. A mis profesores por brindarme sus conocimientos. A mis amigos por ayudarme con sus consejos. A la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo por formarme profesionalmente.

Mishell

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	xi
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	xii
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xiii
RESUMEN.....	xiv
ABSTRACT.....	xv
INTRODUCCIÓN.....	1

CAPÍTULO I

1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	2
1.1. Planteamiento del problema.....	2
1.2. Objetivos.....	3
1.2.1. <i>Objetivo general</i>	3
1.2.2. <i>Objetivos específicos</i>	3
1.3. Justificación.....	3
1.4. Hipótesis.....	4

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO.....	5
2.1. Antecedentes de investigación.....	5
2.2. Referencias teóricas.....	7
2.2.1. <i>Metales pesados</i>	7
2.2.2. <i>Cadmio</i>	7
2.2.2.1. <i>Usos</i>	8
2.2.2.2. <i>Efectos del cadmio sobre los seres vivos y el ambiente</i>	8
2.2.3. <i>Cromo</i>	9
2.2.3.1. <i>Usos</i>	9
2.2.3.2. <i>Efectos del cromo sobre los seres vivos y el ambiente</i>	10
2.2.4. <i>Tipos de aguas residuales industriales</i>	10
2.2.4.1. <i>Aguas residuales industriales inorgánicas</i>	11
2.2.4.2. <i>Aguas residuales industriales orgánicas</i>	11
2.2.5. <i>Tratamientos de eliminación de metales pesados en aguas contaminadas</i>	12
2.2.6. <i>Filtración por membrana</i>	12

2.2.7.	<i>Precipitación química</i>	13
2.2.8.	<i>Electrocoagulación</i>	12
2.2.9.	<i>Coagulación-floculación</i>	13
2.2.10.	<i>Electrofloculación</i>	13
2.2.11.	<i>Flotación</i>	13
2.2.12.	<i>Intercambio iónico</i>	14
2.2.13.	<i>Fotocatálisis</i>	14
2.2.14.	<i>Osmosis inversa</i>	14
2.2.15.	<i>Adsorción</i>	15
2.2.15.1.	<i>Tipos de adsorción</i>	15
2.2.16.	<i>Bioadsorción</i>	16
2.2.16.1.	<i>Ventajas de la bioadsorción</i>	17
2.2.16.2.	<i>Mecanismos de bioadsorción</i>	17
2.2.16.3.	<i>Tipos de bioadsorbentes</i>	20
2.2.16.4.	<i>Factores que influyen en la eficiencia de la bioadsorción</i>	23
2.2.17.	<i>Desorción de metales pesados de sorbentes</i>	28
2.2.17.1.	<i>Técnicas y mecanismos utilizados en la desorción de metales pesados</i>	28
2.2.18.	<i>Regulaciones y estándares de calidad del agua para metales pesados</i>	30
2.2.18.1.	<i>Normativa ecuatoriana</i>	30
2.2.19.	<i>Efluentes contaminados con metales pesados en Ecuador</i>	31
2.2.20.	<i>Cebolla paitaña (Allium Ceba)</i>	32
2.2.20.1.	<i>Clasificación botánica</i>	33
2.2.20.2.	<i>Morfología</i>	33
2.2.21.	<i>Espectrómetro de absorción atómica (AAS)</i>	34
2.2.21.1.	<i>Instrumentación y principio de funcionamiento</i>	34
2.2.22.	<i>Espectrómetro infrarrojo con transformada de Fourier (FTIR)</i>	35
2.2.22.1.	<i>Instrumentación y principio de funcionamiento</i>	36
2.2.22.2.	<i>Espectrómetro infrarrojo de transformada de fourier Jasco (FT/IR-4100)</i>	36

CAPÍTULO III

3.	MARCO METODOLÓGICO	38
3.1.	Descripción de enfoque	38
3.2.	Tipo de investigación	38
3.3.	Diseño de la investigación	38
3.4.	Identificación de variables	39
3.5.	Matriz de consistencia	39

3.6.	Operacionalización de las variables	40
3.7.	Localización de estudio	42
3.8.	Población de estudio.....	42
3.9.	Tamaño de la muestra	42
3.10.	Unidad de análisis	43
3.11.	Técnicas de recolección de datos.....	43
3.11.1.	<i>Obtención del bioadsorbente</i>	43
3.11.2.	<i>Selección y lavado de la cáscara de cebolla</i>	43
3.11.3.	<i>Secado, molienda y tamizado</i>	43
3.11.4.	<i>Caracterización del bioadsorbente</i>	43
3.11.4.1.	<i>Determinación del espectro FT-IR del bioadsorbente</i>	43
3.11.4.2.	<i>Determinación del pH del bioadsorbente</i>	44
3.11.4.3.	<i>Determinación humedad del bioadsorbente</i>	44
3.11.4.4.	<i>Prueba de cenizas totales</i>	44
3.11.4.5.	<i>Determinación de la densidad aparente del bioadsorbente</i>	45
3.11.4.6.	<i>Determinación de la densidad real del bioadsorbente</i>	45
3.11.4.7.	<i>Determinación de la porosidad del bioadsorbente</i>	45
3.11.5.	<i>Preparación de soluciones de cadmio y cromo</i>	46
3.11.6.	<i>Efecto de la concentración y el tamaño de partícula del bioadsorbente</i>	46
3.11.7.	<i>Estudio del tiempo de equilibrio</i>	47
3.11.8.	<i>Determinación de la cinética de adsorción</i>	47
3.11.9.	<i>Determinación del porcentaje de eficiencia de remoción</i>	47
3.12.	Análisis estadístico	48
3.13.	Materiales, equipos y reactivos	48

CAPÍTULO IV

4.	MARCO DE ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	50
4.1.	Caracterización del bioadsorbente	50
4.2.	Análisis FTIR del bioadsorbente	51
4.3.	Determinación del porcentaje de eficiencia de bioadsorción	52
4.3.1.	<i>Cálculo del porcentaje de adsorción de Cadmio (II)</i>	52
4.3.2.	<i>Cálculo del porcentaje de adsorción de Cromo (III)</i>	53
4.3.3.	<i>Análisis estadístico del proceso de bioadsorción de Cd (II) y Cr (III)</i>	54
4.4.	Tiempo de equilibrio	58
4.4.1.	<i>Cadmio</i>	58
4.4.2.	<i>Cromo</i>	59

4.5.	Cinética de adsorción	59
4.5.1.	Modelo pseudo-primer orden	60
4.5.1.1.	<i>Cadmio (II)</i>	60
4.5.1.2.	<i>Cromo (III)</i>	60
4.5.2.	Modelo pseudo-segundo orden	61
4.5.2.1.	<i>Cadmio (II)</i>	61
4.5.2.2.	<i>Cromo (III)</i>	62

CAPÍTULO V

5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	64
5.1.	Conclusiones	64
5.2.	Recomendaciones	65

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1:	Contaminantes del agua del sector industrial.....	10
Tabla 2-2:	Comparación entre fisorción y quimisorción	16
Tabla 2-3:	Materiales biosorbentes usados para la adsorción de metales pesados	21
Tabla 2-4:	Principales ventajas y desventajas del uso de biomasa viva y muerta en el proceso de adsorción	22
Tabla 2-5:	Límites de descargar al sistema de alcantarillado público	31
Tabla 2-6:	Límites de descarga a un cuerpo de agua dulce	31
Tabla 3-1:	Diseño experimental aplicado.....	38
Tabla 3-2:	Matriz de consistencia.....	39
Tabla 3-3:	Operacionalización de las variables.....	40
Tabla 4-1:	Caracterización del bioadsorbente	50
Tabla 4-2:	Resultados de las concentraciones finales de Cd (II) con la cáscara de cebolla ..	52
Tabla 4-3:	Resultados de las concentraciones finales de Cr (III) con la cáscara de cebolla .	53
Tabla 4-4:	Análisis de Varianza (ANOVA) del proceso de bioadsorción de Cadmio (II) a partir de la cáscara de cebolla.....	54
Tabla 4-5:	Prueba de Fisher en la bioadsorción de Cd (II).....	55
Tabla 4-6:	Análisis de varianza (ANOVA) del proceso de bioadsorción de Cromo (III) a partir de cáscara de cebolla.....	56
Tabla 4-7:	Prueba de Fisher en la bioadsorción de Cr (III)	57
Tabla 4-8:	Parámetros Modelo Pseudo-Primer Orden para Cd (II).....	60
Tabla 4-9:	Parámetros Modelo Pseudo-Primer Orden para Cr (III)	60
Tabla 4-10:	Parámetros Modelo Pseudo-Segundo Orden para Cd (II).....	61
Tabla 4-11:	Parámetros Modelo Pseudo-Segundo Orden para Cr (III)	62

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 2-1: Proceso de Adsorción	15
Ilustración 2-2: Preparación del biosorbente a partir de biomasa microbiana o de origen agrícola	17
Ilustración 2-3: Cebolla colorada	33
Ilustración 2-4: Espectrómetro de adsorción atómica Ice 3300	35
Ilustración 2-5: Espectrómetro FT/IR-4000	36
Ilustración 3-1: Ubicación de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo	42
Ilustración 4-1: Espectro de adsorción IR de la cáscara de cebolla.....	51
Ilustración 4-2: Diagrama de barras para la eficiencia de la bioadsorción de Cd (II)	56
Ilustración 4-3: Diagrama de barras para la eficiencia de la bioadsorción de Cr (III)	58
Ilustración 4-4: Tiempo de equilibrio Cadmio	58
Ilustración 4-5: Tiempo de equilibrio Cromo.....	59
Ilustración 4-6: Ajuste Modelo Pseudo-Primer Orden para Cadmio (II)	60
Ilustración 4-7: Ajuste Modelo Pseudo-Primer Orden para Cromo (III)	61
Ilustración 4-8: Ajuste Modelo Pseudo-Segundo Orden para Cadmio (II)	62
Ilustración 4-9: Ajuste Modelo Pseudo-Segundo Orden para Cromo (III)	62

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A: PREPARACIÓN DEL MATERIAL BIOADSORBENTE

ANEXO B: PREPARACIÓN DE SOLUCIONES DE CADMIO Y CROMO

ANEXO C: BIOADSORCIÓN DE CADMIO Y CROMO

ANEXO D: PROCESO DE BIOADSORCIÓN PARA DETERMINAR EL TIEMPO DE EQUILIBRIO

RESUMEN

La contaminación de cuerpos de agua por metales pesados es un creciente problema ambiental. Debido a esto, se crea la necesidad de investigar nuevas tecnologías y materiales capaces de eliminar estos contaminantes. En la presente investigación se analizó la eficiencia de la cáscara de cebolla (*Allium cepa*) como bioadsorbente de Cd (II) y Cr (III) en agua sintética. Se realizó como primer paso la recolección y caracterización mediante un análisis de FT-IR y pruebas fisicoquímicas del material bioadsorbente. En el proceso de bioadsorción se analizaron dos variables: la dosis (3, 6 y 9 g/L) y el tamaño de partícula (0,3 mm- 0,5 mm -2 mm) de la cáscara de cebolla, se prepararon soluciones con una concentración de 4 ppm de Cd y 7 ppm de Cr, con una agitación de 120 min y una velocidad de 120 rpm. Las muestras se analizaron mediante el uso del Espectrómetro de adsorción atómica iCE 3300 AAS y los porcentajes de remoción más eficientes fueron de 89,24 % para Cadmio y 91,95 % para Cromo con una dosis de 3 g/L y un tamaño de partícula de 0,3 mm respectivamente. Al realizar los análisis estadísticos se determinó que existe una diferencia significativa ($p < 0,05$) en la dosis, el tamaño de partícula y su interacción respecto a la bioadsorción de Cromo (III), por el contrario, para Cadmio (II) la interacción de las dos variables no presento influencia en el proceso de bioadsorción. Se realizó el estudio de la cinética de bioadsorción, alcanzando el equilibrio a los 15 min para Cd y 30 min para Cr, el proceso se acopla al modelo matemático de pseudo segundo orden para los dos metales. Se concluye que el material bioadsorbente en su forma natural tiene una excelente eficiencia para remover ambos metales.

Palabras claves: <BIOADSORCIÓN>, <CÁSCARA DE CEBOLLA>, <CADMIO>, <CROMO>, <CINÉTICA DE BIOADSORCIÓN>.

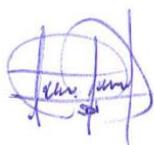
0020-DBRA-UPT-2024



ABSTRACT

The contamination of water bodies by heavy metals is a growing environmental problem. Due to this, there is a need to investigate new technologies and materials capable of eliminating these contaminants. In this research, the efficiency of onion peel (*Allium cepa*) as a bio-adsorbent of Cd (II) and Cr (III) in synthetic water was analyzed. Firstly, the bio-adsorbent material was collected and characterized by FT-IR analysis and physicochemical tests. In the bio-adsorption process, two variables were analyzed: the dose (3, 6, and 9 g/L) and the particle size (0.3 mm- 0.5 mm -2 mm) of the onion peel. Solutions were prepared with a concentration of 4 ppm of Cd and 7 ppm of Cr, with an agitation of 120 min and a speed of 120 rpm. The samples were analyzed using the iCE 3300 AAS atomic adsorption spectrometer. The most efficient removal percentages were 89.24 % for Cadmium and 91.95 % for Chromium with a dose of 3 g/L and a particle size of 0.3 mm respectively. The statistical analysis showed that there is a significant difference ($p < 0.05$) in the dose, particle size, and their interaction concerning the bio-adsorption of Chromium (III). Conversely, for Cadmium (II) the interaction of the two variables did not influence the bio-adsorption process. The study of the bio-adsorption kinetics was carried out, reaching equilibrium at 15 min for Cd and 30 min for Cr. The process is coupled to the pseudo-second-order mathematical model for the two metals. It is concluded that the bio-adsorbent material in its natural form has excellent efficiency in removing both metals.

Keywords: <BIO-ADSORPTION>, <ONION SHELL>, <CADMIUM>, <CHROMIUM>, <BIOADSORPTION KINETICS>.



Ing. Romel Francisco Calles Jiménez

0603877713

INTRODUCCIÓN

Con el avance de la industrialización a nivel global, han surgido retos medioambientales cada vez más significativos. Actualmente uno de los problemas más extendidos es la contaminación del agua debido a la presencia de metales pesados en los cuerpos de agua que no solo amenaza la fauna acuática, sino que también representa un riesgo para la salud humana, ya que estos metales pesados se acumulan a lo largo de la cadena alimentaria (Ali Redha, 2020, pp. 183-193).

En Ecuador, varios estudios han determinado la presencia de diferentes metales pesados en aguas superficiales, sedimentos, peces, suelos, cultivos, material particulado, entre otros, cuyos niveles superan las normas correspondientes, en algunos casos, lo que representa un alto riesgo para el ecosistema y la población (Aveiga et al., 2022, pp. 13-23).

Los métodos de bioadsorción se consideran alternativas sostenibles y altamente eficientes en la eliminación de metales pesados de medios acuosos (Ali Redha, 2020, pp. 183-193). El proceso de bioadsorción permite efectivamente que ciertos tipos de biomasa secuestren contaminantes orgánicos o inorgánicos capaces de unir y concentrar iones selectivos presentes en soluciones acuosas principalmente a una afinidad entre el adsorbato y el bioadsorbente.

La práctica de la tecnología de bioadsorción tiene las ventajas de bajo costo operativo, respeto al medio ambiente, mejor rendimiento, reutilización de bioadsorbentes, operación a corto tiempo, alta especificidad y ausencia de formación de contaminantes secundarios. Ciertas bacterias, algas, hongos, pieles de animales y frutas, residuos vegetales, lodos activados y biopolímeros son diferentes biosorbentes (Ord et al, 2023, pp. 2-14).

Los adsorbentes no-convencionales (verdes o bioadsorbentes) surgen del aprovechamiento de los materiales de desecho que provienen de la industria alimentaria y agrícola; estos son desechos de fruta, residuos vegetales y plantas. Diferentes tipos de biosorbentes agrícolas tales como hojas de té de desecho, bagazo de caña de azúcar, salvado de trigo, cáscara de arroz, cáscara de naranja, granos de café, cáscara de manzana, cáscara de plátano, cáscaras de coco, mazorca de maíz, tallos de algodón, entre otros, que han sido probados por varios investigadores para la remoción de varios metales pesados (Aliyu et al., 2022, pp. 266-273).

CAPÍTULO I

1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. Planteamiento del problema

El agua limpia y pura es un recurso esencial para la bebida, el riego, la industria, la recreación y también ayuda a generar energía; sin embargo, a lo largo de la historia humana, el agua ha sido mal utilizada y su calidad se ha deteriorado (Aveiga et al., 2022, pp. 13-23). Uno de los mayores problemas ambientales en los cuerpos de agua es la presencia de contaminantes químicos orgánicos e inorgánicos, destacándose en este último los metales pesados.

Los metales pesados más estudiados son el cromo (Cr), el cadmio (Cd), el zinc (Zn), el mercurio (Hg), el plomo (Pb), el níquel (Ni) y el arsénico (As) debido a sus características, especialmente su extrema toxicidad y su capacidad para acumularse, los metales pesados representan una amenaza significativa para los seres humanos, otros organismos vivos y los ecosistemas. En comparación con la materia orgánica, que se ve fuertemente afectada por la degradación biológica y química, los iones metálicos tienden a no descomponerse en componentes finales. Por lo tanto, la eliminación de estos elementos se ha considerado una tarea importante en las aplicaciones de purificación del agua (Jadaa y Mohammed, 2023, pp. 249-271).

El Cr está presente en la naturaleza en concentraciones bajas y es usado en diversos procesos biológicos necesarios para la vida. Tanto el Cr III como el VI se usan además en procesos industriales, como curtientes, pigmentos y conservantes textiles, catalizadores, agentes anticorrosivos, conservantes de madera, aleaciones, pinturas anti-incrustantes, lodos de perforación, baterías de alta temperatura, fungicidas, recubrimientos metálicos y electro galvanizados. Una vez expulsado al medio natural el Cr pasa a formar parte del suelo y el agua, existiendo la posibilidad de ingresar al organismo por vía oral, nasal y tópica (Castillo et al., 2021, p.1).

La exposición al Cd en humanos proviene principalmente de la ingesta de alimentos contaminados y del humo de los cigarrillos. Sin embargo, también puede ocurrir a través de cañerías cuyas soldadoras contienen cadmio, o bien, por el consumo de agua contaminada por fábricas y otras actividades antropogénicas como la minero-metalúrgica de metales no ferrosos, la metalúrgica del hierro y acero, la fabricación de fertilizantes fosfatados, la incineración de residuos de madera, carbón o plásticos, la combustión de aceite y gasolina; en todo caso

los desechos de estas actividades normalmente se vierten en cuerpos de agua dulce por arrastre o lixiviación (Octavio-Aguilar y Olmos-Palma, 2022, pp. 43-48).

Entre los diversos métodos existentes para el control de este tipo de metales podemos encontrar métodos tales como: precipitación, oxido-reducción, intercambio iónico, filtración, tratamiento electroquímico, tecnologías de membrana y recuperación por evaporación, adsorción y bioadsorción. Este último, surge como una alternativa que llama la atención en la remoción de iones de metales pesados en los efluentes industriales, ya que, es una tecnología que permite no solo removerlos, si no también, darle un tratamiento a los desechos agrícolas que antes no tenían ninguna utilidad, además, estos materiales bioadsorbentes son de bajo costo y fácil adquisición (Pabón et al., 2020, pp. 9-18).

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Evaluar la eficiencia de la bioadsorción de Cadmio (II) y Cromo (III) en aguas contaminadas a nivel de laboratorio mediante la utilización de cáscara de cebolla (*Allium cepa*).

1.2.2. Objetivos específicos

- Realizar pruebas fisicoquímicas para caracterizar el material bioadsorbente (cáscara de cebolla).
- Identificar la combinación óptima entre los diferentes tamaños de partículas y dosis del material bioadsorbente que permita la máxima capacidad de bioadsorción.
- Determinar el porcentaje de remoción de los metales pesados Cd y Cr en una solución acuosa sintética.

1.3. Justificación

La presencia de metales pesados tóxicos en los efluentes industriales es motivo de preocupación medioambiental. Los metales pesados son generalmente tóxicos, altamente solubles en agua y pueden ingresar fácilmente hacia el suelo y las corrientes de agua, causando así daños al medio ambiente y la salud humana (Yusuff et al., 2021, pp. 570-578).

Por lo tanto, el efluente industrial necesita ser tratado a fondo para cumplir con los límites establecidos por la legislación antes de su descarga a una fuente de agua de lo contrario, los

efluentes no sólo contaminan el medio ambiente, sino también amenazan la salud pública, limitando las actividades productivas (Hussain et al., 2021, pp. 1-7).

Los subproductos de la agricultura están generando gran interés debido a su bajo costo, disponibilidad y amigabilidad con el medio ambiente. Además, utilizar residuos agrícolas para purificar el agua proporciona una forma de reducir la eliminación de residuos sólidos. La cebolla es un ingrediente común y clave que se usa en varias recetas preparadas en todo el mundo y la cáscara sobrante generalmente se desecha. Las cáscaras son ricas en nutrientes y se utilizan a menudo en el compostaje y pueden utilizarse eficazmente como bioadsorbentes (Opute, 2018, p.1).

