



Área de Conocimiento de Agricultura

ESTUDIO DE LA CINÉTICA Y DINÁMICA DE ADSORCIÓN DE CROMO VI EN SEMILLA TRITURADA DE *MORINGA* *OLEÍFERA*

**Trabajo Monográfico para optar al título de
Ingeniero Químico**

Elaborado por:

Tutor:

Br. Luis Alejandro Pérez Mercado
Carnet: 2016-0517U

MPhil. Martha Elizabeth Benavente Silva

25 febrero, 2025.
Managua, Nicaragua.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por las bendiciones que día a día me ha regalado a mí y mi familia.

A mi casa de estudios Universidad Nacional de Ingeniería y a cada docente que fueron parte fundamental en mi camino a la formación profesional.

A mi tutora MPhil. Martha Benavente Silva por su acompañamiento y asesoramiento en la culminación de este trabajo de diploma, gracias profe por su paciencia y comprensión que me tuvo en cada etapa de dicho trabajo.

A mis tíos, tías, abuelas, abuelos, amigos y cada persona que siempre me brindaron su apoyo.

A mis queridas amigas con quienes compartí cada etapa de esta formación, puntualizando el apoyo incondicional de mi colega y amiga Ing. Laura Victoria Gutiérrez Montoya, gracias por todo el apoyo que me has brindado, a mi estimado profesor Francisco Canelo por su apoyo brindado ¡muchas gracias profe!, a mis queridos Engels y Thomiris Alegría por acogerme en su hogar y por su apoyo brindado, a mi Karen Picado gracias por tu cariño y apoyo, a mi estimado amigo Adonis López gracias por el apoyo incondicional que me has brindado a mí y a mi familia y Finalmente, a mi querida amiga Lic. Danelis Barrios por acompañarme y siempre brindarme esos valiosos consejos y por cada conversación que compartimos.

DEDICATORIA

Este trabajo monográfico va dedicado primeramente a Dios por su infinito amor, sabiduría y salud que me ha brindado para poder culminar dicho trabajo monográfico.

A mis padres, María de Fátima Mercado por brindarme desde pequeño buenos hábitos y valores, por ser siempre mi fortaleza y mi fiel acompañante en cada etapa de mi vida desde educación primaria, hasta la fecha en mi formación profesional, a mi padre William José Pérez García, por tu apoyo incondicional y por darme ese ánimo de ser perseverante en cada momento.

A mis queridos hermanos, a cada de uno de ustedes gracias por siempre estar ahí para mí y darme su apoyo incondicional, este trabajo monográfico es suyo también.

Luis Alejandro Pérez Mercado

RESUMEN

El presente estudio se llevó a cabo en el Laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI) con el objetivo de evaluar la cinética y dinámica de adsorción de cromo VI en semillas de *Moringa oleífera* con bajo contenido de aceite, utilizadas como bioadsorbente. Las semillas fueron recolectadas en el municipio de La Paz Centro, León, y tratadas para obtener un adsorbente con las características adecuadas para su uso en la adsorción de contaminantes.

En el estudio cinético, el pH de las soluciones preparadas con concentraciones de 25, 50 y 100 mg/L del ion cromo VI se ajustó a un rango de 3.5 a 7.0. Los experimentos se realizaron en un reactor agitado durante 8 horas, y la concentración final de cromo VI se determinó utilizando un espectrómetro de absorción atómica. Los datos experimentales se ajustaron a los modelos de Pseudo-Primer Orden y Pseudo-Segundo Orden. En cuanto a la dinámica de adsorción, se llevó a cabo en una columna con soluciones entre 2.70 y 5.90 mg/L, utilizando caudales promedio de 1 y 2 mL/s y velocidades de flujo de 35 y 75 rpm. Se tomaron alícuotas de 10 mL a la salida de la columna para determinar la concentración final de cromo.