Es por eso la intención de realizar la presente investigación es detallar la eficiencia de cáscara de cebolla como bioadsorbente en la eliminación de metales pesados (Cd) y (Cr) a partir de soluciones acuosas sintéticas. Además, de servir de información a las industrias que generan estos metales para que trabajen en la implementación de tecnologías y procesos más ecológicos.

1.4. Hipótesis

La cáscara de cebolla tendrá una eficiencia significativa en la remoción de Cadmio (II) y Cromo (III) en aguas contaminadas a nivel de laboratorio.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de investigación

Entre los trabajos de investigación en relación a la bioadsorción de metales se encuentra el de (Lucín y Ramirez 2021) con el objetivo principal de evaluar la efectividad de las biomásas de frutas cítricas, específicamente de naranja (*Citrus sinensis*) y mandarina (*Citrus reticulata*), previamente tratadas con NaOH y CaCl₂, en la remoción de metales pesados como Cadmio y Plomo de muestras de agua. Se utilizaron dosis diferentes de los bioadsorbentes, 4, 8 y 12 g/L para la cascara de naranja y 3, 7 y 11 g/L para la mandarina, como variables independientes. Entre las siete pruebas realizadas, se observó que para el Cadmio, ambas biomásas fueron efectivas, siendo la mandarina con 3 gramos de biomasa la más eficiente con una remoción del 90,33%. Sin embargo, en el caso del Plomo, no se obtuvieron resultados satisfactorios debido al pH neutro de las biomásas, sugiriendo que sería más efectivo realizar el tratamiento en un rango de pH ácido entre 4 y 5. Se observaron reducciones en algunos parámetros fisicoquímicos, como el pH, la turbidez, la conductividad eléctrica y el oxígeno disuelto, que se mantuvieron dentro de los límites establecidos por la normativa ambiental vigente. No obstante, se registró un aumento en los sólidos disueltos totales debido al contacto de la muestra con la biomasa pulverizada.

Por su parte (Lema y Pérez 2021) investigaron la capacidad y porcentaje de adsorción del cromo hexavalente en aguas sintéticas utilizando cáscaras de naranja y limón como bioadsorbentes. Para ello, se llevó a cabo la caracterización de las cáscaras mediante técnicas de ATR-FTIR y análisis elemental. Posteriormente, se determinaron el modelo cinético y las isotermas de adsorción, realizando un análisis comparativo entre ambos bioadsorbentes. El procedimiento consistió en poner en contacto las cáscaras de naranja y limón con una solución de cromo hexavalente durante un tiempo específico y con agitación constante. Se realizaron diversas pruebas variando las condiciones de pH, tamaño de partícula y concentración de bioadsorbente. Para medir la concentración final de cromo hexavalente, se utilizó la técnica de colorimetría con el acomplejante 1,5-Difenilcarbazida mediante espectroscopia UV-Vis. Los resultados mostraron que las mejores condiciones para el proceso de adsorción de Cr (6+) utilizando cáscaras de naranja y limón fueron un tamaño de partícula inferior a 0,5 mm, pH de 3 y una cantidad de bioadsorbente de 8 g/L. Bajo estas condiciones, la cáscara de naranja alcanzó un porcentaje de adsorción del 64,99 %, mientras que la cáscara de limón logró un 70,59 % de adsorción. Estos datos se ajustaron al modelo cinético de pseudo-segundo orden e isoterma de Langmuir.

Asimismo (Bonilla, Ortiz y Vega 2023) evaluaron la capacidad de absorción de partículas de polvo de cáscara de plátano manzano y naranja, con un tamaño de partícula de 0,3150 mm, en agua contaminada con plomo y cobre. Estos estudios se llevaron a cabo en condiciones normales de temperatura y agitación constante a 100 rpm. El procedimiento experimental consistió en dos etapas. En el primer estudio, se utilizaron concentraciones de 5%, 10% y 15% de cada bioadsorbente en polvo de cáscara de naranja y plátano manzano, en una muestra de 500 mL de agua cruda. En el segundo estudio, se prepararon soluciones patrón con diferentes concentraciones, comenzando con 5000 ppm, 8000 ppm y 10000 ppm de los cuales se tomaron muestras de 10 ppm, 20 ppm y 30 ppm de cada bioadsorbente. Los resultados más destacados se obtuvieron utilizando la solución patrón de 8000 ppm y una muestra de 30 ppm. Con el polvo de cáscara de naranja, se logró una remoción del 91,60% de plomo y del 78,11% de cobre, con una capacidad máxima de adsorción de 0,075 mg/g para el cobre y 0,1284 mg/g para el plomo. Por otro lado, con el polvo de cáscara de plátano manzano, se obtuvo una remoción del 93,47% de plomo y del 85,71% de cobre, con una capacidad máxima de adsorción de 0,082 mg/g para el cobre y 0,1311 mg/g para el plomo. Además, al combinar ambos bioadsorbentes, se logró una remoción del 72,27% de cobre, con una capacidad máxima de adsorción de 0,069 mg/g para el cobre.

Además (Collantes 2019) llevaron a cabo una investigación para evaluar la capacidad de biosorción de la cáscara de naranja y la vaina de taya como materiales biosorbentes de plomo, a partir de soluciones acuosas. Para ello, se diseñó un sistema continuo en columna de lecho fijo, utilizando 5 módulos empaquetados previamente con cáscara de naranja y vaina de taya. Se estudió la influencia de la concentración inicial de la solución de plomo (0 ppm, 50 ppm, 100 ppm y 150 ppm) y el tipo de biosorbente, manteniendo constantes variables como la masa de biosorbente (60 g), el tamaño de partículas (entre 0.630 mm y 0.400 mm), el pH (4.5), la velocidad de flujo (5 mL/min) y la duración del proceso (120 minutos). Los resultados obtenidos demostraron la efectividad de ambas biomásas como biosorbentes de plomo, con valores de porcentaje de remoción superiores al 95 % para la cáscara de naranja y superiores al 80 % para la vaina de taya. Se observó que ambas biomásas presentaron capacidades de biosorción similares, lo que sugiere que podrían ser aplicadas a nivel industrial para el tratamiento de aguas contaminadas por metales pesados, debido a su alto rendimiento en la remoción de plomo.

(Belete 2019) en su estudio evaluó la eficiencia y capacidad de la cáscara de cebolla en la adsorción de iones de plomo y cobre de las aguas residuales de la industria textil Ayka Addis. Se realizaron experimentos por lotes para optimizar los parámetros de adsorción y evaluar la captación de metales de aguas residuales sintéticas preparadas a partir de nitrato de plomo y sulfato de cobre. La adsorción se estudió en diferentes parámetros de adsorción, a saber: pH,

tiempo de contacto, concentración inicial de iones metálicos y dosis de adsorbente. Se encontró que el pH óptimo para el cobre fue 6 y para el plomo fue 5, la concentración inicial de iones metálicos fue de 50 mg/L, la dosis de adsorbente fue de 1 gramo y el tiempo de contacto fue de 30 minutos. En las condiciones óptimas, la eficiencia de eliminación de la cáscara de cebolla en la adsorción de plomo y cobre de aguas residuales sintéticas fue del 98.9% y 95.9%, respectivamente, y de aguas residuales reales fue del 80.2% y 78.9%, respectivamente. El modelo de isoterma de adsorción de Freundlich se ajustó bien a los datos experimentales para ambos metales. Los resultados indican que la adsorción de Pb^{+2} y Cu^{+2} tiene lugar mediante una adsorción multicapa en una superficie heterogénea del adsorbente. A partir de los resultados experimentales, se puede concluir que la cáscara de cebolla es un adsorbente potencial para la eliminación de iones de plomo y cobre en las aguas residuales de la industria textil.

2.2. Referencias teóricas

2.2.1. Metales pesados

Según la tabla periódica, los metales pesados son elementos químicos que tienen una alta densidad (superior a 4 g/cm^3), poseen una masa y peso atómico superiores a 20, además son tóxicos cuando se encuentran en concentraciones bajas (Pabón et al., 2020, pp. 9-18). Existen cuatro grupos en los que se pueden clasificar los metales pesados según su actividad biológica y toxicológica. El primer grupo abarca los metales pesados que poseen una toxicidad evidente y se encuentran ampliamente distribuidos en el medio ambiente, como el arsénico, cadmio, plomo, mercurio y uranio. El segundo grupo comprende los metales traza esenciales, que son cromo, cobalto, manganeso, selenio y zinc, y son requeridos en pequeñas cantidades para el adecuado funcionamiento del organismo. En el tercer grupo se encuentran los metales de importancia biológica, como el níquel y el vanadio, los cuales desempeñan un papel relevante en diversos procesos biológicos. Por último, se mencionan los metales con interés farmacológico, que incluyen aluminio, galio, litio y platino, y son de relevancia en aplicaciones médicas y farmacéuticas (Días y López, 2021, pp. 11-130).

2.2.2. Cadmio

El cadmio posee un peso atómico de 112,4 g/mol, un radio de Van der Waals de 158 pm, un valor de electronegatividad de 1,69 y un estado de oxidación de +2. El Cadmio es un metal que se caracteriza por presentar excelente resistencia a la corrosión, baja temperatura de fusión, alta ductilidad, conductividad térmica y eléctrica. Se encuentra en forma natural en la corteza terrestre y combinado con otros elementos como el oxígeno (óxido de cadmio), el cloro (cloruro de cadmio) o el sulfuro (sulfato o sulfuro de cadmio) (Gaviola et al., 2019, pp. 5-16).

2.2.1.1. Usos

- Preparación del cadmio por procesado del zinc, cobre o plomo.
- Fabricación de acumuladores de níquel - cadmio.
- Fabricación de pigmentos (de cadmio) para pinturas, esmaltes, materias plásticas, papel, caucho, pirotecnia.
- Fabricación de lámparas fluorescentes.
- Cadmiado electrolítico.
- Soldadura y oxicorte de piezas con cadmio.
- Procesado de residuos que contengan cadmio.
- Fabricación de barras de control de reactores nucleares.
- Fabricación de células fotoeléctricas.
- Fabricación de electrodos para soldadura.
- Trabajos en horno de fundición de hierro o acero.
- Fusión y colada de vidrio.
- Aplicación por proyección de pinturas y barnices que contengan cadmio.
- Barnizado y esmaltado de cerámica.
- Tratamiento de residuos peligrosos en actividades de saneamiento ambiental.
- Fabricación de pesticidas.
- Fabricación de amalgamas dentales (en desuso).
- Fabricación de joyas.

2.2.1.2. Efectos del cadmio sobre los seres vivos y el ambiente

El aumento de la concentración de cadmio en el cuerpo humano conlleva muchos daños, incluyendo la insuficiencia renal, por lo que el cuerpo almacena la gran mayoría del cadmio en los riñones, así como en el hígado y los órganos genitales. El cadmio también tiene efectos tóxicos en el sistema esquelético, el sistema respiratorio y el sistema nervioso, y está clasificado como un carcinógeno humano (Mahdi et al., 2021, pp. 1-4).

En los organismos acuáticos, como peces, crustáceos y moluscos, son especialmente sensibles al cadmio. Puede afectar la respiración, el crecimiento, la reproducción y el sistema inmunológico de estos organismos. Además, el cadmio se bioacumula en los tejidos de los animales acuáticos a medida que se alimentan de otros organismos contaminados, lo que puede llevar a niveles peligrosos en la cadena alimentaria (Vivek et al., s.f., pp. 4172-4185.).

El cadmio puede acumularse en el suelo a través de la deposición atmosférica, la aplicación de fertilizantes o enmiendas contaminadas, y el vertido de residuos industriales. Una vez en el suelo, el cadmio puede persistir durante mucho tiempo y afectar la calidad del suelo. Esto puede reducir la fertilidad del suelo, afectar negativamente el crecimiento de las plantas y contaminar los cultivos (Genchi et al., 2020, pp. 1-24).

2.2.3. *Cromo*

El Cromo (Cr) con número atómico es 24, peso molecular 51,1 y su densidad de 7.19 g/cm³ es un metal de color blanco plateado, brillante, duro y quebradizo, resistente a la corrosión. Los compuestos de Cromo pueden encontrarse en colores que van desde el amarillo, naranja hasta rojo oscuro. Además, no presentan ningún sabor u olor asociados (Gaviola, et al., 2019, pp. 5-16). Es un elemento de la tabla periódica, perteneciente a los metales de transición, concretamente al grupo 6 y al período 4. Suele presentarse como cromo metálico o en estados de oxidación: (+2), (+3), (+6), normalmente se encuentra en estados (+3) y (+6). Además, se puede encontrar en condiciones especiales en los estados de oxidación: (+4) y (+5). A nivel biológico, el Cr (VI) se desplaza hacia el Cr (III) en presencia de sustancias reductoras como la materia orgánica. Es un nutriente ultra traza para los seres humanos, debido a que es necesario, pero no en altas concentraciones (Mérida, s.f., pp. 3-19).

2.2.1.3. *Usos*

- Preparación, empleo y manipulación de los compuestos de cromo, en especial los cromatos, dicromatos alcalinos y el ácido crómico.
- Fabricación de catalizadores, productos químicos para la curtición, y productos de tratamiento de la madera que contengan compuestos de cromo.
- Fabricación y empleo de pigmentos, colorantes y pinturas a base de compuestos de cromo.
- Aserrado y mecanizado de madera tratada con compuestos de cromo.
- Aplicación por proyección de pinturas y barnices que contengan cromo.
- Curtido al cromo de pieles.
- Preparación de clichés de fotograbado por coloides bicromados.
- Galvanoplastia y tratamiento de superficies de metales con cromo.
- Decapado y limpieza de metales y vidrios (ácido sulfocrómico o ácido crómico).
- Fabricación de cromatos alcalinos.
- Litograbados.
- Fabricación de aceros inoxidable.

- Trabajos que implican soldadura y oxicorte de aceros inoxidable.
- Fabricación de cemento y sus derivados.
- Procesado de residuos que contengan cromo

2.2.1.4. *Efectos del cromo sobre los seres vivos y el ambiente*

Los estudios sobre la toxicidad del Cr (III) han demostrado que grandes cantidades de Cr (III) ingerido afectan la absorción de elementos traza en animales y dañan el cerebro, los riñones y el hígado. En comparación con el Cr (III), el Cr (VI) es más tóxico para el suelo, los microorganismos, las plantas, los animales y los seres humanos. El Cr (VI) afecta el pH del suelo y las actividades enzimáticas, lo que conduce a una fertilidad del suelo reducida; provoca daño oxidativo, daño al ADN y muerte de microorganismos intolerantes al cromo; afecta la actividad enzimática y la fotosíntesis de las plantas, lo que resulta en un crecimiento deficiente y una disminución de los rendimientos (Ao et al., 2022, p.1); y se acumula en tejidos y órganos de animales, lo que provoca toxicidad aguda o crónica y carcinogénesis. La exposición directa de los seres humanos al Cr (VI) provoca envenenamiento y cáncer, pero el Cr (VI) también se acumula en plantas y animales y entra en el cuerpo humano indirectamente a través de la cadena alimentaria y otras formas, lo que provoca efectos perjudiciales en el organismo humano.

2.2.4. *Tipos de aguas residuales industriales*

Existen muchos tipos de aguas residuales industriales que varían según las distintas industrias y los contaminantes; cada sector produce su propia combinación particular de contaminantes.

Tabla 2-1: Contaminantes del agua del sector industrial

Sector	Contaminantes
Hierro y acero	DBO, DQO, aceite, metales, ácidos, fenoles y cianuro
Textiles y cuero	DBO, sólidos, sulfatos y cromo
Pulpa y papel	DBO, DQO, sólidos, compuestos organoclorados
Petroquímica y refinerías	DBO, DQO, aceites minerales, fenoles y cromo.
Químicos	DQO, químicos orgánicos, metales pesados, SS y cianuro
Metales no ferrosos	Flúor y SS

Microelectrónica	DQO y productos químicos orgánicos
Minería	SS, metales, ácidos y sales.

Fuente: (Shi, 2018).

Realizado por: Zambrano, M., 2023.

Generalmente, las aguas residuales industriales se pueden dividir en dos tipos: aguas residuales industriales inorgánicas y aguas residuales industriales orgánicas.

2.2.1.5. *Aguas residuales industriales inorgánicas*

Las aguas residuales industriales inorgánicas se producen principalmente en la industria del carbón y del acero, en la industria de minerales no metálicos y en empresas comerciales e industrias para el procesamiento superficial de metales (obras de recogida de hierro y plantas de galvanoplastia). Estas aguas residuales contienen una gran proporción de materia suspendida, que puede eliminarse mediante sedimentación, a menudo junto con la floculación química mediante la adición de sales de hierro o aluminio, agentes floculantes y algunos tipos de polímeros orgánicos (Shi, 2018, p.4).

2.2.1.6. *Aguas residuales industriales orgánicas*

Las aguas residuales industriales orgánicas contienen el flujo de residuos industriales orgánicos de aquellas industrias químicas a gran escala que principalmente utilizan sustancias orgánicas para reacciones químicas. Los efluentes contienen sustancias orgánicas con diversas procedencias y propiedades. Estas solo pueden eliminarse mediante un tratamiento especial previo de las aguas residuales, seguido de un tratamiento biológico. La mayoría de las aguas residuales industriales orgánicas son producidas por las siguientes industrias y plantas (Shi, 2018, p.5):

- Fábricas que fabrican productos farmacéuticos, cosméticos, colorantes orgánicos, pegamentos y adhesivos, jabones, detergentes sintéticos, pesticidas e herbicidas;
- Curtiembres y fábricas de cuero;
- Fábricas textiles;
- Plantas de celulosa y papel;
- Fábricas de la industria de la refinación de petróleo;
- Fábricas de cerveza y fermentación;
- Industria de procesamiento de metales.

2.2.5. Tratamientos de eliminación de metales pesados en aguas contaminadas

Hasta la fecha, se han desarrollado diferentes procesos para eliminar varios elementos metálicos de las aguas residuales antes de que ingresen al flujo de agua. Estos procesos incluyen el intercambio iónico, la coagulación y floculación, la adsorción, la filtración por membrana y la precipitación química. Estos procesos suelen ubicarse en diferentes etapas en las plantas de tratamiento de aguas residuales (Ayob et al., 2021, pp. 249-265, p.2).

2.2.6. Filtración por membrana

La tecnología de membranas es una técnica ampliamente adoptada para la separación, clarificación, desmineralización y purificación de agua. La membrana puede ser definida como una película sintética que separa dos fases al restringir o permitir el paso de diversos componentes de manera selectiva, el movimiento de las moléculas a través de las membranas es el resultado del movimiento convectivo o difusión de las moléculas. Las membranas están principalmente regidas por diferentes gradientes de fuerza, como presión osmótica, concentración, presión aplicada, eléctrica y térmica, o la combinación de estas fuerzas impulsoras. Por ejemplo, una envoltura de membrana puede ser no porosa o porosa, anisotrópica o isotrópica, y cargada eléctricamente o neutra (Salman et al., 2022, pp. 1-25).

2.2.7. Electrocoagulación

La electrocoagulación es un método electroquímico para el tratamiento de residuos en el que en el ánodo se liberan coagulantes activos en forma de iones metálicos (generalmente aluminio o hierro) en la solución, mientras que en el cátodo ocurre una reacción de electrólisis en forma de liberación de gas hidrógeno. Las técnicas de electrocoagulación tienen varias ventajas, como equipos simples, fácil operación y tiempos de reacción cortos. Además, durante el proceso de electrocoagulación, el contenido de sal no aumenta significativamente como ocurre con el procesamiento químico, por lo que el pH tiende a ser constante. Los principios básicos de la electrocoagulación son las reacciones de reducción y oxidación (redox). En una celda de electrocoagulación, ocurre un evento de oxidación en el electrodo (+), es decir, el ánodo, mientras que la reducción ocurre en el electrodo (-), es decir, el cátodo. La reacción involucrada en la electrocoagulación, además del electrodo, es el agua tratada, que funciona como una solución electrolítica. La electrocoagulación es capaz de eliminar varios tipos de contaminantes en el agua, como partículas suspendidas, metales pesados, colorantes y diversas sustancias dañinas (Rusdianasari et al., 2019, pp. 1-8).

2.2.8. Coagulación-floculación

La coagulación-floculación del agua se lleva a cabo con el objetivo de aglomerar partículas finas y coloides en partículas más grandes para reducir la turbidez, la materia orgánica natural y otros contaminantes orgánicos e inorgánicos solubles en las aguas residuales. Este proceso se compone de dos etapas distintas: primero se realiza una mezcla rápida del coagulante disperso en el agua/aguas residuales a tratar mediante agitación violenta, seguido de la floculación para la aglomeración de partículas pequeñas en flóculos bien definidos mediante agitación suave. Finalmente, los flóculos se permiten asentar y luego se eliminan como lodo, mientras que el agua/aguas residuales tratadas (supernatante) se transfieren al siguiente proceso de tratamiento o para su descarga en un curso de agua (Teh et al., 2018, p.2).

2.2.9. Precipitación química

La precipitación es un proceso químico en el que se eliminan iones metálicos solubles indeseables y ciertos aniones del agua o aguas residuales mediante su conversión a una forma insoluble. Es una técnica de tratamiento comúnmente utilizada para la eliminación de metales pesados, fósforo y dureza. El procedimiento implica alterar el equilibrio iónico para producir precipitados insolubles que pueden ser fácilmente removidos por sedimentación. La precipitación química siempre se sigue de una operación de separación de sólidos que puede incluir coagulación y/o sedimentación, o filtración para eliminar los precipitados. El proceso puede ser precedido por una reducción química para cambiar las características de los iones metálicos a una forma que pueda ser precipitada (Lawrence et al., 2019, pp. 141-197).

2.2.10. Electroflocculación

La técnica de electroflocculación es uno de los tratamientos electroquímicos más simples y eficientes adoptados para purificar diversos tipos de agua y efluentes industriales. Esta técnica utiliza equipos simples y fáciles de operar que reducen la cantidad de lodo generado. Se genera un coagulante mediante la oxidación electrolítica de un ánodo adecuado, que conduce eléctricamente el material al pH adecuado hacia un hidróxido metálico insoluble, capaz de eliminar una amplia gama de contaminantes (Andrade et al., 2020, p.6).

2.2.11. Flotación

La flotación iónica implica la eliminación de iones inactivos en la superficie de soluciones acuosas mediante la adición de surfactantes o colectores, generalmente con un ion de carga

opuesta a la del metal a ser removido. Los colectores son un tipo de surfactante que aumenta la hidrofobicidad natural de la superficie, mejorando la separabilidad de las partículas hidrofóbicas e hidrofílicas. A medida que las concentraciones respectivas se incrementan, esto puede llevar a la precipitación del producto flotable ión-surfactante antes de que se pase aire. El método de flotación iónica se utilizó para remover iones metálicos de soluciones que contienen bajas concentraciones de metales pesados, los cuales pueden ser generados por cualquier proceso industrial: trabajos con metales, semiconductores, industrias metalúrgicas y aguas mineras (Kyzas y Matis, 2018, p.6).

2.2.12. Intercambio iónico

El procedimiento de este tratamiento se basa en un reemplazo de iones disueltos como sulfuros, nitratos o fluoruros y se intercambian por iones de carga parecida. Para ello, el agua residual se dispone en un intercambiador que puede ser tanto catiónico como aniónico. El proceso consiste en un intercambio electrostático entre los grupos funcionales del sólido y la resina, lo que conlleva a una desmineralización (Ortega Ramírez y Sánchez Rodríguez, 2021, pp. 121-134). El uso de reactivos químicos es una de las desventajas del método de intercambio iónico, ya que la resina puede generar contaminantes secundarios. Además, debido a los altos costos operativos, no se puede utilizar a gran escala en el tratamiento de aguas residuales (Ameri et al., 2020, p.1).

2.2.13. Fotocatálisis

El método fotocatalítico se basa en una sustancia que acelera la reacción sin agotar ni cambiar los reactivos, esta sustancia se conoce como catalizador y acelera un proceso al aumentar la energía de activación necesaria y la velocidad de reacción sin participar activamente en la reacción. El tratamiento del agua utilizando el enfoque fotocatalítico ha recibido recientemente mucho interés debido a sus características como un excelente rendimiento, funcionamiento a presión y temperatura ambiente, bajos costos y la falta de formación de residuos secundarios, el proceso fotocatalítico es una tecnología contemporánea y ecológicamente benigna utilizada en el tratamiento del agua (Al-Nuaim et al., 2022, pp. 677-701).

2.2.14. Osmosis inversa

En esta técnica el agua residual atraviesa la membrana en donde su posición cambia desde la zona más concentrada hasta la más diluida. En ese transcurso, se va a presenciar una presión diferencial. Por ende, el agua va a tener un movimiento inverso. Logrando así que los

contaminantes emergentes queden en la zona diluida y el agua se encuentre potabilizada (Al-Nuaim et al., 2022, pp. 677-701).

2.2.15. Adsorción

La adsorción es un proceso con un mecanismo sencillo para la eliminación de contaminantes orgánicos e inorgánicos. Cuando una solución que contiene un soluto absorbible entra en contacto con algunas partículas externas que tienen tendencia a atraer el soluto absorbible, las fuerzas de interacción líquido-sólido hacen que el soluto absorbible se deposite en la superficie de la partícula externa. Esta acumulación de soluto absorbible en la superficie de otra partícula se llama adsorción. El soluto absorbido se llama adsorbato y la partícula que ha absorbido el soluto se llama adsorbente. De otra manera, la adsorción también se conoce como un proceso de transferencia de masa en el cual la masa de la fase líquida se transfiere a la fase sólida externa añadida en ella (Rathi y Kumar, 2021, p. 95).

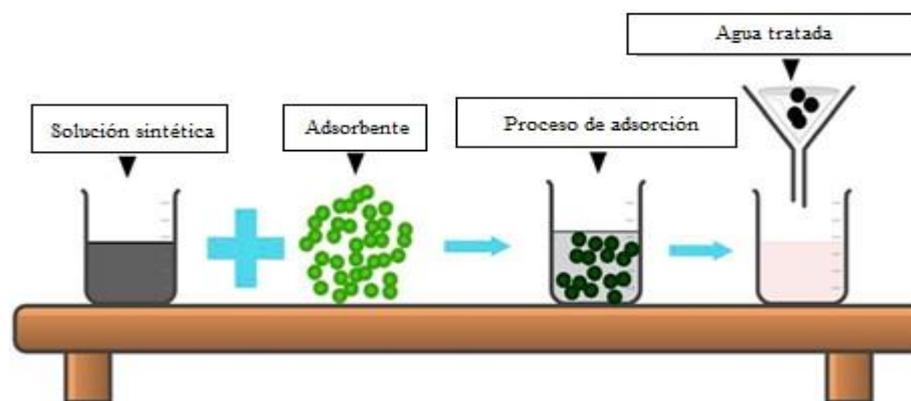


Ilustración 2-1: Proceso de Adsorción

Fuente: (Rathi & Kumar, 2021).

2.2.1.7. Tipos de adsorción

- **Adsorción física**

Ocurre debido a las fuerzas de atracción intermoleculares entre las moléculas del adsorbato y el adsorbente. La fuerza de atracción es una fuerza física llamada fuerza de Van der Waals. La adsorción en múltiples capas puede ocurrir en el adsorbente y puede interrumpirse fácilmente con el aumento de la temperatura.

- **Adsorción química**

Se origina como resultado de la interacción química entre las moléculas del adsorbato y el adsorbente. En la adsorción química, puede haber transferencia o compartición de electrones o la formación de enlaces químicos entre las moléculas. Por lo tanto, tiene lugar la adsorción en una sola capa (monocapa) (Dhakal y Dikshya, 2018a, pp. 1-116).

Tabla 2-2: Comparación entre fisisorción y quimisorción

Propiedades	Fisisorción	Quimisorción
Tipo de fuerzas de unión	Van Der Wals	Similar al enlace químico
Calor de adsorción	Bajo	Bajo Alto
Cambio químico de adsorción	Ninguno	Formación de un compuesto de superficie
Reversibilidad	Reversible	Irreversible
Energía de activación	Muy baja	Alta
Formación de multicapa	Si	No

Fuente:(Ayob et al. 2021).

Realizado por: Zambrano, M., 2023.

2.2.16. Bioadsorción

La bioadsorción se puede definir como un proceso fisicoquímico metabólicamente pasivo simple involucrado en la unión de iones metálicos (bioadsorbato) a la superficie del bioadsorbente que es de origen biológico. La eliminación biológica incluye el uso de microorganismos, materiales de origen vegetal, residuos agrícolas o industriales, biopolímeros, etc. Es un proceso rápido reversible involucrado en la unión de iones a los grupos funcionales presentes en la superficie del biosorbente en soluciones acuosas mediante diversas interacciones en lugar de oxidación a través del metabolismo aeróbico o anaeróbico (Torres, 2020, pp. 2-23).

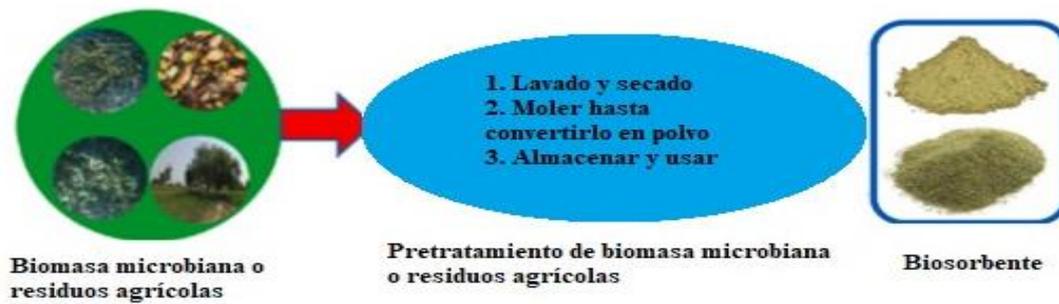


Ilustración 2-2: Preparación del biosorbente a partir de biomasa microbiana o de origen agrícola

Fuente: (Bayuo et al., 2023, pp. 13052-13093).

2.2.1.8. *Ventajas de la bioadsorción*

Las posibles ventajas de la bioadsorción sobre otras técnicas convencionales para la eliminación de metales pesados de las aguas residuales son (Olawale, 2020, pp. 22-25):

- Disponibilidad de una gran cantidad de biomateriales de bajo costo;
- Cinética rápida que garantiza tiempos de procesamiento cortos para un gran volumen de desechos;
- Casi nula generación de lodos;
- Baja demanda de energía;
- Bajo consumo de productos químicos costosos;
- Relativamente alta eficiencia a bajas y altas concentraciones de metal;
- Baja demanda de capital debido a la disponibilidad de biomateriales económicos;
- Alta posibilidad de regenerar y reutilizar los bioadsorbentes;
- Adecuada para casi todos los metales con alta recuperación;
- Los metales pueden ser removidos en presencia de otro ion.

2.2.1.9. *Mecanismos de bioadsorción*

El mecanismo de bioadsorción es un proceso complejo que implica la unión del sorbato al bioadsorbente. Varios materiales que se encuentran de forma natural, incluidos los desechos agrícolas, se pueden utilizar como bioadsorbentes que implican la unión de iones metálicos mediante varios mecanismos que incluyen quelación, complejación, intercambio iónico, micro-precipitación y la reducción.

Factores que afectan el mecanismo de bioadsorción (Kanamarlapudi et al., 2018, pp. 11-150):

- Las características químicas, estereoquímicas y de coordinación de los iones metálicos, como el peso molecular, el radio iónico y el estado de oxidación de las especies metálicas objetivo.
- Las propiedades del bioadsorbente, es decir, la estructura y naturaleza (en el caso de microorganismos, si están vivos o no vivos).
- El tipo de sitio de unión (ligando biológico).
- Los parámetros del proceso, como el pH, la temperatura, la concentración del bioadsorbato y bioadsorbente, y otros iones metálicos competidores.
- La disponibilidad de los sitios de unión.
- Los efectos combinados de los parámetros anteriores influyen en la especiación de los metales (la formación de nuevas formas de metal como resultado de la biosorción).

2.2.17. Quelación

La quelación es un mecanismo en el cual un agente complejo orgánico (quelante) se une a los iones metálicos en más de un lugar al mismo tiempo para formar una estructura en forma de anillo. Las moléculas de un compuesto orgánico que forman este tipo de coordinación se llaman ligandos, y la asociación de ligandos y metal se denomina complejo de coordinación. Un aumento en los complejos de coordinación en las superficies minerales debilita la unión del metal o catión con la red cristalina, lo que resulta en su disolución. Los quelatos forman varias uniones con el ion metálico en más de un lugar en comparación con los complejos, por lo tanto, los quelatos son más estables (Kanamarlapudi et al., 2018, pp. 11-150).

2.2.18. Complejación

La complejación es un proceso en el cual dos o más especies se asocian y forman un complejo. Cuando se forman complejos de iones metálicos y ligandos de tal manera que el átomo de metal único ocupa la posición central, se les llama complejos mononucleares. Cuando más de un ion metálico está presente en el centro, se forma un complejo polinuclear. Durante la formación de complejos polinucleares, en función del número de ligandos de unión involucrados, el átomo de metal puede tener una carga positiva, negativa o neutral. Varios estudios han confirmado que la formación de complejos con ligandos mononucleares es más deseable que con ligandos polinucleares, ya que estos últimos contienen múltiples ligandos que resultan en la unión de múltiples especies (González et al., 2018, pp. 233-255).

2.2.19. Micro-precipitación

Es el resultado entre la reacción de los iones metálicos y los compuestos que se encuentran en la superficie. Es a menudo precedido por la unión a sitios específicos que proporcionan puntos de nucleación. Las condiciones para que se lleve a cabo este mecanismo pueden ser creadas por desviaciones locales en condiciones físicas como el pH o por la presencia de materiales del propio bioadsorbente, en el proceso de bioadsorción, la micro precipitación puede contribuir a la eficiencia de remoción del metal, dado que el micro-precipitado es recogido por la fase sólida y así inmovilizado y separado de la solución (Gouda y Taha, 2023, pp. 133-145).

2.2.20. Intercambio iónico

Este proceso también desempeña un papel vital en la adsorción. Durante el proceso de biosorción, se producen intercambios de iones metálicos binarios con los iones contrarios presentes en la superficie del biosorbente. Varios sistemas que están disponibles para la purificación del agua funcionan mediante el mecanismo de intercambio iónico. El proceso de intercambio iónico generalmente ocurre mediante el intercambio de cationes o aniones. Los grupos amino son buenos ejemplos de intercambiadores de aniones, mientras que los grupos carboxilo representan a los intercambiadores de cationes. Varios estudios han informado sobre el mecanismo de intercambio iónico en la biosorción utilizando varios residuos agrícolas/alimentarios, como la cáscara de sandía, la paja de arroz, etc., para la eliminación de iones metálicos tóxicos como el cromo, Cu (II), Zn (II), Pb (II) y cadmio (Sánchez-Silva et al., 2020, pp. 1-18).

2.2.21. Reducción

La reducción es también un mecanismo importante de adsorción que desempeña un papel vital en la biosorción de diversos metales pesados como el oro y el paladio. Durante el proceso de reducción, el metal se une al grupo funcional, se reduce y experimenta el crecimiento de cristales. El metal reducido se une al biosorbente en varios lugares. La eliminación de numerosos metales pesados como el cromo, el oro, el paladio, etc., se puede realizar fácilmente mediante el proceso de reducción. Por ejemplo, mediante el proceso de biosorción, la eliminación del Cr (VI) se puede realizar fácilmente al reducirlo a Cr (III) a partir de la solución acuosa (Kanamarlapudi et al., 2018, pp. 11-150).

2.2.1.10. Tipos de bioadsorbentes

Los bioadsorbentes son materiales provenientes de la flora microbiana, algas, plantas, biomasa residual, productos agroindustriales o algunos biopolímeros, estos deben ser capaces de adsorber directamente el metal de forma iónica de la solución. Los biomateriales son sometidos a tratamientos fisicoquímicos sencillos y de bajo costo; con el fin de mejorar su capacidad de adsorción en los procesos de aplicación como remoción de metales pesados o recuperación de especies metálicas en solución (Shamim, 2018, p.2).

Las características deseadas de un bioadsorbente ideal son:

- Alta afinidad por los metales (capacidad de bioadsorción).
- Bajo costo económico (económico).
- Disponibilidad en grandes cantidades.
- Facilidad para la desorción de los iones metálicos adsorbidos y la posibilidad de reutilizar múltiples veces el bioadsorbente.

2.2.22. Subproductos industriales

Para el tratamiento de aguas residuales, se han empleado materiales de bajo costo procedentes de diversas industrias. Muchas industrias, en especial las del sector alimentario, generan grandes cantidades de residuos y subproductos. La eliminación de estos desechos a menudo plantea un desafío en términos de costos. El uso de estos desechos industriales de costo cero como bioadsorbentes eficaces para el tratamiento de efluentes de aguas residuales puede resolver de manera efectiva dos problemas: la gestión de desechos y el tratamiento de aguas residuales. Los subproductos desechados que se generan en distintas industrias, como la industria del acero, aluminio, papel, fertilizantes, alimentos, minería y productos farmacéuticos, pueden ser empleados como bioadsorbentes (Bayuo et al. 2023, pp. 13052-13093).

2.2.23. Materiales de desecho agrícola

Los desechos agrícolas, pulpa, cáscaras y semillas de frutas y verduras son materiales desechados y debido a sus diversas propiedades, pueden tener una amplia gama de aplicaciones en la eliminación de iones de metales pesados. Generalmente, los desechos agrícolas que contienen celulosa muestran una alta capacidad de bioadsorción de metales. Los componentes de los desechos agrícolas, como proteínas, lípidos, lignina, hemicelulosas, almidón, hidrocarburos y

grupos funcionales, facilitan la complejación de metales, lo que ayuda en la eliminación de metales pesados. Varios estudios revelan que este material de desecho de bajo costo, fácilmente disponible, renovable, eficiente y respetuoso con el medio ambiente parece ser una opción viable para la eliminación de iones de metales tóxicos. En los últimos años, se ha llevado a cabo investigación para la erradicación de iones de metales tóxicos utilizando varios bioadsorbentes que provienen de residuos agrícolas y alimentarios, como salvado de trigo, salvado de arroz, cáscaras de coco, cáscaras de trigo, cáscaras de arroz, aserrín de diversas plantas, mazorca de maíz, nueces de arjuna, cáscaras de gram negra, bagazo de caña de azúcar, granos de café, cáscaras de manzana, cáscaras de plátano, cáscaras de naranja, pulpa de remolacha azucarera y tallos de uva, etc. Se han utilizado tanto en su forma natural como después de alguna modificación ya sea física o química (Ahmad y Zaidi, 2020, p.1).

2.2.24. Bioadsorbentes microbianos

Los microorganismos capaces de tolerar condiciones desfavorables evolucionaron su uso como biosorbentes en la eliminación de iones metálicos de las aguas residuales. Incluyen bacterias, levaduras, algas y hongos. Los experimentos centrados en el uso de microorganismos vivos o muertos ofrecen opciones para el tipo de remediación a realizar. Sin embargo, se ha preferido el uso de biomasa microbiana muerta para la unión de iones metálicos a la biomasa viva debido a la ausencia de requisitos de nutrientes y al control de DBO y DQO en los efluentes. Por tanto, el uso de biomasa muerta es económico. Estos biosorbentes pueden secuestrar eficazmente iones metálicos en la solución y disminuir la concentración de ppm a ppb de manera eficiente; por lo tanto, se consideran candidatos ideales para el tratamiento de aguas residuales complejas con alto volumen y baja concentración de iones metálicos. Se ha investigado ampliamente una gran cantidad de materiales de origen microbiano como biosorbentes para la eliminación de iones metálicos. Los informes no incluyen el uso de biomasa de ningún patógeno para el tratamiento del agua. La mayoría de los grupos microbianos están compuestos por una gran cantidad de grupos funcionales que indican su potencial como biosorbentes (Gouda y Taha, 2023, pp. 133-145).

Tabla 2-3: Materiales biosorbentes usados para la adsorción de metales pesados

Tipo de adsorbente	Biosorbente
Residuos agrícolas	Serrín
	Cáscaras de frutas
	Cáscaras de arroz
	Residuos de algodón
	Pajitas de trigo

	Cascara de coco
	Cono de pino
	Hojas de café
	Tallos de uvas
	Tallo de tabaco
Residuos de la industria	Licor negro
	Lodo rojo
	Ceniza volante
	Polvo de la industria del acero
	Lodo de cromo
Materiales naturales	Arcilla
	Carbón
	Madera
	Lignina
	Turba
Biomasa	Hongos
	bacterias
	Algas marinas
	Algas
	Plantas

Fuente: (Kanamarlapudi et al., 2018).

Realizado por: Zambrano, M., 2023.

Tabla 2-4: Principales ventajas y desventajas del uso de biomasa viva y muerta en el proceso de adsorción

	Ventajas	Desventajas
Biomasa inerte	<p>No necesita nutrientes</p> <p>La selección de la técnica de inmovilización no está gobernada por limitaciones de toxicidad.</p> <p>Los metales pueden ser liberados fácilmente y recuperados.</p> <p>Procesos rápidos y eficientes en la retirada de metales, la</p>	<p>Rápida saturación</p> <p>El secuestro por adsorción es sensible al pH.</p> <p>El estado de valencia del metal no puede ser alterado biológicamente, por ejemplo, para dar formas menos solubles.</p> <p>Las especies organometálicas no son susceptibles de degradación</p>

	biomasa se comporta como un intercambiador de iones.	La mejora de estos procesos biológicos es limitada ya que las células no efectúan un metabolismo; la producción de agentes adsorbentes ocurre durante la etapa de crecimiento.
Biomasa viva	Las células pueden llegar a saturarse, el sistema se autorestablece debido al crecimiento Los metales se depositan en un estado químico alterado Forma económica de lograr cambios en estado de valencia o degradar compuestos organometálicos. Se pueden mejorar las cepas por medio del aislamiento de mutantes o la manipulación genética, debido a que esta es una propiedad microbiana más que un producto bajo explotación. Se pueden emplear dos o más organismos de manera sinérgica	Se necesitan nutrientes para el crecimiento Es necesario alimentar los flujos bajo condiciones fisiológicamente permisibles Sólo se pueden tratar los metales a bajas concentraciones Los productos metabólicos pueden formar complejos con los metales, impidiendo la precipitación La recuperación de los metales por desorción es limitada, debido a que pueden formar uniones intracelulares El modelado de un sistema no definido representa grandes dificultades matemáticas La deposición de los productos metabólicos y los nutrientes no consumidos

Fuente: (Tejada, Villabona y Garcés, 2018, pp. 1120-123).