Los resultados obtenidos indican que, a bajas cantidades de biomasa (2 y 5 g), el mecanismo predominante en el ajuste de los datos experimentales corresponde al modelo de Pseudo-Segundo Orden. Esto sugiere que la etapa principal en la adsorción de cromo VI es el proceso de adsorción en sí, en lugar de la transferencia de masa. En contraste, a altas cantidades de biomasa (10 g), el mecanismo se orienta hacia la transferencia de masa. En el análisis de la dinámica de adsorción, se observó que caudales bajos (1 mL/s) permitieron una adsorción más eficiente debido a un mayor tiempo de contacto entre el adsorbente y el adsorbato. Por otro lado, caudales altos (2 mL/s) redujeron la eficiencia de adsorción, ya que el tiempo de contacto fue insuficiente, lo que ocasionó el colapso parcial de la columna. No obstante, se concluye que la biomasa utilizada fue efectiva en la retención del ion cromo VI durante el proceso de operación de la columna. Los resultados obtenidos respaldan la hipótesis planteada en este estudio, en la cual se afirmaba que la velocidad de alimentación afecta de manera significativa el proceso de adsorción en columnas de lecho fijo.

Este estudio aporta evidencia sobre el potencial de la semilla de *Moringa oleífera* como un bioadsorbente eficaz para la eliminación de cromo VI de soluciones acuosas, contribuyendo así a la búsqueda de soluciones sostenibles para la contaminación ambiental.

TABLA DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	ii
DEDICATORIA	iii
RESUMEN.....	iv
TABLA DE CONTENIDO.....	v
ÍNDICE DE TABLAS.....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
I. INTRODUCCION	1
II. OBJETIVOS	4
2.1. Objetivo General	4
2.2. Objetivos Específicos	4
III. MARCO TEORICO	5
3.1. Generalidades de la <i>Moringa oleífera</i>	5
3.2. Aplicaciones de la <i>Moringa oleífera</i>	5
3.3. Generalidades del Cromo Hexavalente.....	6
3.3.1. Toxicidad del cromo.....	6
3.3.2. Efectos en el medio ambiente.....	7
3.3.3. Contaminación de Cromo en Nicaragua.....	7
3.3.4. Remoción de Cromo	8
3.4. Aguas residuales de tenería.....	9
3.4.1. Composición del afluente.....	10
3.5. Espectroscopia por infrarrojo (IR).....	11
3.6. Adsorción	12
3.6.1. Tipos de adsorción.....	12
3.6.2. Cinética de adsorción	13
3.6.3. Modelos cinéticos de adsorción	13
3.6.4. Adsorción en columnas empacadas	15
IV. HIPÓTESIS.....	18
4.1. Diseño experimental para el estudio de la cinética de adsorción de cromo hexavalente.....	18
4.2. Diseño experimental para la evaluación de la dinámica de adsorción de Cromo VI utilizando semilla triturada de <i>Moringa oleífera</i>	18

V. METODOLOGIA.....	19
5.1. Recolección de semillas de Moringa	19
5.2. Reactivos y materiales de laboratorio.....	20
5.3. Preparación de las semillas de Moringa.....	20
5.4. Análisis IR de la semilla triturada de <i>Moringa oleífera</i>	22
5.5. Proceso de extracción de aceite a la semilla de <i>Moringa oleífera</i>	22
5.6. Análisis de aceite en la semilla de <i>Moringa oleífera</i>	23
5.7. Elaboración de la solución sintética de cromo VI	25
5.8. Estudio de la cinética de adsorción	25
5.9. Estudio de la Dinámica de adsorción	26
5.9.1. Determinación de la Densidad de conjunto	26
5.9.2. Determinación de la Densidad de partícula	27
5.9.3. Determinación de la Porosidad total	27
5.9.4. Determinación del Volumen del Lecho	27
5.9.5. Montaje de la columna de adsorción	28
5.10. Diseño Experimental	30
5.10.1. Diseño del Estudio de la Cinética de Adsorción	30
5.10.2. Estudio de la Dinámica de adsorción	31
VI. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	34
6.2. Preparación de la semilla de <i>Moringa Oleífera</i>	34
6.3. Análisis de aceite en la semilla de <i>Moringa oleífera</i>	35
6.4. Caracterización del Análisis Espectral.....	37
6.5. Evaluación de la Cinética de Adsorción	38
6.6. Determinación de la Dinámica de Adsorción.....	48
VII. CONCLUSIONES	55
VIII. RECOMENDACIONES.....	56
IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	57
ANEXO A	58
ANEXO B	58