Realizado por: Zambrano, M., 2023.

2.2.1.11. Factores que influyen en la eficiencia de la bioadsorción

La capacidad de bioadsorción de metales pesados está relacionada tanto con las propiedades del bioadsorbente como con varios parámetros de operación, como la temperatura, el pH, el tamaño

del bioadsorbente, la presencia de otros iones, el tiempo de contacto y la concentración del metal pesado contaminante.

2.2.25. Efecto del pH

El pH del medio donde está disuelto el metal puede influir o tiene un impacto considerable en los procesos de bioadsorción. El pH puede cambiar la actividad de los metales, alterando el tipo de enlace del grupo metálico, y por la presencia de sustancias corrosivas como ácidos o bases.

A un pH bajo (pH ácido), los iones hidronio están estrechamente asociados con los ligandos activos del biosorbente y, por lo tanto, existe una competencia entre los protones e iones metálicos por los sitios de unión. A un pH más alto, hay un menor número de iones H^+ y el número de sitios activos de los grupos funcionales está libre y expuesto (carga negativa), lo que resulta en un aumento de la biosorción al atraer iones metálicos cargados positivamente. A un pH más alto, el metal podría comenzar a precipitarse y formar hidróxidos y, como consecuencia, dificultar el proceso de biosorción (Sujata et al., 2021, pp. 103869)

2.2.26. Efecto de la concentración inicial del metal

La resistencia a la transferencia de masa entre las fases líquida y sólida puede superarse mediante la concentración inicial de iones metálicos. La capacidad de biosorción (cantidad de iones metálicos biosorbidos por unidad de peso del biosorbente) del biosorbente aumenta inicialmente con el aumento en la concentración de iones metálicos y luego alcanza un valor de saturación. Sin embargo, la eficiencia de biosorción del biosorbente disminuye con el aumento en la concentración de iones metálicos. La mayor eficiencia de biosorción a baja concentración de metal se debe a la interacción completa de los iones con los sitios de unión disponibles, lo que resulta en tasas de eficiencia más altas. A mayores concentraciones, el número de iones metálicos que permanecen sin unirse en la solución es alto debido a la saturación de los sitios de unión disponibles (Enniya et al., 2018, p.2).

2.2.27. Efecto de la dosis de biosorbente

Los biosorbentes proporcionan los sitios de unión para la biosorción de metales y, por lo tanto, su dosis afecta fuertemente el proceso de biosorción. El aumento de la dosis de biosorbente a una determinada concentración inicial de metal aumenta la biosorción de iones metálicos debido a una mayor superficie que a su vez aumenta el número de sitios de unión disponibles. A concentraciones más bajas del biosorbente, la cantidad de metal biosorbido por unidad de peso del biosorbente es alta. Por el contrario, a una concentración alta del biosorbente, la cantidad de

ion metálico biosorbido por unidad de peso disminuye. Esto se debe a una menor proporción de adsorbato a sitio de unión debido a la cantidad insuficiente de soluto presente para una distribución completa en los sitios de unión disponibles y la posible interacción entre los sitios de unión (Ayob et al., 2021, pp. 249-265).

2.2.28. Efecto del tamaño de partícula

La adsorción tiene lugar fundamentalmente en el interior de las partículas, sobre las paredes de los poros en puntos específicos. La cantidad de adsorbato (soluto) que se puede adsorber es directamente proporcional al volumen, y es bien conocido que este volumen es directamente proporcional al área externa y también que una partícula pequeña tiene mayor área superficial, o sea mayor área de la superficie interna por su cantidad de poros por unidad de masa (Agasti, 2021).

La capacidad de los metales pesados para unirse a una superficie adsorbente disminuye al aumentar el tamaño de las partículas, mientras que aumenta al disminuir el tamaño de las partículas. Para descontaminar eficazmente los metales pesados de los sistemas acuosos mediante adsorción, el área de la superficie del adsorbente aumenta a medida que se reduce el tamaño de las partículas. Una superficie mayor significa la disponibilidad de muchos sitios de sorción en la superficie del adsorbente para la absorción eficiente de iones de metales pesados (Bayuo et al., 2023 pp. 13052-13093).

2.2.29. Efecto del tiempo de contacto

Para lograr el equilibrio en la adsorción, se debe dejar un tiempo, en el que el ion metálico y el adsorbente puedan interactuar y formar el enlace requerido para poder removerlo posteriormente, al alcanzar este tiempo, se logra un equilibrio, donde ya no adsorbe más metal, esto se debe a la disminución del número de sitios activos después de este tiempo, por lo que se debe estudiar el proceso para poder determinar el tiempo óptimo de contacto (Mesias et al., 2022, pp. 762-780).

El tiempo necesario para alcanzar la máxima biosorción depende del tipo de biosorbente, ion metálico y su combinación. La tasa de biosorción es rápida inicialmente (en una hora) con casi el 90% del metal unido porque todos los sitios activos están vacíos y disponibles para la biosorción de iones metálicos. Pero con el tiempo, la tasa de biosorción disminuye debido al aumento en el porcentaje de saturación de iones metálicos que permanecen en la solución (Gouda y Taha, 2023, pp. 133-145).

2.2.30. Efecto de la temperatura

La temperatura está relacionada con la termodinámica del proceso y la energía cinética de los iones metálicos. La temperatura puede tener un efecto positivo o negativo en la biosorción en ciertos intervalos. Un aumento o disminución de la temperatura provoca un cambio en la capacidad de biosorción del biosorbente. Una temperatura alta o en aumento mejora la eliminación biosorbente de los biosorbatos, pero está asociada con la limitación del daño estructural al biosorbente. Por lo tanto, se debe elegir la temperatura óptima para una biosorción eficiente que permita la máxima unión de iones metálicos (Al-Senani y Al-Fawzan, 2018, pp. 187-194).

2.2.31. Efecto de la velocidad de agitación

El aumento de la velocidad de agitación aumenta la capacidad de biosorción del biosorbente al minimizar su resistencia a la transferencia de masa. Si bien la turbulencia añadida mejora la sorción de los iones metálicos, también puede conducir a la destrucción de la naturaleza física del biosorbente. Una velocidad moderada asegura la mejor homogeneidad de la suspensión con una alta capacidad de biosorción. Las velocidades de agitación elevadas provocan la aparición de un fenómeno de vórtice que provoca la pérdida de la naturaleza homogénea de la suspensión. La turbulencia excesiva también puede reducir el tiempo de interacción entre el biosorbato y el biosorbente, disminuyendo así el grado de biosorción (Bayuo et al., 2023, pp. 13052-13093).

2.2.32. Efecto de la fuerza iónica

La fuerza iónica es un parámetro muy crucial en la descontaminación de varios metales pesados de los sistemas acuáticos porque las aguas residuales contienen otros iones metálicos o electrolitos. Por lo tanto, la coexistencia de otros cationes y aniones en las aguas residuales podría inhibir la eliminación única de estos iones de metales pesados debido a interacciones electrostáticas entre los metales pesados y las superficies absorbentes (Bayuo et al., 2023, pp. 13052-13093).

2.2.33. Cinética de adsorción

La tasa de eliminación de metales pesados se ve muy afectada por el tiempo de reacción y es importante durante el diseño y desarrollo de sistemas de tratamiento de agua. Para alcanzar la máxima capacidad de absorción de metales pesados y conocer la cinética del proceso de adsorción, se requiere un tiempo de reacción en equilibrio. La cinética de bioadsorción nos proporciona información útil para comprender la velocidad de adsorción de metales pesados sobre

las superficies de las células y el tiempo necesario para un proceso de absorción completo. De hecho, los estudios cinéticos son necesarios para seleccionar condiciones ideales para experimentos de adsorción. Además, este tipo de experimentos nos permite comprender las vías y mecanismos de adsorción (Olasehinde et al., 2019, pp. 2710-2732).

2.2.34. Modelo de pseudo-primer orden

El modelo de pseudo primer orden también conocido como el modelo de Lagergren, este supone que los iones metálicos están unidos únicamente a un sitio de unión en la superficie celular. La velocidad cinética es proporcional al número de sitios de unión libres y puede expresarse de la siguiente manera:

$$\log(q_e - q_t) = \text{Log}q_e - k_1 * t$$

Donde:

K_1 : es la constante de pseudo-primer orden (min^{-1})

q_e : es la

capacidad de adsorción en el equilibrio (mg/g)

q_t : es la capacidad de adsorción para un tiempo t (mg/g)

2.2.35. Modelo de pseudo-segundo orden

El modelo contempla que la etapa limitante para el proceso de adsorción está en la reacción de adsorción. Igualmente, se basa en la suposición de que el ión metálico puede adsorberse en dos centros activos del bioadsorbente.

El modelo cinético de pseudo segundo orden se puede escribir en forma linealizada de la siguiente manera:

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_1 * q_e^2} + \frac{1}{q_e} * t$$

Donde:

K_2 : es la constante de pseudo-segundo orden (g/mg*min)

q_e : es la capacidad de adsorción en el equilibrio (mg/g)

q_t : es la capacidad de adsorción para un tiempo t (mg/g).

2.2.36. Desorción de metales pesados de sorbentes

La liberación de metales pesados (adsorbato) desde la superficie de los biosorbentes se denomina desorción. La desorción es un factor esencial que se tiene en cuenta al determinar los métodos basados en el principio de biosorción. La actividad de desorción se explica mediante la relación entre la fase sólida y la fase líquida (relación S/L), donde la fase sólida es el adsorbente en el que se adsorben los metales pesados y la fase líquida es el eluyente de desorción. La desorción ayuda a comprender la reutilización de los biosorbentes sin pérdida de eficacia del biosorbente. Además, la desorción reduce el costo del proceso de biosorción debido a la reutilización de los sorbentes. Se aplican diferentes desorbentes como ácidos, álcalis y alcoholes para eliminar los sorbatos de los biosorbentes. El procedimiento para llevar a cabo la técnica de desorción depende en gran medida del sorbato. Solventes como metanol, etanol y solución de NaOH se pueden utilizar para la desorción y regeneración del biosorbente utilizado en la adsorción de colorantes. El eluyente de desorción se elige en función de algunos factores dominantes, que son eficientes en la desorción, no tienen efectos perjudiciales en el biosorbente, son económicos y no generan contaminación. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que el contacto entre el eluyente y el adsorbente se mantiene durante un período de tiempo adecuado, ya que una duración prolongada de contacto podría causar cambios estructurales en los sorbentes.

2.2.1.12. Técnicas y mecanismos utilizados en la desorción de metales pesados

La comprensión del mecanismo detrás de la desorción es muy importante para determinar el agente desorbente potencial a aplicar en un sorbente específico. Algunas de las técnicas comúnmente utilizadas en la desorción y regeneración:

2.2.37. Regeneración química

La desorción y regeneración química es una técnica bien conocida que se sigue para lograr la regeneración de adsorbentes. Este proceso tiene ventajas debido a su alta velocidad de regeneración en un corto período de tiempo. Se aplican reactivos químicos como ácidos, bases, solventes orgánicos, agentes quelantes y soluciones de sales minerales en experimentos de desorción para desestabilizar la interacción entre el adsorbato y el adsorbente y restaurar los adsorbatos. En el método de regeneración química, el adsorbente y el eluyente interactúan a través de reacciones electrostáticas, reacciones de enlace p-p, reacciones hidrofóbicas y reacciones de enlace de hidrógeno. Eluyentes como el metanol y el etanol son capaces de afectar los enlaces hidrofóbicos formados entre el adsorbato y el adsorbente, lo que provoca un deterioro en sus

enlaces y, como resultado, la desorción del adsorbato del adsorbente (Kanamarlapudi et al., 2018, pp-11-150).

2.2.38. Regeneración térmica

La volatilización térmica es una técnica de desorción ampliamente aceptada. Lo principal de este método es la aplicación de la volatilización seguida de la oxidación a alta temperatura para desorber los solutos adsorbidos de la superficie de los adsorbentes. Se lleva a cabo un análisis termogravimétrico (TGA) para determinar los efectos de la desorción térmica y la regeneración de los adsorbentes de carbón activado cargados con mercurio. Junto con el TGA, las características de los adsorbentes regenerados se pueden calcular con la ayuda de la desorción programada por temperatura y la espectrometría de masas.

La irradiación por microondas, un tipo de regeneración térmica es adecuada para calentar las moléculas de los sorbentes. Es un proceso más rápido en comparación con otros métodos térmicos. La irradiación por microondas es una mejor alternativa porque permite el calentamiento selectivo con control de temperatura, además de ocupar menos espacio y requerir menos energía. Este método también produce menos residuos. La regeneración térmica es aplicable incluso en estudios a escala de lotes (Chatterjee y Abraham, 2019, pp. 319-333).

2.2.39. Regeneración electroquímica

Las técnicas electroquímicas se utilizan en estudios de adsorción-desorción de varios metales pesados, solutos orgánicos e inorgánicos. Los procesos electroquímicos se llevan a cabo a bajas temperaturas, lo que aumenta su eficiencia energética. Esta técnica se utiliza ampliamente en la industria para la separación, eliminación y recuperación de metales pesados. La aplicación de la regeneración electroquímica en carbones activados cargados con arsénico y zinc dio como resultado una eficiencia de regeneración del 88-100%. En comparación con la regeneración química, la desorción del zinc del carbón activado después de la regeneración electroquímica mostró una diferencia del 63% en la eficiencia de regeneración, lo que lo convierte en una mejor alternativa. Además, se ha demostrado que el método de regeneración electroquímica es rentable (Chatterjee y Abraham, 2019, pp. 319-333).

2.2.40. Método de regeneración ultrasónica

La ultrasonografía tiene un fuerte impacto en la desorción de metales pesados de los sorbentes. Hamdaoui et al. evaluaron el efecto de la ultrasonografía en carbón activado cargado con

mercurio, cromo, cobre y manganeso. Se encontró que la velocidad de desorción de los metales pesados aumentaba debido a la ultrasonografía. El mecanismo por el cual la ultrasonografía afecta el proceso de desorción depende de las condiciones hidrodinámicas y térmicas producidas por las ondas sonoras. Se forman burbujas de cavitación con cada ciclo de sonido y, una vez que alcanzan un punto crítico, las burbujas de cavitación colapsan liberando una carga sustancial de energía. El colapso produce una alta temperatura y presión en la superficie del sorbente, lo que inicia el proceso de desorción. Finalmente, se produce el transporte de masa y la asociación entre los metales pesados y la superficie del sorbente se rompe para liberar los iones metálicos. La velocidad de desorción aumenta con el aumento de la intensidad de la ultrasonografía (Chatterjee y Abraham, 2019, pp. 319-333).

2.2.41. Regulaciones y estándares de calidad del agua para metales pesados

2.2.1.13. Normativa ecuatoriana

La normativa relacionada con los límites máximos permisibles de metales pesados en aguas en Ecuador se establece en el Reglamento para el Control de la Contaminación y Protección del Medio Ambiente, conocido como TULSMA (Texto Unificado de Legislación Secundaria en Materia Ambiental, 2015).

El objetivo del TULSMA en relación a los límites permisibles de metales pesados en el agua es proteger la calidad del agua y salvaguardar la salud humana. Establece los límites máximos aceptables para diversos contaminantes, incluyendo los metales pesados, presentes en las aguas superficiales, subterráneas y marinas.

Estos límites se basan en la necesidad de prevenir y controlar la contaminación del agua por metales pesados, ya que su presencia en concentraciones elevadas puede ser perjudicial para los ecosistemas acuáticos y representar riesgos para la salud humana. Estos límites permiten regular y controlar las actividades industriales, agrícolas y otras fuentes potenciales de contaminación para mantener la calidad del agua dentro de parámetros seguros (Texto Unificado de Legislación Secundaria en Materia Ambiental, 2015).

Tabla 2-5: Límites de descargar al sistema de alcantarillado público

Parámetro	Expresado	Límite máximo permisible (mg/L)
<i>Cadmio</i>	Cd	0,02
<i>Cromo Hexavalente</i>	Cr^{+6}	0,5

Fuente:(TULSMA 2015).

Realizado por: Zambrano, M., 2023.

Tabla 2-6: Límites de descarga a un cuerpo de agua dulce

Parámetro	Expresado	Límite máximo permisible (mg/L)
<i>Cadmio</i>	Cd	0,02
<i>Cromo Hexavalente</i>	Cr^{+6}	0,5

Fuente:(TULSMA 2015).

Realizado por: Zambrano, M., 2023.

2.2.42. Efluentes contaminados con metales pesados en Ecuador

Los ríos Ambato y Pachanlica, principales fuentes hídricas de la región presentan un alto contenido de cromo, plomo, hierro, grasas, plaguicidas, bacterias coliformes fecales y otros derivados procedentes de la curtiembre, así como de otras industrias relacionadas con la fabricación de alimentos, ropa y papel, al verter sus desechos, incrementando el riesgo de afectaciones al agro, los animales de la zona y salud de la población de la región. Después del proceso de curtido en las aguas residuales resultantes, el agente químico con mayor presencia es el Cromo (Cr) en su forma trivalente (Cr^{+3}), que es menos tóxica, pero dicho elemento puede transformarse a su forma hexavalente (Cr^{+6}), en dependencia de las características propias del agua que ayuden a la oxidación del Cr^{+3} . El Cr^{+6} es conocido como un elemento más inestable y 1000 veces más tóxico que el Cr^{+3} . Las aguas residuales, producto del proceso de curtiembre por el método convencional de sales de cromo, son una de las fuentes principales de contaminación ambiental por cromo en vertientes de agua dulce. La concentración de Cr^{+6} va desde los 52.3 a los 392.9 mg/L, rebasando el límite que determina la normativa TULSMA. La determinación de Cr^{+6} se convierte en un potencial factor y un riesgo inminente para el desarrollo de las diferentes afectaciones asociadas a la exposición al cromo. Del total de la actividad curtiembre de Ecuador, se estima que aproximadamente el 80% de la industria efectúa sus actividades dentro de la provincia de Tungurahua, y al ser dicha actividad económica un gran motor laboral, de la misma forma, tal actividad se convierte en un gran foco generador de contaminación ambiental (Silva y Salinas, 2020, pp. 70-80).

El aumento de metales como el cadmio (Cd) y el plomo (Pb) representa una amenaza para el medio ambiente, en gran medida debido a la convergencia de aguas pluviales, sistemas de alcantarillado urbano y vertidos de aguas residuales. El desafío radica en que los metales pesados no se descomponen de manera natural, ya que carecen de funciones metabólicas específicas en los organismos vivos, lo que los convierte en peligrosos debido a su toxicidad y su capacidad de interactuar con compuestos orgánicos, afectando negativamente el suelo y el agua. La concentración de metales pesados en el estuario del Río Chone, ubicado en Manabí, Ecuador, muestra que el nivel de cadmio en el agua excede los límites permitidos, aunque no sucede lo mismo en el sedimento. Por otro lado, los niveles de plomo se mantienen por debajo de los estándares establecidos por la Norma Ecuatoriana para el agua y el sedimento. Esto sugiere que la presencia de cadmio está provocando contaminación en el agua del estuario, lo que representa un riesgo ecológico, especialmente para los organismos que habitan en la capa de agua y también podría tener un impacto en la salud de la población humana que participa en actividades recreativas, como bañarse o hacer turismo en el estuario del Río Chone (Pozo Miranda, 2018, 123-130).

2.2.43. Cebolla paiteña (*allium cepa*)

La cebolla paiteña pertenece a la familia de las Liliáceas es conocida con el nombre común de Cebolla paiteña temprana, Cebolla paiteña tardía, pero su nombre científico o latino es *Allium cepa*. En nuestro medio también es conocida con el nombre de cebolla colorada. Tiene un sabor y olor muy característico, siendo una de las hortalizas más cultivadas y consumidas en todo el mundo (Pareek et al., 2018, pp. 1145-1161).

La cebolla colorada es originaria de Asia, se encuentra compuesta por numerosas capas gruesas que constituyen el bulbo o segmento comestible cuyo tamaño oscila entre los 3cm y 10cm y su peso promedio es de 100g a 200g, generalmente se adapta a climas templado – cálidos, es sensible al exceso de humedad ya que el exceso de agua repercute en la conservación de la hortaliza. Característica por poseer propiedades nutricionales producto de su contenido antioxidante gracias a los minerales, vitaminas y fibra que posee (Akbadak et al., 2018, pp. 133-139).

La cebolla contiene un alto porcentaje de agua, equivalente aproximadamente a 90% de su composición, entre sus propiedades nutritivas se encuentra el alto contenido de fibra, minerales y vitaminas. Entre los minerales presentes en esta hortaliza predomina el potasio, hierro, magnesio, calcio y fósforo y entre las vitaminas se encuentran las de los grupos B, C y E. Esta hortaliza contiene compuestos azufrados los mismos que proporcionan el olor y el picante característico de la cebolla.



Ilustración 2-3: Cebolla colorada

Fuente: (Pareek et al., 2018, pp. 1145-1161).

2.2.1.14. *Clasificación botánica*

- **Clase:** Liliopsida
- **Subclase:** Lilidae
- **Orden:** Amaryllidales
- **Familia:** Alliaceae
- **Subfamilia:** Allioidea
- **Género:** Allium
- **Especie:** Allium cepa

2.2.1.15. *Morfología*

Planta: el tallo es reducido a una plataforma que da lugar por debajo a numerosas raíces y encima a hojas, cuya base carnosa e hinchada constituye el bulbo.

Bulbo: su bulbo está formado por numerosas capas gruesas y carnosas al interior. Puede tener diversas formas (cónica, globosa, chata, deprimida) y colores (blanco, amarillo, castaño, cobrizo, rojo, violáceo, purpura) según la variedad.

Sistema radicular: es de tipo fasciculado, formado por raíces adventicias originadas en el tallo cónico durante el desarrollo vegetativo. Cuando la planta llega a la madurez, la mayor parte de las raíces están concentradas a una profundidad 25 cm y lateralmente a 15 cm.

Tallo: tiene forma de disco, con entrenudos muy cortos, constituye la base del bulbo y se localiza debajo del nivel del suelo. En el centro del disco caulinar se localiza el meristemo apical de donde surgen las hojas.

Flores: sus flores son pequeñas, verdosas, blancas o violáceas, que se agrupan en umbelas. La apertura floral es irregular y puede prolongarse por más de dos semanas.

Fruto: es una capsula trilocular con una a dos semillas por lóculo.

Semilla: es pequeña, de color negro, de superficie lisa mientras crece y rugosa al madurar, debido a la pérdida de agua. Luego de la cosecha puede presentar dormición por aproximadamente dos semanas (Aníbal et al., 2019, pp. 15-59).

2.2.44. Espectrómetro de absorción atómica (AAS)

El Espectrómetro de Absorción Atómica (AAS) es un instrumento para la medición cuantitativa de elementos en muestras líquidas. Se utilizan lámparas de cátodo hueco como fuente de luz para medir el elemento. Por lo tanto, para cada elemento, deben utilizarse lámparas de cátodo específicas para emitir el espectro atómico de ese elemento en particular. El AAS es una técnica muy confiable y precisa para medir la concentración de elementos.

2.2.1.16. Instrumentación y principio de funcionamiento

El principio básico del AAS es que cuando un haz de luz pasa a través de una muestra, algunos de los haces son absorbidos mientras que otros son emitidos dependiendo de la longitud de onda de la radiación. Primero, la muestra líquida se convierte en aerosol que se mezcla con gases combustibles y luego se pasa a la llama para su ignición. El aire-acetileno y la mezcla de óxido nitroso-acetileno son las llamas más comúnmente utilizadas. La radiación emitida desde la lámpara de cátodo hueco para un elemento específico se pasa a través de las moléculas en la llama. Debido a la radiación, los electrones se excitan y saltan a niveles de energía más altos a medida que absorben algo de radiación, mientras que algunas partes del espectro de radiación que no son absorbidas son emitidas. Los espectros emitidos por las moléculas son detectados por un monocromador y selecciona una longitud de onda específica de los espectros emitidos. Luego, los espectros se convierten en una señal eléctrica por el detector y finalmente se muestra como un valor de absorbancia. La concentración del elemento en la muestra se revela en función de la cantidad de radiación absorbida (Martínez Guijarro MaRemedios, 2019).

2.2.45. Equipo thermo scientific ice 3300 atomización por llama

Posee una óptica de doble haz superior que proporciona un rendimiento excelente, mientras que el hardware innovador y diseño de software se asegura de que la ejecución de las muestras, los métodos de desarrollo y mantenimiento del instrumento es fácil.



Ilustración 2-4: Espectrofotómetro de adsorción atómica Ice 3300

Fuente: (Martínez Guijarro MaRemedios, 2019).

Características

- Diseño compacto, ocupa poco espacio
- Software fácil de usar con una interfaz guiada por asistente completo.
- Llama de alta sensibilidad que se logra mediante nebulización de alta eficiencia a través de una cámara de pulverización completamente inerte.
- Quemador de titanio universal, este asegura atomización excepcional, incluso con muestras difíciles.
- Caja de gas totalmente automatizado garantiza el análisis seguro, fiable y repetible con todo tipo de llama.

2.2.46. Espectrómetro infrarrojo con transformada de Fourier (FTIR)

El Espectrómetro Infrarrojo con Transformada de Fourier (FTIR) es un instrumento analítico utilizado para comprender la estructura de compuestos químicos, especialmente los grupos moleculares en términos de grupos funcionales, la orientación de los grupos e información sobre isómeros.

2.2.1.17. Instrumentación y principio de funcionamiento

El mecanismo real que involucra este análisis consiste en pasar rayos infrarrojos a través de la muestra, de los cuales algunos rayos son absorbidos por la muestra mientras que otros son transmitidos por la muestra. La longitud de onda de la luz transmitida se mide con un detector y muestra el resultado en la pantalla. El espectro absorbido y transmitido nos ayuda a cuantificar los componentes presentes en la muestra. Existen ciertos enlaces entre los diferentes átomos. Los enlaces presentes en el compuesto químico pueden ser enlaces simples, dobles o triples. Cuando la muestra entra en contacto con la luz infrarroja, las moléculas se excitan con diferentes frecuencias según el tipo de enlace. La longitud de onda de la luz absorbida depende del tipo de enlace químico (Dhakal y Dikshya, 2018, pp. 1-116).

2.2.1.18. Espectrómetro infrarrojo de transformada de fourier Jasco (FT/IR-4100)

Un espectrofotómetro FTIR se utiliza para examinar la composición de enlaces covalentes en diversas muestras, destacando su eficacia en el análisis de polímeros orgánicos. Puede emplearse para analizar muestras sólidas, en forma de polvo o líquidas, siendo suficiente un tamaño mínimo de 5 mm x 5 mm x 0.1 mm para las muestras sólidas. Además, su software incorporado ofrece utilidades para el procesamiento de datos, como la corrección de la línea base y la identificación/integración de picos.



Ilustración 2-5: Espectrómetro FT/IR-4000

Fuente:(Dhakal y Dikshya, 2018).

Características

- Tamaño compacto
- Autoalineación

- Excelente sensibilidad
- Sistema de inicio rápido
- Reconocimiento de accesorios IQ
- Óptica purgable
- Aplicable a microscopía FT-IR e imágenes de IR

CAPÍTULO III

3. MARCO METODOLÓGICO

3.1. Descripción de enfoque

La presente investigación tiene un enfoque cuantitativo mediante el cual se realizó una interpretación de datos numéricos obtenidos en el proceso experimental a partir de las diferentes variables propuestas para evaluar la eficiencia de bioadsorción de cadmio y cromo.

3.2. Tipo de investigación

La investigación que se desarrolló es de tipo experimental correlacional debido a que se pretende conocer si el tamaño de la partícula y la dosis empleada del material bioadsorbente aporta a la capacidad de adsorción.

3.3. Diseño de la investigación

La investigación presenta un diseño experimental de tipo factorial 3x3, el cual consta de 3 niveles de dosis del bioadsorbente y 3 niveles de tamaños de partícula, se aplicó tres repeticiones, dando un total de 27 experimentos analizados a cada metal.

Tabla 3-1: Diseño experimental aplicado

Dosis del bioadsorbente (g/L)	Tamaño de partícula (mm)		
	0.3	0.5	2
3	X_{111}	X_{211}	X_{311}
	X_{112}	X_{212}	X_{312}
	X_{113}	X_{213}	X_{313}
6	X_{121}	X_{221}	X_{321}
	X_{122}	X_{222}	X_{322}
	X_{123}	X_{223}	X_{323}
9	X_{131}	X_{231}	X_{331}
	X_{132}	X_{232}	X_{332}
	X_{133}	X_{233}	X_{333}

Realizado por: Zambrano, M., 2023.

3.4. Identificación de variables

Variable dependiente: Eficiencia de bioadsorción de Cd (II) y Cr (III).

Variable independiente: Dosis del bioadsorbente, tamaño de la partícula.

Variable interviniente: Tiempo

3.5. Matriz de consistencia

Tabla 3-2: Matriz de consistencia

PROBLEMA	OBJETIVO	HIPÓTESIS	VARIABLES
Problema General	Objetivo General	Hipótesis General	
¿Cuál es la eficiencia de la bioadsorción de cadmio y cromo utilizando la cáscara de cebolla?	Evaluar la eficiencia de la bioadsorción de Cadmio (II) y Cromo (III) en aguas contaminadas a nivel de laboratorio mediante la utilización de cáscara de cebolla.	Se puede utilizar la cáscara de cebolla para la remoción de iones Cd y Cr presentes las muestras de agua contaminada.	Tamaño de la partícula Dosis del material bioadsorbente
Problema Específicos	Objetivos Específicos	Hipótesis Específicas	Variables
¿El material adsorbente obtenido presenta las características estructurales necesarias para una adecuada adsorción de Cadmio y Cromo?	Realizar pruebas fisicoquímicas para caracterizar el material bioadsorbente (cáscara de cebolla).	El material adsorbente obtenido presenta las características estructurales necesarias que favorecen una adecuada adsorción de cadmio y cromo.	Composición química
¿En qué tamaño de partícula y dosis de bioadsorbente se observa una mayor eficacia en la	Identificar la combinación óptima entre los diferentes tamaños de partículas y dosis del material	El material bioadsorbente desarrollado mostrará un alto nivel de eficiencia en la	Capacidad de adsorción de cromo (VI)

remoción de Cadmio y Cromo?	bioadsorbente que permita la máxima capacidad de bioadsorción.	que remoción de cadmio y cromo del agua contaminada, lo que resultará en una reducción significativa de los niveles de estos metales pesados.
¿Cuál será el tiempo óptimo de contacto entre los contaminantes y el bioadsorbente durante el cual se maximizará la eficiencia de bioadsorción?	Determinar la cinética de adsorción de Cd (II) y Cr (III) para alcanzar el mejor porcentaje de bioadsorción.	La interacción entre los contaminantes y el material bioadsorbente seguirá patrones cinéticos específicos, para lograr el mejor porcentaje de bioadsorción de Cd (II) y Cr (III).

Realizado por: Zambrano, M., 2023.

3.6. Operacionalización de las variables

Tabla 3-3: Operacionalización de las variables

Variable	Tipo de variables	Definición operacional	Indicadores	Instrumento de medición
Eficiencia de bioadsorción	Dependiente, cuantitativa, unidimensional y continua.	Proporción entre la cantidad de contaminante adsorbido por el material adsorbente y la cantidad de material adsorbente utilizado, expresada	Concentración de Cd y Cr en muestras o tratadas	Espectrofotometría de absorción atómica tipo llama

			generalmente en porcentaje.		
Dosis del Bioadsorbente	Independiente, cuantitativa, unidimensional y continua.	Cantidad o concentración de material adsorbente aplicado por unidad de volumen o masa de la solución o medio contaminado a tratar.		Masa del Adsorbente	Balanza analítica
Tamaño de la partícula	Independiente, cuantitativa, unidimensional y continua.	Dimensión física de una partícula individual, generalmente expresada en términos de su diámetro o longitud característica		Diámetro de Partícula	Tamices
Tiempo	Independiente, cuantitativa, unidimensional y continua.	Magnitud que indica la secuencia, duración o intervalo entre eventos, expresada en unidades de medida convencionales como segundos, minutos, horas, días, etc.		Minutos	Espectrofotometría de absorción atómica tipo llama

Realizado por: Zambrano, M., 2023.

3.7. Localización de estudio

El presente trabajo de investigación se llevó a cabo en la ciudad de Riobamba, provincia de Chimborazo. Para la recolección de datos se realizó el proceso experimental en los laboratorios de Biorremediación, Investigación, Instrumental y Calidad del agua de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

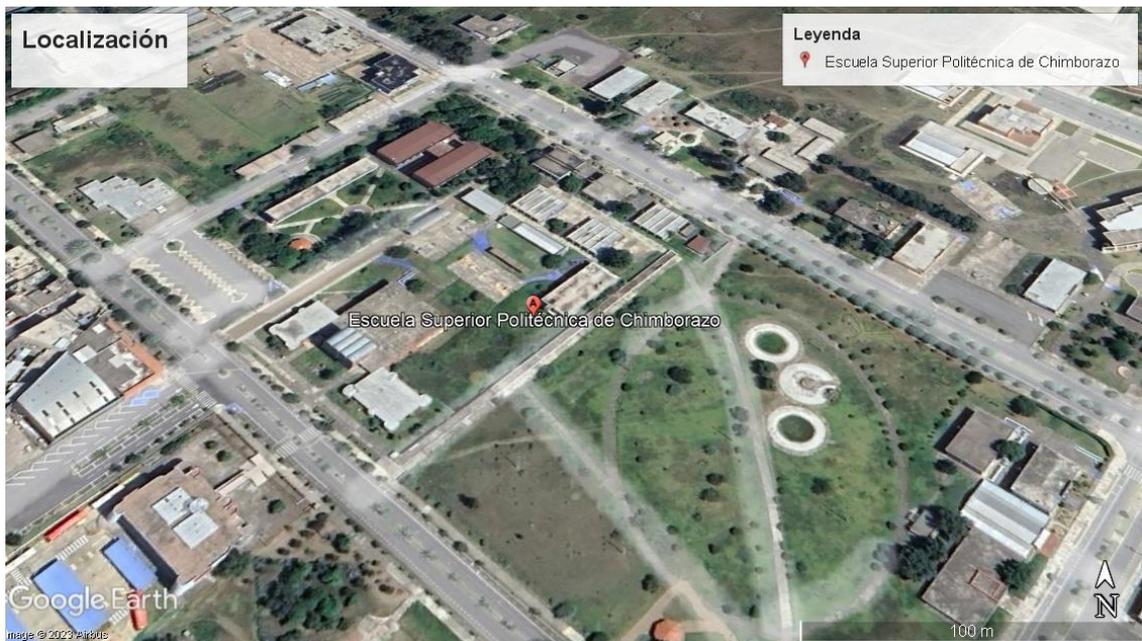


Ilustración 3-1: Ubicación de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo

Fuente: Google Maps, 2023.

Realizado por: Zambrano, M., 2023.

3.8. Población de estudio

La población de estudio estuvo constituida aproximadamente por 12 litros de agua sintética generada a nivel de laboratorio con concentraciones de 4 ppm de Cd (II) y 7 ppm de Cr (III).

3.9. Tamaño de la muestra

La muestra fue obtenida mediante un muestreo no probabilístico por conveniencia, se utilizó 500 mL de agua sintética generados para la realización de los tratamientos. Las muestras tomadas fueron inmediatamente filtradas para posterior determinar la concentración de los metales pesados mediante espectrofotometría de absorción atómica tipo llama.

3.10. Unidad de análisis

Se tomo una alícuota de 10 mL de cada solución de agua sintética.

3.11. Técnicas de recolección de datos

3.11.1. Obtención del bioadsorbente

Para la caracterización del material bioadsorbente se siguió algunas etapas, como primer paso la biomasa fue recolectada en el mejor estado posible en el mercado Mayorista de la ciudad de Riobamba para evitar su pronta degradación y garantizar la eficiencia del proceso.

3.11.2. Selección y lavado de la cáscara de cebolla

Se recolectó un saco de cáscara de cebolla y se procedió a descartar las cáscaras opacas, arrugadas o con áreas descoloridas. Para eliminar los agentes extraños como tierra y desechos, se realizó un lavado con agua destilada y así retirar cualquier tipo de impureza que pueda afectar al proceso de bioadsorción.

3.11.3. Secado, molienda y tamizado

Deje reposar las cáscaras en un lugar soleado y periódicamente las volteaba para que se sequen de manera uniforme. Con ayuda de un molino manual procedí a moler las cáscaras para reducirlos en los diferentes tamaños y a través de un tamiz de acero con mallas de 60, 35 y 10 separé las partículas más finas de las más grandes y así poder obtener una textura más uniforme.

3.11.4. Caracterización del bioadsorbente

3.11.4.1. Determinación del espectro FT-IR del bioadsorbente

Para determinar la existencia de grupos funcionales en el bioadsorbente, se llevó a cabo un análisis infrarrojo de los mismos con el uso de software Spectral Analyzer, en el cual se procedió a colocar una pequeña cantidad del bioadsorbente respectivo en el equipo, el mismo que mide las frecuencias de la luz infrarroja que son absorbidas por un compuesto, luego se guarda la información en un USB para proceder a analizar los diferentes grupos funcionales que conforma el mismo, con la ayuda de bibliografía.

3.11.4.2. *Determinación del pH del bioadsorbente*

El pH del adsorbente se determinó con un ph metro, la solución del adsorbente se preparó con 1 g de biomasa en 50 mL de agua destilada, luego la muestra se homogeneizó con un agitador magnético durante 15 min, el electrodo del ph metro se insertó en la solución y finalmente se obtuvo los resultados, este proceso se realizó tres veces para poder sacar un promedio aceptable.

3.11.4.3. *Determinación humedad del bioadsorbente*

Para la determinación de la humedad se empleó el método gravimétrico. Iniciamos pesando 1 g de muestra con la ayuda de la balanza analítica y se introdujo a la estufa a 60°C por 24 horas, pasado este tiempo se dejó desecar hasta que alcance la temperatura ambiente. Volvemos a pesar la muestra hasta que las mismas tengan un peso constante. Calculamos los porcentajes de humedad, a través de la siguiente fórmula:

$$\%humedad = \left(\frac{\text{Peso inicial} - \text{Peso final}}{\text{Peso inicial}} \right) * 100$$

Ecuación 3-1: Porcentaje de humedad

Donde:

Peso inicial: peso inicial de la muestra

Peso final: peso después de la estufa de la muestra.

3.11.4.4. *Prueba de cenizas totales*

Para la determinación del porcentaje de ceniza del bioadsorbente, se colocó la muestra de bioadsorbente en un crisol previamente tarado a peso constante, después se llevó a calcinar en una mufla a 500-550°C por dos horas, hasta obtener cenizas libres de residuo carbonoso, se enfrió en un desecador y se tomó su peso.

El porcentaje se de cenizas de hallará aplicando la siguiente fórmula:

$$\%Cenizas\ totales = \frac{(m2 - m0)}{(m1 - m0)} * 100$$

Ecuación 3-2: Porcentaje de cenizas totales

Donde:

M2: Masa en gramos de la capsula con cenizas.

M1: Masa en gramos de la capsula con muestra.

M0: Masa en gramos de la capsula vacía.

3.11.4.5. *Determinación de la densidad aparente del bioadsorbente*

Para determinar la densidad aparente se utiliza el método de la probeta que consiste en pesar la cantidad de sólido necesaria para ocupar un volumen final, con el sólido homogéneamente distribuido. Se aplica la siguiente ecuación:

$$\delta A = \frac{(m_{\text{probeta}} + m_{\text{masa}}) - m_{\text{probeta}}}{Vol}$$

Ecuación 3-3: Cálculo de la densidad aparente

Donde:

Mprobeta: es el peso de la probeta vacía.

Vol: volumen de la probeta que ocupa la masa.

3.11.4.6. *Determinación de la densidad real del bioadsorbente*

Para determinar la densidad real se empleó el método del picnómetro, se pesa el picnómetro vacío se agrega 0,5 gramos de muestra y se aforo el picnómetro, se seca y se pesa en una balanza de precisión. Se aplica la siguiente fórmula:

$$\delta R = \frac{(W_{\text{picv}} + W_{\text{picm}})}{Vol}$$

Ecuación 3-4: Calculo de la densidad real

Donde:

Wpicv: peso del picnómetro vacío

Wpicm: peso del picnómetro con la masa y aforado

Vol: volumen del picnómetro

3.11.4.7. *Determinación de la porosidad del bioadsorbente*

La determinación de la porosidad de la muestra es importante ya que se es donde se van a almacenar los iones metálicos absorbidos para ello se utiliza la siguiente ecuación:

$$E = \frac{\delta R - \delta A}{\delta R}$$

Ecuación 3-5: Determinación de la porosidad

Donde:

δR : Densidad Real

δA : Densidad Aparente

3.11.5. Preparación de soluciones de cadmio y cromo

Se preparó una solución patrón de cadmio a 100 ppm partiendo de nitrato de cadmio $Cd(NO_3)_2$ con una pureza del 99 %, se consideró pesar 0,10 g de nitrato de cadmio y disolverlo en 500 mL de agua destilada, a partir de esta solución se realizó una dilución de la solución madre del nitrato de cadmio con una concentración de 4 ppm y disolverlo en 500 mL de agua destilada. Para la solución patrón de Cromo a 100 ppm partiendo de Cloruro de cromo $CrCl_3$ hexahidratado con una pureza del 98 %, se consideró pesar 0,30 g de Cloruro de cromo y disolverlo en 500 mL de agua destilada, a partir de esta solución se realizó una dilución de la solución madre de cromo con una concentración de 7 ppm y disolverlo en 500 mL de agua destilada, esto se realizó utilizando la siguiente fórmula de la ley de las diluciones.

$$C_{inicial} * V_{inicial} = C_{final} * V_{final}$$

Ecuación 3-6: Diluciones

Donde:

C_1 : concentración molar inicial

C_2 : concentración molar final

3.11.6. Efecto de la dosis y el tamaño de partícula del bioadsorbente

En un vaso de precipitación se agregó los 500 mL de la solución adicionando el sólido bioadsorbente variando los tamaños (0,3 – 0,5 – 2 mm) y pesos (3, 6 y 9 g/L), después se procedió a colocar los vasos de precipitación en el test de jarras, a 120 rpm y un tiempo de 60 minutos. Para finalizar, se filtró 10 mL la muestra utilizando un embudo de vidrio y papel filtro en un matraz y se almaceno en un frasco para ser analizada en los laboratorios y determinar la concentración final de los metales en estudio.