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla No.	Descripción	Página
3.1	Principales contaminantes en el agua de una curtiembre	10
3.2	Contenidos aproximados de contaminantes en las aguas residuales de curtiembre	11
3.3	Modelos cinéticos de adsorción	14
5.1	Variables o Factores Independientes y Dependientes	31
5.2	Tabla de diseño aleatorizada del estudio de la Cinética de adsorción	31
5.3	Variables o Factores Independientes y Dependientes	33
5.4	Tabla de diseño aleatorizada del estudio de la dinámica de adsorción	33
6.1	Composición de la semilla de <i>Moringa Oleífera</i>	34
6.2	Análisis de humedad a la semilla triturada de <i>Moringa Oleífera</i>	35
6.3	Resultados del porcentaje de grasa extraída y retenida en la semilla después de la extracción de aceite	36
6.4	Valores de q_e , K_1 y K_2 para Cr VI, determinados de acuerdo a los modelos de Pseudo-Primer orden y Pseudo-Segundo orden utilizando diferentes masas de adsorbente, diferentes concentraciones iniciales y tamaño de partícula de <0.45 mm	47
6.5	Densidad de conjunto para la semilla triturada de <i>Moringa Oleífera</i>	48
6.6	Densidad de partícula para la semilla triturada de <i>Moringa Oleífera</i>	49
6.7	Porosidad total para la semilla triturada de <i>Moringa Oleífera</i>	49
A.1	Equipos de laboratorio	61
A.2	Reactivos	61
A.3	Cristalería y material de laboratorio	62
B.1	Resultados de los diferentes pesajes de los conjuntos para análisis Soxhlet	69
B.2	Resultados del experimento N°1 del estudio de la Cinética de Adsorción en el ajuste de las ecuaciones de Pseudo-Primer y Pseudo-Segundo Orden	70

B.3	Resultados del experimento N°2 del estudio de la Cinética de Adsorción en el ajuste de las ecuaciones de Pseudo-Primer y Pseudo-Segundo Orden	71
B.4	Resultados del experimento N°3 del estudio de la Cinética de Adsorción en el ajuste de las ecuaciones de Pseudo-Primer y Pseudo-Segundo Orden	72
B.5	Resultados del experimento N°4 del estudio de la Cinética de Adsorción en el ajuste de las ecuaciones de Pseudo-Primer y Pseudo-Segundo Orden	73
B.6	Resultados del experimento N°5 del estudio de la Cinética de Adsorción en el ajuste de las ecuaciones de Pseudo-Primer y Pseudo-Segundo Orden.	74
B.7	Resultados del experimento N°6 del estudio de la Cinética de Adsorción en el ajuste de las ecuaciones de Pseudo-Primer y Pseudo-Segundo Orden.	75
B.8	Resultados del experimento N°1 del estudio de la Dinámica de Adsorción en el ajuste de la curva de adsorción	76
B.9	Resultados del experimento N°2 del estudio de la Dinámica de Adsorción en el ajuste de la curva de adsorción.	77
B.10	Resultados del experimento N°3 del estudio de la Dinámica de Adsorción en el ajuste de la curva de adsorción.	78
B.11	Resultados del experimento N°4 del estudio de la Dinámica de Adsorción en el ajuste de la curva de adsorción.	79

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura No	Descripción	Pagina
3.1	Ciclo del cromo en el medio ambiente	7
3.2	Proceso de adsorción	12
3.3	Proceso de adsorción en un lecho fijo	17
5.1	Ubicación del municipio de la Paz Centro	19
5.2	Proceso de (a) Pesaje de la semilla de <i>Moringa Oleífera</i> , y (b) lavado de la semilla	21
5.3	Proceso de (a) pesado de la semilla después del secado y triturado, y (b) proceso de tamizado de la semilla, después de la etapa de trituración	22
5.4	Proceso de extracción de aceite	23
5.5	Aparato de extracción Soxhlet. (a) Proceso de extracción de aceite por Soxhlet y (b) Separación de la grasa del hexano en un rotavapor	25
6.1	Resultados del espectro IR realizado a la semilla triturada de <i>Moringa Oleífera</i>	37
6.2	Ajuste de las ecuaciones de pseudo-primer orden y pseudo-segundo orden con una masa de semilla triturada de 2 g y $Co=31.75$ mg/l	41
6.3	Ajuste de las ecuaciones de pseudo-primer orden y pseudo-segundo Orden con una masa de semilla de M.O. triturada de 2 g y $Co=65.65$ mg/l	42
6.4	Ajuste de las Ecuaciones de pseudo-primer orden y pseudo-segundo orden con una masa de semilla triturada de 5 g y $Co=32.37$ mg/l	43
6.5	Ajuste de las Ecuaciones de pseudo-primer orden y pseudo- segundo orden con una masa de semilla triturada de 5 g y $Co=72.88$ mg/l	44
6.6	Ajuste de las Ecuaciones de pseudo-primer orden y pseudo-segundo orden con una masa de semilla triturada de 10 g y $Co=31.22$ mg/l	45
6.7	Ajuste de las Ecuaciones de pseudo-primer orden y pseudo-segundo orden con una masa de semilla triturada de 10 g y $Co=64.25$ mg/l	46
6.8	Comportamiento de la curva de la dinámica de adsorción de cromo VI, con masa de 35 g, $Co=2.60$ mg/l, $Q=1$ ml/s y velocidad=35 rpm	51

6.9	Ajuste de la curva de adsorción en columnas de Cromo VI, con masa de 35 g, Co=2.97 mg/l, Q=2 ml/s y velocidad=75 rpm	52
6.10	Ajuste de la curva de adsorción en columnas de Cromo VI, con masa de 35 g, Co=5.93 mg/l, Q=1 ml/s y velocidad=35 rpm	52
6.11	Ajuste de la curva de adsorción en columnas de Cromo VI, con masa de 35 g, Co=5.91 mg/l, Q=2 ml/s y velocidad=75 rpm	53
A.1	Determinación de la densidad de conjunto utilizando probetas de 100 ml, con porciones de 35, 50 y 60 ml de semilla triturada de M.O.	63
A.2	Determinación de la densidad de partícula por triplicado	64
A.3	Preparación de la solución madre de Cr VI	64
A.4	Elaboración de las soluciones de trabajo, para la cinética de adsorción	64
A.5	Ajuste de pH	65
A.6	Toma de muestras para el estudio de la Cinética de Adsorción	65
A.7	Preparación de estándares para lectura de Cr VI	65
A.8	Proceso de adsorción de cromo VI utilizando columnas empacadas con semilla de <i>Moringa oleífera</i> .	66

I. INTRODUCCION

La contaminación de los afluentes por metales pesados siempre ha representado un problema ambiental debido a las consecuencias que pueden provocar en la salud humana y diferentes formas de vida. Las principales fuentes de contaminación de los afluentes por metales pesados provienen principalmente de las industrias. En el caso del cromo hexavalente, este es considerado uno de los contaminantes de mayor impacto ambiental debido a que puede ser liberado en el uso o disposición de productos de cromo durante la manufactura.

El tratamiento de las aguas residuales engloba un extenso estudio, siendo necesario determinar diferentes aspectos económicos, administrativos y en la parte técnica-operativa para así poder llevarla a cabo como una alternativa que sea eficiente y a la vez mitigar los costos. Por ello, se han realizado diferentes estudios para el empleo de alternativas biológicas en la remoción de diferentes contaminantes entre ellos los metales pesados que contienen los efluentes provenientes de las industrias del país.

Rivera & Martínez (2020) expusieron “en la actualidad existen evidencia que diversos compuestos de cromo son contaminantes ambientales en los recursos hídricos, debido a su amplia utilidad de este elemento en diversas actividades”. Para reducir el cromo hexavalente se proponen diferentes alternativas de remoción obteniendo así resultados eficaces en su experimentación.