3.11.7. Estudio del tiempo de equilibrio

Para determinar el tiempo de equilibrio se añadió 300 mL de agua destilada a 4 ppm de Cd (II) y a 7 ppm de Cr (III), después se adicionó la dosis y tamaño de partícula óptimos del material bioadsorbente la cual se obtuvo del experimento anterior y se llevó al test de jarras con una agitación de 120 rpm. Se tomaron alícuotas de 10 mL a los 5, 10, 15, 30, 45, 60 y 120 minutos, las cuales se sometieron inmediatamente a filtración. Los estudios se realizaron por duplicado, posteriormente se procedió con el análisis de las muestras en el Espectrofotómetro iCE 3300 AAS. A partir de los datos obtenidos, se determinará el tiempo en el cual la biomasa alcanzó su máxima absorción con relación al metal en estudio, lo que representa el punto de equilibrio.

3.11.8. Determinación de la cinética de adsorción

Se analizó el mecanismo de adsorción del sistema adsorbente-adsorbato por medio de una evaluación de la cinética de adsorción. Para esto se utilizan los modelos de Lagergren para pseudo primer y pseudo segundo orden con la utilización de los datos experimentales obtenidos en tiempo de equilibrio. Para el modelo de Pseudo Primer orden en el eje y se tendrá $\text{Log}(q_e - q_t)$ y en el eje x el tiempo (t), que denota la diferencia entre la concentración en el equilibrio y la concentración en cada alícuota de tiempo. Para el modelo de segundo orden se mantiene el tiempo en el eje x, y para el eje y se utiliza los valores de (t/q_t) . El modelo que obtenga el valor de R^2 más cercano a 1 se considerará como el que mejor describe la cinética de la adsorción de Cadmio (II) y Cr (III) con la biomasa de la cáscara de cebolla.

3.11.9. Determinación del porcentaje de eficiencia de remoción

El rendimiento de la bioadsorción se evaluó en términos de su eficiencia de eliminación, expresada como RE (%), y se estimó mediante la siguiente ecuación.

$$\%RE = \frac{(C_o - C_f)}{C_o} * 100$$

Ecuación3-7: Eficiencia de remoción

Donde:

C_o : Concentración inicial

C_f : Concentración final

E: Eficiencia

(Prokopov et al., 2021, pp.399-410)

3.12. Análisis estadístico

Las muestras experimentales obtenidas se analizaron por medio de Espectrofotómetro de adsorción atómica tipo llama y los valores que se obtuvieron fueron analizados de manera estadística a través del análisis de varianza (ANOVA) y la prueba LSD de Fisher (5% de significancia) para identificar diferencias significativas y determinar los parámetros óptimos de tratamiento utilizando el software Minitab.

3.13. Materiales, equipos y reactivos

En esta sección se detallarán todos los equipos, materiales y reactivos que se emplearon para la realización de este trabajo experimental

Materia prima

- Cáscara de cebolla

Reactivos

- Nitrato de Potasio 99 %
- Cloruro de Cromo 98 %
- Agua destilada

Materiales

- Vidrio reloj
- Vasos de precipitación
- Pipetas graduadas o Probetas
- Matraces Erlenmeyer
- Papel filtro
- Espátula
- Bureta
- Balones de aforo
- Pisseta
- Embudo Simple
- Tamices (# 60, 35 y 10)

- Recipientes plásticos de 100mL

Equipos

- Balanza analítica EXPLORER
- Tamices FIELDMASTER
- pH-metro FISHER SCIENTIFIC
- Agitador ORBITAL SHAKER
- Espectrofotómetro iCE 3300 AAS
- Espectrofotómetro FTIR Jasco FTIR-4000
- Test de jarras YFL4
- Estufa THERMO SCIENTIFIC

CAPÍTULO IV

4. MARCO DE ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

4.1. Caracterización del bioadsorbente

Tabla 4-1: Caracterización del bioadsorbente

Parámetros	Cáscara de cebolla
Humedad	10,94 %
pH	4,72
Cenizas totales	5,05 %
Densidad Aparente	0,22 g/cm ³
Densidad Real	0,75 g/cm ³
Porosidad	70.66 %

Realizado por: Zambrano, M., 2023.

La cáscara de cebolla presenta 10,94 % de humedad, esto influye en la estabilidad del material bioadsorbente, lo que podría reducir su vida útil o eficacia en el proceso de bioadsorción. El estudio de (García, 2022, pp. 1-21) señala que la cáscara de cebolla posee aproximadamente 9,89 % de humedad. La cáscara de la cebolla utilizada en este trabajo de investigación presentó un pH de 4,72. (Bamba et al., 2020, pp. 3345-3354) en su estudio de caracterización fisicoquímica de la cáscara de cebolla obtuvo un valor de pH de 4,13. Esto nos indica que es recomendado un pH ácido en el proceso de bioadsorción debido a que los grupos funcionales del material adsorbente competirán por sitios de unión activa con iones metálicos, aumentando su remoción (Sanchez-Silva et al., 2020). El contenido de cenizas indica la presencia de minerales, sales u otros componentes inorgánicos en una muestra. La cáscara de cebolla posee 5,05 % de cenizas totales comparando con el estudio de (García, 2022, pp. 1-21) que señala que el material bioadsorbente presenta 5,50% de cenizas y por último una propiedad importante que debe poseer un buen adsorbente es una estructura porosa que resulta en un área superficial alta, lo cual la cáscara de cebolla cumple.

4.2. Análisis FTIR del bioadsorbente

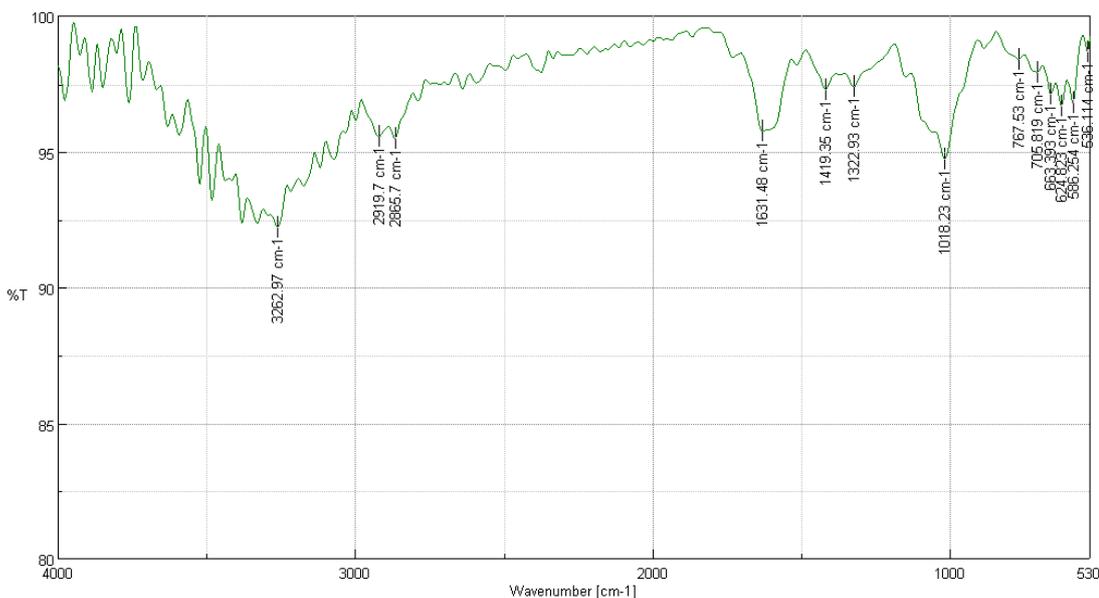


Ilustración 4-1: Espectro de adsorción IR de la cáscara de cebolla

Realizado por: Zambrano, M., 2023.

Se utilizó espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) para la identificación de varios grupos funcionales responsables del proceso de adsorción en la cáscara de cebolla. El análisis FTIR se llevó a cabo en el laboratorio de análisis instrumental de la ESPOCH y por medio de tablas bibliográficas previamente establecidas, se logró realizar predicciones basadas en los resultados. Los picos de la región 3262.97 cm^{-1} indican la vibración de estiramiento de -OH del alcohol debido a la unión intra e intermolecular de compuestos poliméricos como alcoholes, fenoles, ácidos carboxílicos y en lignina, celulosa y pectina (Olasehinde et al., 2018, pp. 2710-2732). Los picos en 2919.7 cm^{-1} – 2865.7 cm^{-1} indica el estiramiento C-H de grupos alquilo (-CH_n). La banda de adsorción de 1631.48 cm^{-1} es para la vibración de estiramiento asimétrico de los enlaces C=O de grupo carbonilo y (-COO-) de grupos carboxílicos iónicos. El pico de adsorción de 1419.35 cm^{-1} es el estiramiento de C-C de compuestos aromáticos. El pico de 1322.93 cm^{-1} indica vibración de estiramiento asimétrico de deformación de C-H de hemicelulosas y celulosas (Sagar et al., 2021, pp. 1-11). El pico de 1018.23 cm^{-1} se pueden asignar al estiramiento con C-O de alcoholes y grupos carboxílicos y vibración de hemicelulosas y celulosas (Prokopov et al., 2021, pp.399-410). Los picos de adsorción de 767.53 cm^{-1} , 705.53 cm^{-1} , 663.393 cm^{-1} , 624.823 cm^{-1} , 586.254 cm^{-1} y 536.114 cm^{-1} , se puede asignar a enlaces C-H en alquenos (olefinas) o alquinos. La cáscara de la cebolla indica la presencia de muchos grupos funcionales que pueden unirse a los iones de Cd (II) y Cr (III), un componente clave en la bioadsorción es la lignina, ya que es una parte integral de la matriz lignocelulósica que le confiere resistencia mecánica, para su utilización como material adsorbente, además, la lignina contiene una gran variedad de grupos

funcionales como: grupos hidroxilo alifáticos y fenólicos, grupos metoxilo y grupo carbonilo, que pueden tener la capacidad de unirse a iones metálicos y teóricamente los convierte en buenos bioadsorbentes.

4.3. Determinación del porcentaje de eficiencia de bioadsorción

En las tablas se reportan las concentraciones finales de Cd (II) y Cr (III) analizados en el espectrofotómetro de absorción atómica tipo llama en función a la variación de la dosis y el tamaño de partícula de la cáscara de cebolla, al igual que se muestra el porcentaje de adsorción para cada experimento.

4.3.1. Cálculo del porcentaje de adsorción de Cadmio (II)

$$\%RE = \frac{(C_o - C_f)}{C_o} * 100$$

$$\%RE = \frac{4 - 0,4247}{4} \times 100$$

$$\%RE = 89.383$$

Tabla 4-2: Resultados de las concentraciones finales de Cd (II) con la cáscara de cebolla

Dosis de biomasa (g/L)	Tamaño de partícula (mm)	Concentración Final Cd (II) (mg/L)	% de Adsorción
3	0,3	0,4365	89,088
		0,4261	89,348
		0,4291	89,273
	0,5	0,6556	83,610
		0,6022	84,945
		0,6887	82,783
	2	1,1116	72,210
		1,1501	71,248
		1,1326	71,685
6	0,3	0,4247	89,383
		0,4325	89,188
		0,5714	85,715
	0,5	0,8435	78,913
		0,9511	76,223

		0,8090	79,775
	2	1,2320	69,200
		1,4660	63,350
		1,3690	65,775
9	0,3	0,7699	80,753
		0,7671	80,823
		0,7177	82,058
	0,5	0,9817	75,458
		0,9951	75,123
		0,9680	75,800
	2	1,3210	66,975
		1,6078	59,805
		1,6865	57,838

Realizado por: Zambrano, M., 2023.

4.3.2. Cálculo del porcentaje de adsorción de Cromo (III)

$$\%RE = \frac{(C_o - C_f)}{C_o} * 100$$

$$\%RE = \frac{7 - 0,5785}{7} * 100$$

$$\%RE = 91,966$$

Tabla 4-3: Resultados de las concentraciones finales de Cr (III) con la cáscara de cebolla

Dosis de biomasa (g/L)	Tamaño de partícula (mm)	Concentración Final Cr (III) (mg/L)	% de Adsorción
3	0,3	0,5785	91,736
		0,5624	91,966
		0,5504	92,137
	0,5	0,848	87,886
		0,847	87,900
		0,8334	88,094
	2	1,2952	81,497
		1,2652	81,926
		1,2231	82,527
6	0,3	0,9849	85,930

	0,5	0,8631	87,670	
		0,8404	87,994	
		1,1998	82,860	
	2	1,1974	82,894	
		1,1514	83,551	
		1,4763	78,910	
	9	0,3	1,4167	79,761
			1,4852	78,783
			1,0985	84,307
0,5		1,1624	83,394	
		1,1504	83,566	
		1,5493	77,867	
2		1,5438	77,946	
		1,5164	78,337	
		1,9399	72,287	
		1,9315	72,407	
		1,9178	72,603	

Realizado por: Zambrano, M., 2023.

4.3.3. Análisis estadístico del proceso de bioadsorción de Cd (II) y Cr (III)

Se realizó el análisis estadístico con los resultados de las concentraciones finales de Cd (II) y Cr (III) en el proceso de bioadsorción. Se usó el software Minitab para obtener el análisis de varianza, con la finalidad de determinar la significancia estadística de las variables analizadas, la dosis del bioadsorbente y el tamaño de partícula con respecto a la eficiencia de bioadsorción mediante el uso de cáscara de cebolla.

Tabla 4-4: Análisis de Varianza (ANOVA) del proceso de bioadsorción de Cadmio (II) a partir de la cáscara de cebolla

Variables	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado Medio	Valor F	Valor P
A: Dosis del bioadsorbente	0,564	2	0,282	38,16	0,000
B: Tamaño de partícula	2,881	2	1,440	194,97	0,000
Interacciones AB	0,038	4	0,010	1,29	0,310

Error	0,133	18	0,007		
Total	3,615	26			

Fuente: Minitab, 2023.

Realizado por: Zambrano, M., 2023.

Debido a que, los valores-P para la dosis y tamaño de partícula del bioadsorbente son menores que 0,05 nos indica que estos factores poseen un efecto estadísticamente significativo, en cuanto al valor de la interacción es mayor a 0,05 se puede indicar que este factor posee un efecto no significativo sobre la eficiencia de bioadsorción de Cd (II) con un nivel de confianza de 95 %.

En la tabla se presenta el análisis de normalidad y la evaluación de la homogeneidad de varianzas utilizando los enfoques de Anderson-Darling y Levene, respectivamente, en relación con los datos de bioadsorción de Cd (II)

Tabla 4-5: Prueba de Fisher en la bioadsorción de Cd (II)

Dosis de biomasa (g/L)	Tamaño de partícula (mm)	Bioadsorción de Cadmio (%)	Agrupación
3	0,3	89,236	A
6	0,3	88,095	A
3	0,5	83,779	B
9	0,3	81,211	B C
6	0,5	78,303	C D
9	0,5	75,460	D
3	2	71,714	E
6	2	66,108	F
9	2	61,539	G

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes

Realizado por: Zambrano, M., 2023.

Al utilizar el método LSD de Fisher se consiguió la mayor bioadsorción de Cd (II) con la dosis de 3 y 6 g/L y un tamaño de partícula de 0,3 mm de la cáscara de cebolla con porcentajes de eficiencia de (89,24; 88,09) %, siendo estadísticamente los mejores tratamientos aplicados en la eficiencia de bioadsorción de Cd (II). En su estudio (Sirilert y Maikrang, 2018, pp. 128-141) obtuvo que el porcentaje de Cd (II) adsorbido por la cáscara de plátano fue de 79,02 % a una dosis del bioadsorbente de 30 g/L. Este comportamiento indicó una mayor área superficial disponible con el aumento de la dosis del bioadsorbente. Sin embargo, a dosis más altas del bioadsorbente, la

eliminación de iones metálicos disminuyó debido a la superposición de sitios de adsorción, lo que conduce a una disminución de área (Prokopov et al., 2021, pp.399-410).

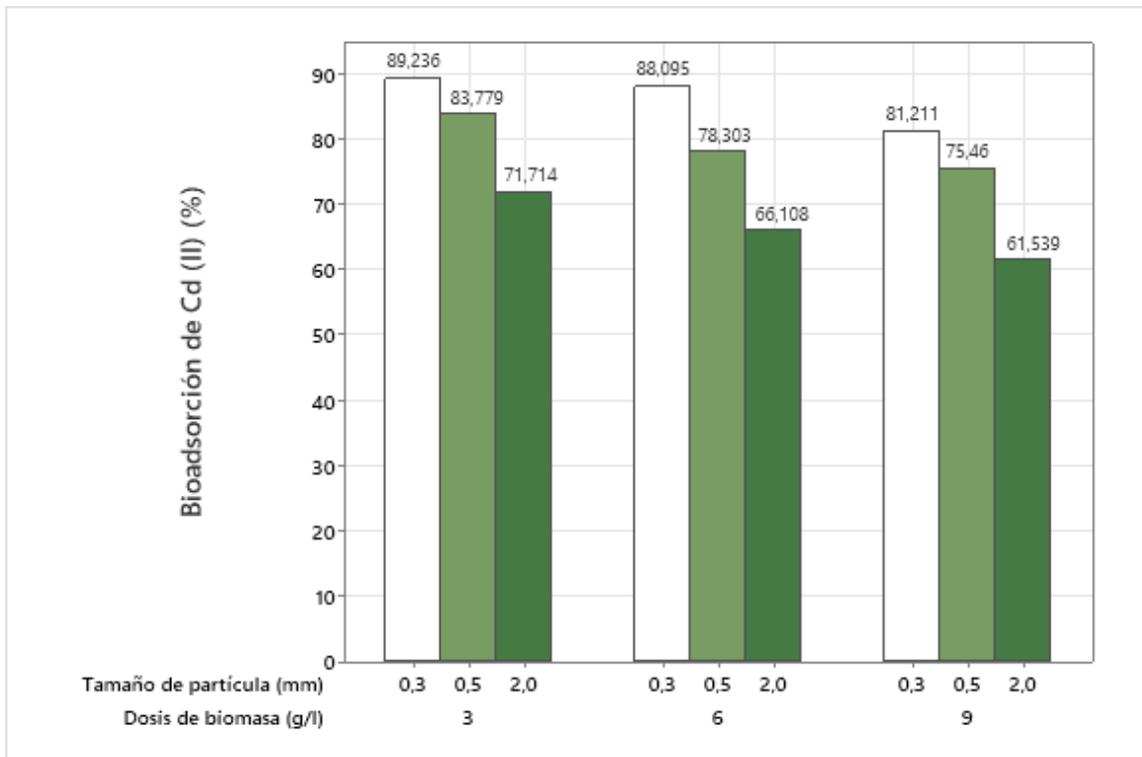


Ilustración 4-2: Diagrama de barras para la eficiencia de la bioadsorción de Cd (II)

Realizado por: Zambrano, M., 2023.

Tabla 4-6: Análisis de varianza (ANOVA) del proceso de bioadsorción de Cromo (III) a partir de cáscara de cebolla

Variables	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado Medio	Valor F	Valor P
A: Dosis del bioadsorbente	1,880	2	0,940	746,16	0,000
B: Tamaño de partícula	2,111	2	1,055	837,86	0,000
Interacciones AB	0,047	4	0,012	9,35	0,000
Error	0,047	18	0,012		
Total	0,023	26			

Fuente: Minitab, 2023.

Realizado por: Zambrano, M., 2023.

Debido a que, los valores-P para el tamaño de partícula, la dosis del bioadsorbente y la interacción son menores que 0,05 nos indica que estos factores poseen un efecto estadísticamente significativo sobre la eficiencia de bioadsorción de Cr (III) con un nivel de confianza de 95 %.

En la tabla se presenta el análisis de normalidad y la evaluación de la homogeneidad de varianzas utilizando los enfoques de Anderson-Darling y Levene, respectivamente, en relación con los datos de bioadsorción de Cr (III)

Tabla 4-7: Prueba de Fisher en la bioadsorción de Cr (III)

Dosis de biomasa (g/L)	Tamaño de partícula (mm)	Bioadsorción de Cromo (%)	Agrupación
3	0,3	91,946	A
3	0,5	87,960	B
6	0,3	87,198	B
9	0,3	83,756	C
6	0,5	83,102	C
3	2	81,983	D
6	2	79,151	E
9	0,5	78,050	F
9	2	72,432	G

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Realizado por: Zambrano, M., 2023.

Al utilizar el método LSD de Fisher se consiguió la mayor bioadsorción de Cr (III) (91,95 %) con una dosis de 3 g/L y el tamaño de partícula de 0,3 mm de la cáscara de cebolla, representando el mejor tratamiento aplicado en la eficiencia de bioadsorción de Cr (III) con una confianza del 95 %. En el estudio de (Tharannum y Murthy, s.f., pp.49-54) se utilizó un tamaño de partícula de 0,25 mm de la cáscara de coco verde obteniendo un porcentaje de 90 % de remoción de Cromo (VI). Esto nos indica que al reducir el tamaño de partícula se incrementa significativamente el área de superficie disponible para la adsorción. Esto a su vez aumenta la cantidad de sitios activos disponibles para la unión de contaminantes a eliminar del medio, lo que mejora la eficacia del proceso de adsorción.

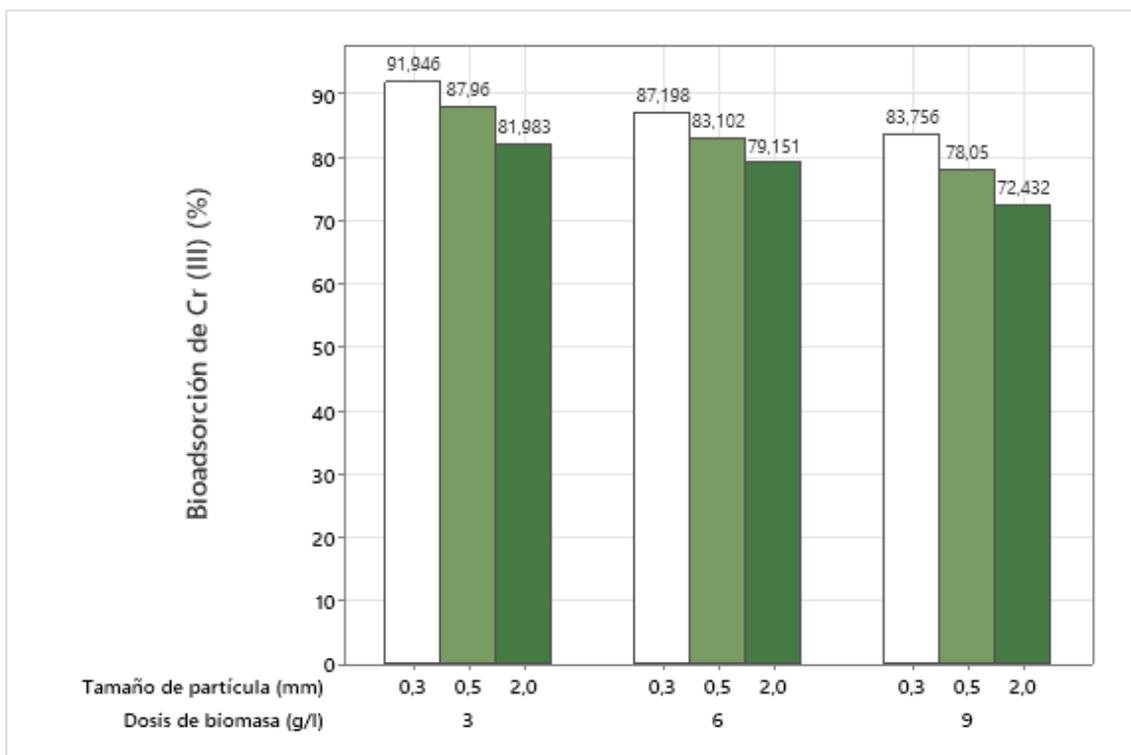


Ilustración 4-3: Diagrama de barras para la eficiencia de la bioadsorción de Cr (III)

Realizado por: Zambrano, M., 2023.

4.4. Tiempo de equilibrio

Se llevó a cabo el estudio del tiempo necesario para alcanzar el equilibrio entre la biomasa y la solución con la finalidad de determinar el tiempo requerido para lograr la máxima bioadsorción de los metales pesados bajo las condiciones de una concentración inicial de 4 ppm de Cd (II) y 7 ppm de Cr (III).

4.4.1. Cadmio

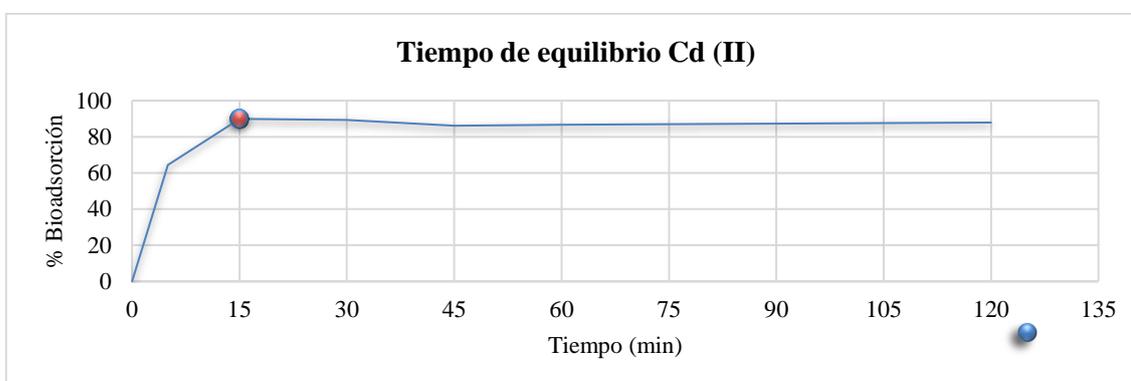


Ilustración 4-4: Tiempo de equilibrio Cadmio

Realizado por: Zambrano, M., 2023.

Los resultados indicaron que el proceso de bioadsorción de Cd (II) se puede observar desde los primeros 5 min obteniendo un porcentaje de bioadsorción de 64,42 % después se evidencia que la eficiencia del proceso continúa aumentando hasta alcanzar su máximo a los 15 min que llega al equilibrio con un alto porcentaje de bioadsorción de 89,88 % a una concentración de 0,405 mg/L posterior a ese tiempo el proceso de bioadsorción se ralentiza hasta alcanzar valores casi constantes. Comparado con el resultado reportado en la investigación de (Albortante Julisa et al., 2019, pp. 160-165) con el bagazo de cebolla sin modificación en el cual se encontró un tiempo de equilibrio menor a los 20 minutos alcanzando una eficiencia de adsorción mayor al 90 %.

4.4.2. Cromo

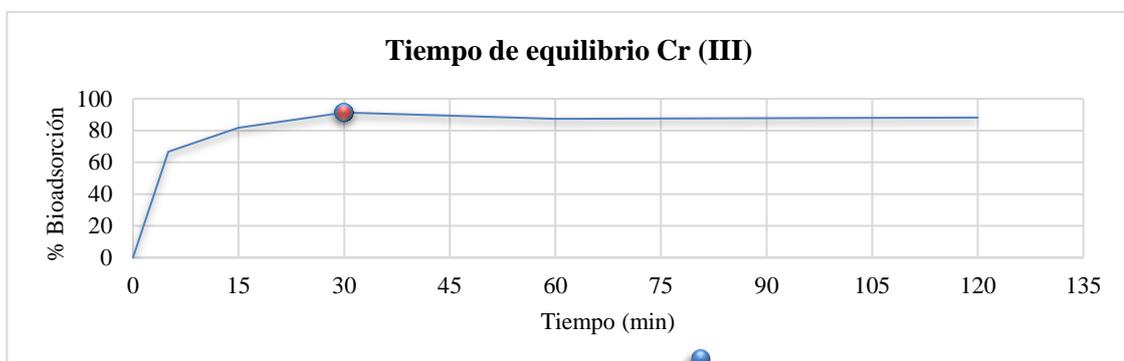


Ilustración 4-5: Tiempo de equilibrio Cromo

Realizado por: Zambrano, M., 2023.

El tiempo de equilibrio entre el adsorbente y los iones metálicos de Cr (III) se desarrolló con una etapa inicial rápida desde los primeros 5 minutos y continúa gradualmente hasta llegar al equilibrio a los 30 minutos alcanzando un porcentaje de bioadsorción de 91,33 % , seguida por un estado estable donde no hubo cambios significativos. Esto se debe probablemente a la gran área superficial del adsorbente disponible al principio, lo que resulta en una sorción física o intercambio iónico en la superficie de la celda. Por otro lado, la fase más lenta puede haber sido atribuida a otros mecanismos como la micro-precipitación, la complejación o la saturación del sitio de unión (Waweru et al., 2018, pp. 930-943).

4.5. Cinética de adsorción

Se aplicaron los modelos matemáticos de pseudo primer y pseudo segundo orden para encontrar el modelo que mejor represente la cinética de adsorción de Cd (II) y Cr (III) de las soluciones estudiadas. Se utilizaron los datos obtenidos en el tiempo de equilibrio respectivamente.

4.5.1. Modelo pseudo-primer orden

4.5.1.1. Cadmio (II)

Tabla 4-8: Parámetros Modelo Pseudo-Primer Orden para Cd (II)

Tiempo	Log(qe-qt)
5	0,353
15	-0,904
30	-0,843
45	-0,591
60	-0,627
120	-0,717

Realizado por: Zambrano, M., 2023.

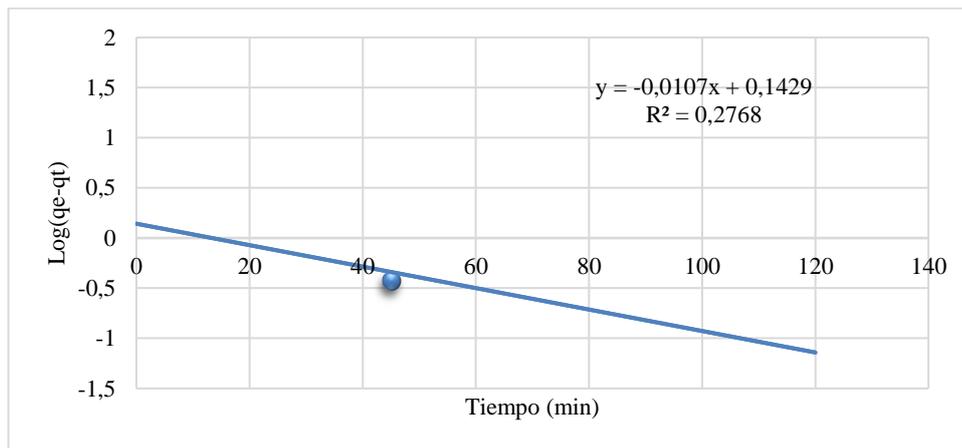


Ilustración 4-6: Ajuste Modelo Pseudo-Primer Orden para Cadmio (II)

Realizado por: Zambrano, M., 2023.

4.5.1.2. Cromo (III)

Tabla 4-9: Parámetros Modelo Pseudo-Primer Orden para Cr (III)

Tiempo	Log(qe-qt)
5	0,849
15	0,251
30	-0,500
45	-0,303
60	-0,115
120	-0,187

Realizado por: Zambrano, M., 2023.

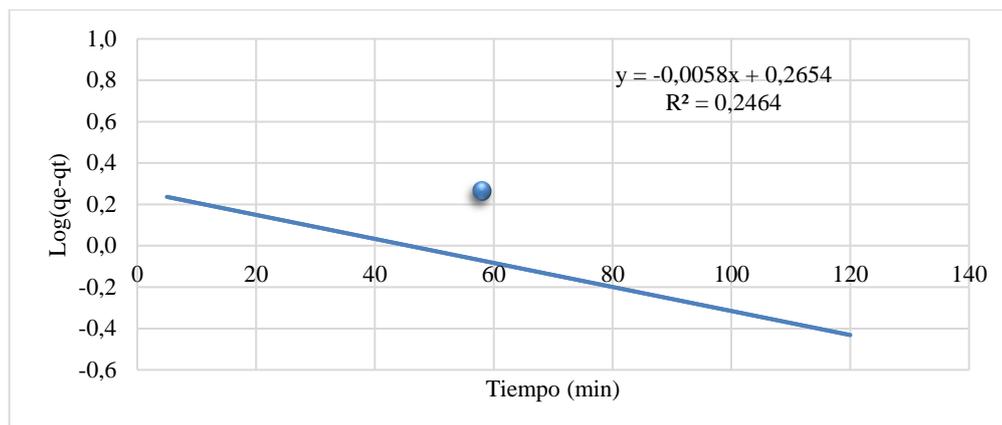


Ilustración 4-7: Ajuste Modelo Pseudo-Primer Orden para Cromo (III)

Realizado por: Zambrano, M., 2023.

En la ilustración 4-7 se observa que el proceso de adsorción de Cadmio (II) y Cromo (III) con cáscara de cebolla no se ajusta a una cinética de primer orden debido a que los datos están dispersos de la línea de tendencia y al obtener una correlación lineal $R^2 = 0,2768$ para Cadmio y $R^2 = 0,2464$ para Cromo.

4.5.2. Modelo pseudo-segundo orden

4.5.2.1. Cadmio (II)

Tabla 4-10: Parámetros Modelo Pseudo-Segundo Orden para Cd (II)

Tiempo	t/qt
5	19,404
15	41,724
30	84,044
45	130,569
60	173,110
120	341,724

Realizado por: Zambrano, M., 2023.

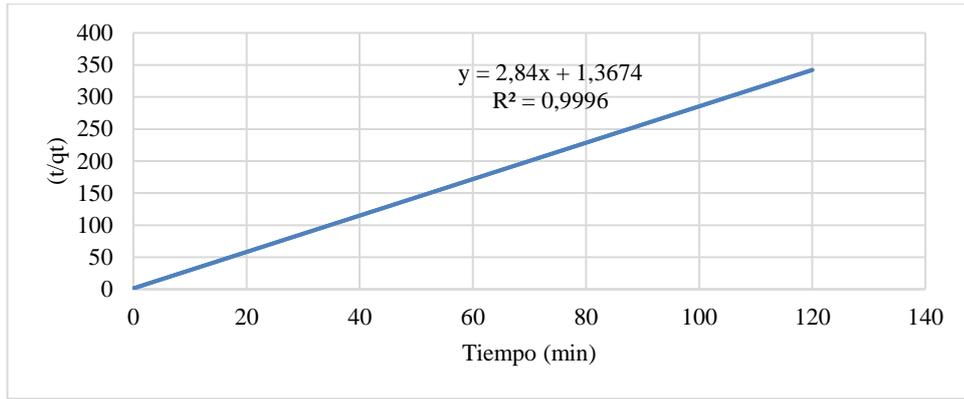


Ilustración 4-8: Ajuste Modelo Pseudo-Segundo Orden para Cadmio (II)

Realizado por: Zambrano, M., 2023.

4.5.2.2. Cromo (III)

Tabla 4-11: Parámetros Modelo Pseudo-Segundo Orden para Cr (III)

Tiempo	t/qt
5	10,723
15	26,250
30	46,924
45	71,869
60	98,221
120	194,460

Realizado por: Zambrano, M., 2023.

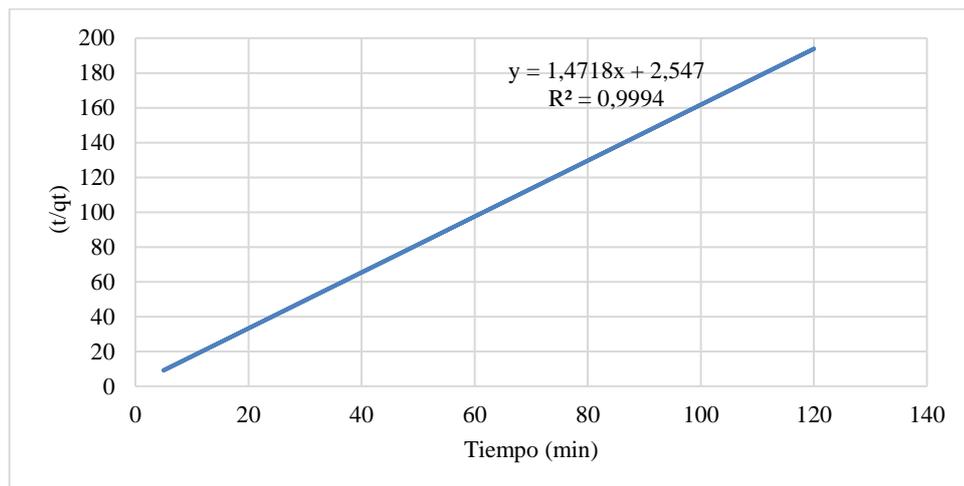


Ilustración 4-9: Ajuste Modelo Pseudo-Segundo Orden para Cromo (III)

Realizado por: Zambrano, M., 2023.

En las ilustraciones 4-8 y 4-9 los datos experimentales mostraron el mejor ajuste de los datos con el coeficiente de correlación muy cercano a 1 para cada uno de los iones metálicos. El modelo de pseudo segundo orden predice el comportamiento del proceso de bioadsorción en todo el rango del estudio, siendo la quimisorción la etapa controlante. Por lo tanto, los datos experimentales de la cinética de adsorción de Cadmio (II) y Cromo (III) con el uso de la cáscara de cebolla son respaldados con precisión por el modelo de segundo orden. Resultados similares se encontró en el estudio realizado por (Astudillo et al., s.f., pp. 182-188) en donde los datos obtenidos de proceso de bioadsorción con la hoja de maíz se ajustaron mejor al modelo de pseudo segundo orden obteniéndose un coeficiente de correlación de 1 para el Cadmio. (Prokopov et al., 2021, pp.399-410) en su estudio determino la adsorción de Cr (VI) con soluciones acuosas mediante residuos de procesamiento de cebolla extractada sigue la cinética de pseudo-segundo orden.

CAPÍTULO V

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

Se determinó que la cáscara de cebolla es eficiente como bioadsorbente para remover Cadmio y Cromo en aguas contaminadas a nivel laboratorio; debido a sus propiedades fisicoquímicas un pH de 4,72, una humedad del 10,94 %, cenizas de 5,05 % y una porosidad de 70,66 %. Por último, su espectro FT-IR nos indica la presencia de grupos funcionales como -OH, C-C, C-H, C=O, -COOH, que son capaces de unir los iones metálicos y permitir una variedad de interacciones químicas.

Se determinó el porcentaje de remoción de los metales pesados Cd y Cr a través de la variación de la dosis y el tamaño de partícula de la cáscara de cebolla en contacto con las soluciones acuosas, estimando una remoción del 89,24 % para Cd y 91,95 % para Cr.

El tiempo óptimo para llevar a cabo el proceso de bioadsorción se produjo en el tiempo de contacto de 15 minutos para Cadmio y 30 minutos para Cromo con el uso de la cáscara de cebolla después de esos tiempos se establece una absorción constante.

En el estudio de la cinética de adsorción, el modelo de Pseudo-Segundo Orden presenta el mejor ajuste con los datos experimentales obtenidos, debido a que su coeficiente de correlación es más alto que al descrito por una reacción de primer orden, siendo de 0.9996 para cadmio y 0.9994 para cromo.

La mejor combinación de la dosis y el tamaño de partícula de la cáscara de cebolla para la bioadsorción de Cd y Cr se determinó estadísticamente con la prueba LSD de Fisher, en donde se obtuvo que el tratamiento más eficaz para Cd (II) se encuentra con una dosis de 3 y 6 g/L a un tamaño de partícula de 0,3 mm, que permitió una bioadsorción de 89,24-88,09 % respectivamente, mientras que para Cromo (III) el mejor tratamiento fue a una dosis de 3 g/L de cáscara de cebolla a un tamaño de partícula de 0,3 mm, se logra 91,95 % de bioadsorción del metal bajo las condiciones de estudio.

5.2. Recomendaciones

- Analizar la eficiencia de bioadsorción que tiene la cáscara de cebolla frente a otros metales contaminantes presentes en aguas residuales.
- Se sugiere utilizar una máquina trituradora en lugar de realizar el proceso de forma manual, dado que esto ahorra tiempo y proporciona una mayor facilidad en la ejecución del experimento.
- Se recomienda cambiar los valores de las variables de estudio ya sea aumentándolos o disminuyéndolos para observar si se mantienen resultados óptimos.
- Se sugiere continuar aprovechando otros tipos de materiales orgánicos considerados como desechos, ya que podrían tener buena capacidad de adsorción.
- Se recomienda utilizar tiempos más prolongados a los estudiados para determinar si se sigue realizando el proceso de bioadsorción.
- Se recomienda estudiar otros factores que influyan en la capacidad de bioadsorción para optimizar los procesos del mismo y sean eficientes en la eliminación de contaminante del agua.

BIBLIOGRAFÍA

- AGASTI, N.**, 2021. *Decontamination of heavy metal ions from water by composites prepared from waste*. 1 enero 2021. S.l.: Elsevier B.V.
- AHMAD, F. y ZAIDI, S.**, 2020. Potential Use of Agro/Food Wastes as Biosorbents in the Removal of Heavy Metals. [en línea], [consulta: 5 noviembre 2023]. Disponible en: <https://www.intechopen.com/chapters/73900>.
- AKBUDAK, N., TÜRK BEN, C., ZAMBI, O., ŞAHINARSLAN, A., ÖZCAN, F. y ÖZKAN, S.**, 2018. Physical Characteristics and Chemical Compositions of Local Red Onion Cultivar Grown in Kapıdağ, Turkey. *J. BIOL. ENVIRON. SCI.*
- ALBORTANTE JULISA, G., RAMÍREZ MARTHA BEATRIZ, M., QUINTAL ICELA DAGMAR, B., CORREA HUGO EDUARDO, S. y BERTHET LUIS JESÚS, O.**, 2019. Influencia de la dosificación de dos adsorbentes en la remoción de Cd (II) en solución acuosa.
- ALI REDHA, A.**, 2020. *Removal of heavy metals from aqueous media by biosorption*. 1 enero 2020. S.l.: Taylor and Francis Ltd.
- ALIYU, A.O., MUSA FAIZA KALLAMU, FARURUWA, M.D. y OKUNOLA, O.J.**, 2022. EVALUATION OF THE POTENTIAL OF ONION PEEL COMPOSITE AS AN ADSORBENT FOR THE REMOVAL OF CATIONS IN FISH POND WASTEWATER. *FUDMA JOURNAL OF SCIENCES*, vol. 6, no. 4, ISSN 2645-2944. DOI 10.33003/fjs-2022-0604-1077.
- AL-NUAIM, M.A., ALWASITI, A.A. y SHNAIN, Z.Y.**, 2022. *The photocatalytic process in the treatment of polluted water*. 1 febrero 2022. S.l.: Springer Science and Business Media Deutschland GmbH.
- AL-SENANI, G.M. y AL-FAWZAN, F.F.**, 2018. Adsorption study of heavy metal ions from aqueous solution by nanoparticle of wild herbs. *Egyptian Journal of Aquatic Research*, vol. 44, no. 3, ISSN 20903278. DOI 10.1016/j.ejar.2018.07.006.
- AMERI, A., TAMJIDI, S., DEHGHANKHALILI, F., FARHADI, A. y SAATI, M.A.**, 2020. *Application of algae as low cost and effective bio-adsorbent for removal of heavy metals*

from wastewater: a review study [en línea]. 1 enero 2020. S.l.: Taylor and Francis Ltd. [consulta: 8 junio 2023]. Disponible en: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/21622515.2020.1831619>.

ANÍBAL, P., OJEDA, V., RUBÉN, A., TOLEDO, S. y DANIEL GONZÁLEZ VILLALBA, J., 2019. Cultivo de cebolla. [en línea]. S.l.: [consulta: 9 junio 2023]. Disponible en: https://www.jica.go.jp/paraguay/espanol/office/others/c8h0vm0000ad5gke-att/gt_02.pdf.

ASTUDILLO, S., VERA, L., ASTUDILLO, J. y CASTRO, C., 2019. Evaluación del poder biosorbente de la hoja de maíz en la remoción de metales pesados Evaluation of the biosorbent power of corn leaf in the removal of heavy metal Avaluació del poder biosorbent del full de blat de moro a la remoció de metalls pesants.

AVEIGA, A., BANCHÓN, C., MENDOZA, L., JOSÉ, C. y DELGADO, M., 2022. Distribución de metales pesados en agua, sedimentos y peces del río Carrizal, Ecuador. [en línea], vol. XLIII, no. 3, Disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1680-03382022000300013.

AYOB, S., OTHMAN, N., ALI HAMOOD ALTOWAYTI, W., KHALID, F.S., BAKAR, N.A., TAHIR, M. y SOEDJONO, E.S., 2021. A Review on Adsorption of Heavy Metals from Wood-Industrial Wastewater by Oil Palm Waste. *Journal of Ecological Engineering*, vol. 22, no. 3, ISSN 22998993. DOI 10.12911/22998993/132854.

BAMBA, B.S.B., KOMENAN, A.C.A., KOUASSI, K.K.P. y SORO, D., 2020. Effects of onion bulb processing conditions on drying characteristics, physicochemical and functional properties profile of onion (*Allium cepa* L.) powder. *Journal of Food Science*, vol. 85, no. 10, ISSN 17503841. DOI 10.1111/1750-3841.15415.

BAYUO, J., RWIZA, M.J., SILLANPÄÄ, M. y MTEI, K.M., 2023. *Removal of heavy metals from binary and multicomponent adsorption systems using various adsorbents - a systematic review*. 28 abril 2023. S.l.: Royal Society of Chemistry.

BELETE, S.G., 2019. ADSORPTION OF LEAD AND COPPER FROM INDUSTRIAL WASTE WATER USING ONION SKINS A CASE STUDY OF AYKA ADDIS TEXTILE AND INVESTMENT GROUP A MASTER'S THESIS.

BONILLA, S., ORTIZ, E. y VEGA, Lady, 2023. ESTUDIO DE LA BIOADSORCIÓN DE METALES PESADOS (Pb Y Cu) EN LAS AGUAS DEL RÍO PUYANGO, UTILIZANDO CÁSCARA DE NARANJA Y PLÁTANO MANZANO. [en línea], [consulta: 26 noviembre 2023]. Disponible en: <https://revistas.ug.edu.ec/index.php/iqd/article/view/2373>.

CHATTERJEE, A. y ABRAHAM, J., 2019. *Desorption of heavy metals from metal loaded sorbents and e-wastes: A review*. 15 marzo 2019. S.l.: Springer Netherlands.

COLLANTES, L., 2019. Capacidad biosorbente de plomo de la cáscara de naranja (*Citrus sinensis* (L.) Osbeck) y la vaina de taya (*Caesalpinia spinosa* (Molina) Kuntze). [en línea], [consulta: 26 noviembre 2023]. Disponible en: <https://repositorio.unc.edu.pe/handle/20.500.14074/3392>.

DHAKAL y DIKSHYA, 2018. ARSENIC ADSORPTION FROM GROUND WATER USING NON-TOXIC WASTE AS ADSORBENTS BY DIKSHYA DHAKAL.

DÍAS, M. y LÓPEZ, E., 2021. *Metales pesados en nuestra mesa: contaminación de peces de consumo humano en Colombia*. S.l.: Universidad Sergio Arboleda Open Access.

GARCIA, P.T., 2022. Composición y aporte de sustancias bioactivas de subproductos hortícolas. *Revista del Foro de la Alimentación, la Nutrición y la Salud (RFANUS)*, vol. 3.

GAVIOLA, S., LOMBARDO, G., FERREIRÓS, L., RODRÍGUEZ, E. del P., SAPOZNIK, M., CONTRERAS, A. y PEREZ, J., 2019. EXPOSICIÓN A CROMO Y SUS COMPUESTOS. [en línea]. S.l.: [consulta: 11 julio 2023]. Disponible en: https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/13_cromo_guia_de_actuacion_y_diagnostico.pdf.

GAVIOLA, S., LOMBARDO, G., MALINOVSKY, V., FERREIRÓS, L., RODRÍGUEZ, E. del P., SAPOZNIK, M., CONTRERAS, A. y PEREZ, S., 2019. Grupo de Trabajo Dra. Valeria Malinovsky Médica Especialista en Toxicología. [en línea]. S.l.: [consulta: 18 octubre 2023]. Disponible en: https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/13_cromo_guia_de_actuacion_y_diagnostico.pdf.

- GENCHI, G., SINICROPI, M.S., LAURIA, G., CAROCCI, A. y CATALANO, A., 2020.** *The effects of cadmium toxicity* [en línea]. 1 junio 2020. S.l.: MDPI AG. [consulta: 25 junio 2023]. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32466586/>.
- GONZÁLEZ, A.G., POKROVSKY, O.S., SANTANA-CASIANO, J.M. y GONZÁLEZ-DÁVILA, M., 2018.** Bioadsorption of heavy metals. *Prospects and Challenges in Algal Biotechnology*. S.l.: Springer Singapore, pp. 233-255. ISBN 9789811019500.
- GOUDA, S.A. y TAHA, A., 2023.** Biosorption of Heavy Metals as a New Alternative Method for Wastewater Treatment: A Review. [en línea]. S.l.: [consulta: 5 noviembre 2023]. Disponible en: https://ejabf.journals.ekb.eg/article_291671_374c9fa6ea85408ae7c7f1a353e63751.pdf.
- HUSSAIN, S.A., HASAN, N.K. y AL-ABODI, E.E., 2021.** Biosorption to removing heavy metals from wastewater. *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1853, no. 1, ISSN 17426596. DOI 10.1088/1742-6596/1853/1/012012.
- JADAA, W. y MOHAMMED, H., 2023.** Heavy Metals – Definition, Natural and Anthropogenic Sources of Releasing into Ecosystems, Toxicity, and Removal Methods – An Overview Study. *Journal of Ecological Engineering* [en línea], vol. 24, no. 6, [consulta: 6 julio 2023]. ISSN 22998993. DOI 10.12911/22998993/162955. Disponible en: <http://www.jeeng.net/Heavy-Metals-Definition-Natural-and-Anthropogenic-Sources-of-Releasing-into-Ecosystems,162955,0,2.html>.
- KANAMARLAPUDI, S.L.R.K., CHINTALPUDI, V.K. y MUDDADA, S., 2018.** Application of Biosorption for Removal of Heavy Metals from Wastewater. [en línea], [consulta: 5 noviembre 2023]. Disponible en: <https://www.intechopen.com/chapters/62247>.
- LAWRENCE, K., WANG, D.A., VACCARI, Y.L. y NAZIH, K.S., 2019.** Chemical Precipitation. [en línea], [consulta: 9 junio 2023]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/226825669_Chemical_Precipitation.
- LEMA, K. y PÉREZ, A., 2021.** Evaluación de la capacidad de adsorción de cromo hexavalente en aguas sintéticas mediante el uso de la cáscara de naranja (*Citrus Sinensis*) y cáscara de limón (*Citrus Limon*). [en línea], [consulta: 26 noviembre 2023]. Disponible en: <https://www.dspace.uce.edu.ec/server/api/core/bitstreams/da139242-73f7-4f83-b462-0f4be33b70a0/content>.

LUCÍN, A. y RAMIREZ, M., 2021. *EVALUACIÓN BIOADSORBENTE DE CÁSCARAS DE NARANJA (Citrus sinensis) Y MANDARINA (Citrus reticulata) EN AGUAS ESTUARINAS CON PRESENCIA DE CADMIO Y PLOMO.* S.l.: s.n.

MAHDI, R.K., NAJI, N.M., AL-MAMOORI, S.O.H., AL-RIFAIE, Z.I. y ALI, R.N., 2021. Effect Cadmium on living organisms. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* [en línea]. S.l.: IOP Publishing Ltd, [consulta: 17 junio 2023]. vol. 735. DOI 10.1088/1755-1315/735/1/012035. Disponible en: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/735/1/012035/pdf>.

MARTÍNEZ REMEDIOS, 2019. Análisis instrumental: Espectrometría de Absorción Atómica (EAA).

MÉRIDA, S., 2020. Características inorgánicas, biológicas y toxicológicas del Cromo.

MESIAS, G.G., SHAKAI, G.S., MARTÍNEZ, S.P. y PILCO, C.J., 2022. Utilización de subproductos agroindustriales para la bioadsorción de metales pesados. *STUDIES IN ENVIRONMENTAL AND ANIMAL SCIENCES* [en línea], vol. 3, no. 3, ISSN 2764-0760. DOI 10.54020/seasv3n3-022. Disponible en: <https://studiespublicacoes.com.br/ojs/index.php/seas/article/view/798>.

OCTAVIO-AGUILAR, P. y OLMOS-PALMA, D.A., 2022. Efectos sobre la salud del agua contaminada por metales pesados. *Herreriana*, vol. 4, no. 1, DOI 10.29057/h.v4i1.8630.

OLASEHINDE, E.F., ADEGUNLOYE, A. V., ADEBAYO, M.A. y OSHODI, A.A., 2018. Sequestration of Aqueous Lead(II) Using Modified and Unmodified Red Onion Skin. *Analytical Letters*, vol. 51, no. 17, ISSN 1532236X. DOI 10.1080/00032719.2018.1448989.

OLASEHINDE, E.F., ADEGUNLOYE, A. V., ADEBAYO, M.A. y OSHODI, A.A., 2019. Cadmium (II) Adsorption from Aqueous Solutions Using Onion Skins. *Water Conservation Science and Engineering*, vol. 4, no. 4, ISSN 23645687. DOI 10.1007/s41101-019-00077-2.

OLAWALE, S.A., 2020. ACTA SCIENTIFIC AGRICULTURE (ISSN: 2581-365X) Biosorption of Heavy Metals: A Mini Review Mini Review.

OPUTE, 2018. The Effectiveness of Low Cost Adsorbents (Onion and Garlic Skins) In The Removal of Cd(II) from Aqueous Solution. *International Journal of Research and*

Innovation in Applied Science (IJRIAS) / [en línea]. S.l.: Disponible en: www.rsisinternational.org.

ORD, J.I., CORT, S. y MALUENDA, P., 2023. Biosorption of Heavy Metals with Algae : Critical Review of Its Application in Real Effluents.

ORTEGA RAMÍREZ, A.T. y SÁNCHEZ RODRÍGUEZ, N., 2021. Tratamientos avanzados para la potabilización de aguas residuales. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, vol. 31, no. 2, ISSN 0124-8170. DOI 10.18359/rcin.5343.

PABÓN, S.E., BENÍTEZ, R., SARRIA, R.A., GALLO, J.A., PABÓN, S.E., BENÍTEZ, R., SARRIA, R.A. y GALLO, J.A., 2020. Contaminación del agua por metales pesados, métodos de análisis y tecnologías de remoción. Una revisión. *Entre Ciencia e Ingeniería* [en línea], vol. 14, no. 27, [consulta: 30 abril 2023]. ISSN 1909-8367. DOI 10.31908/19098367.0001. Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-83672020000100009&lng=en&nrm=iso&tlng=es.

PAREEK, S., SAGAR, N.A., SHARMA, S. y KUMAR, V., 2018. Onion (*allium cepa* L.). *Fruit and Vegetable Phytochemicals: Chemistry and Human Health: Second Edition* [en línea]. S.l.: Wiley Blackwell, pp. 1145-1161. [consulta: 24 septiembre 2023]. vol. 2. ISBN 9781119158042. Disponible en: <http://www.psf.org.pe/institucional/wp-content/uploads/2020/06/Onion-Alliumcepa-Pareek.2018.pdf>.

POZO MIRANDA, F., 2018. Presencia de metales pesados Cadmio y Plomo en el estuario del río Chone Manabí, Ecuador.// Presence of cadmium and lead heavy metals in the estuary of Chone River - Manabí, Ecuador. *CIENCIA UNEMI*, vol. 10, no. 24, ISSN 1390-4272. DOI 10.29076/issn.2528-7737vol10iss24.2017pp123-130p.

PROKOPOV, T. V, NIKOLOVA, M.I., TANEVA, D.S. y PETKOVA, N.T., 2021. REMOVAL OF CHROMIUM (VI) FROM AQUEOUS SOLUTION BY EXTRACTED ONION PROCESSING WASTE.

RATHI, B.S. y KUMAR, P.S., 2021. Application of adsorption process for effective removal of emerging contaminants from water and wastewater. *Environmental Pollution* [en línea], vol. 280, [consulta: 9 junio 2023]. ISSN 18736424. DOI 10.1016/j.envpol.2021.116995. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0269749121005777>.

RUSDIANASARI, JAKSEN, TAQWA, A. y WIJARNAKO, Y., 2019. Effectiveness of Electrocoagulation Method in Processing Integrated Wastewater Using Aluminum and Stainless Steel Electrodes. *Journal of Physics: Conference Series* [en línea]. S.l.: Institute of Physics Publishing, [consulta: 9 junio 2023]. vol. 1167. DOI 10.1088/1742-6596/1167/1/012040. Disponible en: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1167/1/012040/pdf>.

SAGAR, N.A., KHAR, A., VIKAS, TARAFDAR, A. y PAREEK, S., 2021. Physicochemical and Thermal Characteristics of Onion Skin from Fifteen Indian Cultivars for Possible Food Applications. *Journal of Food Quality* [en línea], vol. 2021, [consulta: 25 julio 2023]. ISSN 17454557. DOI 10.1155/2021/7178618. Disponible en: https://downloads.hindawi.com/journals/jfq/2021/7178618.pdf?_gl=1*1kigy06*_ga*NzY4ODgzOTcyLjE2ODMyMjI1NDU.*_ga_NF5QFMJT5V*MTY5MDM5MDczNi41LjAuMTY5MDM5MDczNi42MC4wLjA.&_ga=2.211349522.603618719.1690385596-768883972.1683222545.

SALMAN, M., SHAKIR, M. y YASEEN, M., 2022. Recent Developments in Membrane Filtration for Wastewater Treatment. [en línea]. S.l.: s.n., pp. 1-25. [consulta: 9 junio 2023]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/360116764_Recent_Developments_in_Membrane_Filtration_for_Wastewater_Treatment.

SANCHEZ-SILVA, J.M., GONZÁLEZ-ESTRADA, R.R., BLANCAS-BENITEZ, F.J. y FONSECA-CANTABRANA, Á., 2020. Utilización de subproductos agroindustriales para la bioadsorción de metales pesados. *TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, vol. 23, ISSN 1405-888X. DOI 10.22201/fesz.23958723e.2020.0.261.

SHI, H., 2018. POINT SOURCES OF POLLUTION: LOCAL EFFECTS AND IT'S CONTROL Vol. I.

SILVA, M.J. y SALINAS, D., 2020. La contaminación proveniente de la industria curtiembre, una aproximación a la realidad ecuatoriana. [en línea], [consulta: 6 noviembre 2023]. Disponible en: <https://revista.uisrael.edu.ec/index.php/rcui/article/view/427/517>.

SIRILERT, M. y MAIKRANG, K., 2018. Adsorption Isotherm of Some Heavy Metals in Water on Unripe and Ripe Peel of Banana. *Naresuan University Journal: Science and Technology*.

SUJATA, M., CALDERÓN, J., B, S., A, M. y Q, S., 2021. Mesoporous activated carbon as a green adsorbent for the removal of heavy metals and Congo red: Characterization, adsorption kinetics, and isotherm studies. [en línea], [consulta: 21 mayo 2023]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S016977222100108X>.

TEJADA, C., VILLABONA, Á. y GARCÉS, L., 2018. Adsorción de metales pesados en aguas residuales usando materiales de origen biológico. [en línea], [consulta: 13 septiembre 2023]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/319144872_Adsorcion_de_metales_pesados_en_aguas_residuales_usando_materiales_de_origen_biologico.

THARANNUM, S. y MURTHY, K. V, 2018. Toxic heavy metal chromium remediation by processed low cost adsorbent-Green coconut shell.

TORRES, E., 2020. *Biosorption: A review of the latest advances*. 1 diciembre 2020. S.l.: MDPI AG.

TULSMA, 2015. ANEXO 1 DEL LIBRO VI DEL TEXTO UNIFICADO DE LEGISLACION SECUNDARIA DEL MINISTERIO DEL AMBIENTE: NORMA DE CALIDAD AMBIENTAL Y DE DESCARGA DE EFLUENTES AL RECURSO AGUA NORMA DE CALIDAD AMBIENTAL Y DE DESCARGA DE EFLUENTES : RECURSO AGUA 0 INTRODUCCIÓN.

VIVEK, C., PADMAJA, B., SRIDHAR, D. y PEERA, K., 2020. Cadmium Toxicity Impact On Aquatic Organisms-Oxidative Stress: Implications For Human Health, Safety And Environmental Aspects-A Review. [en línea], [consulta: 25 junio 2023]. ISSN 2277-8616. Disponible en: <http://www.ijstr.org/final-print/mar2020/Cadmium-Toxicity-Impact-On-Aquatic-Organisms-oxidative-Stress-Implications-For-Human-Health-Safety-And-Environmental-Aspects-a-Review.pdf>.

WAWERU, B.W., MWANGI, I.W., MURUNGI, J., WANJAU, R.N., MSAGATI, T.A.M. y MANOHAH, R., 2018. Remediation of Lead, Cadmium and Copper Polluted Waters by Onion Skins (*Allium Cepa*). *International Journal of Agriculture Innovations and Research*.

YUSUFF, A.S., POPOOLA, L.T. y ANOCHIE, V., 2021. Utilization of agricultural waste adsorbent for the removal of lead ions from aqueous solutions. *Symmetry*, vol. 13, no. 10, ISSN 20738994. DOI 10.3390/sym13101777.



ANEXOS

ANEXO A: PREPARACIÓN DEL MATERIAL BIOADSORBENTE



a.



b.



c.



d.



e.



f.



g.

a. Recolección de la materia prima	e. Molienda
b. Selección	f. Tamizado
c. Lavado	g. Material bioadsorbente en diferentes tamaños
d. Secado	

ANEXO B: PREPARACIÓN DE SOLUCIONES DE CADMIO Y CROMO



a.



b.



c.



d.

- a. Pesaje de Nitrato de Cadmio
- b. Pesaje de Cloruro de Cromo
- c. Solución patrón de Cd (II)
- d. Solución patrón de Cr (III)

ANEXO C: BIOADSORCIÓN DE CADMIO Y CROMO



a.



b.



c.

- a. Agitación de las muestras en el test de jarras
- b. Preparación del equipo
- c. Análisis de las muestras en el Espectrómetro de absorción atómica

ANEXO D: PROCESO DE BIOADSORCIÓN PARA DETERMINAR EL TIEMPO DE EQUILIBRIO



a.



b.



c.

- a. Agitación en diferentes tiempos
- b. Filtración de las muestras
- c. Análisis de las muestras



epoch

Dirección de Bibliotecas y
Recursos del Aprendizaje

UNIDAD DE PROCESOS TÉCNICOS Y ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO Y
DOCUMENTAL

REVISIÓN DE NORMAS TÉCNICAS, RESUMEN Y BIBLIOGRAFÍA

Fecha de entrega: 18 / 01 / 2024

INFORMACIÓN DEL AUTOR/A (S)
Nombres – Apellidos: Mishell Andrea Zambrano Alcoser
INFORMACIÓN INSTITUCIONAL
Facultad: Ciencias
Carrera: Ingeniería Ambiental
Título a optar: Ingeniera Ambiental
f. Analista de Biblioteca responsable: Ing. Rafael Inty Salto Hidalgo


0020-DBRA-UPT-2024