El decreto ejecutivo N° 21-2017 (INAA, 2017) establece que la descarga máxima permisible de cromo hexavalente, un metal altamente toxico, a los cuerpos receptores tiene que ser menor a 0,5 mg/l. En las aguas residuales el cromo hexavalente se encuentra en solución en forma de ion cromato (CrO_4^{2-}), el cual suele ser removido por reducción, precipitación química, intercambio iónico y adsorción. El uso de bioadsorbente se ha considerado como una alternativa viable para su remoción, por lo que es necesario evaluar el estudio del comportamiento de estos adsorbentes en la remoción de metales pesados.

El uso de materias primas biológicas para la elaboración de bioadsorbentes ha evolucionado durante los últimos años siendo uno de ellos el quitosano, obtenido de la quitina la cual se extrae del caparazón del camarón. Otra alternativa de remoción de cromo hexavalente es a través de la biomasa de tamarindo (Rodas Quiroz & Ñurinda Tercero, 2016) y cáscara de plátano (López Hernández, 2020).

Tomando como referencia el estudio elaborado por Rivera & Martínez (2020), los autores realizaron diferentes pruebas experimentales para verificar la eficiencia de remoción de cromo VI en dos dosificaciones de masa de *Moringa oleífera* trituradas una de 0,5 g y 1,5 g; logrando obtener resultados positivos en la remoción de este metal con un 90 y 94 % de remoción en total, respectivamente.

Según Albis Arrieta, Ortiz Toro & Martínez De la Rosa (2017), una alternativa que resulta ser atractiva es utilizar columnas de lecho fijo, este proceso de remoción hace que dicho proceso sea continuo de modo que sea económicamente viable para su aplicación, la importancia de implementar el sistema de lecho empacado para la remoción de este tipo de metal radica en que la adsorción puede ser repetidamente y no se observa pérdida en el poder de adsorción

En otro estudio de adsorción de cromo hexavalente en columna de lecho fijo con biomasa de tamarindo, elaborado por Rodas Quiroz & Ñurinda Tercero (2016), se realizó la caracterización de la cáscara de tamarindo como agente adsorbente de cromo VI. En este trabajo, se llevaron a cabo diferentes ensayos para verificar la eficiencia de remoción y posterior regeneración de la biomasa con ácido clorhídrico (HCl), obteniendo mayor eficiencia a una concentración del ácido de 0,10 M.

Así también, en un estudio realizado por López Hernández (2020) referente a la “Remoción de Cromo hexavalente en aguas contaminadas utilizando cáscara de plátano”, se usó 1 g de biomasa a diferentes condiciones de pH. Los resultados encontrados confirmaron una buena eficiencia de la biomasa en la remoción de cromo hexavalente de un 92% a un pH entre 3 y 3,5.

La tarea es reducir la contaminación de afluentes con aguas cargadas de microorganismos y metales puesto que es de suma importancia para la salud de la población y demás seres vivos, debido a que el Cromo hexavalente y sus compuestos es clasificado por la agencia intercontinental para la investigación del cáncer (IARCA) en el grupo 1 de sustancias cancerígenas comprobadas por el ser humano ya que en caso de inhalación puede causar cáncer, perforación del tabique nasal, asma, bronquitis, neumonitis, inflamación de la laringe y el hígado, por otra parte en contacto con la piel puede inducir a alergias, dermatitis, necrosis y corrosión dérmica, Para ello se tomó el modelo de Rivera & Martínez elaborado en el 2020, como método de reducción de cromo VI utilizando la semilla de *Moringa Oleífera* como agente adsorbente.

Asimismo, se desea establecer esta alternativa factible e incluso rentable al utilizar materia prima de origen natural para la remoción de contaminantes, entre ellos el

Cromo VI. Lo que resulta una opción más amigable con el ambiente y bajo costo de operación por lo que se podrá utilizar a pequeña escala industrial. Estos resultados podrán, en un futuro, abrir nuevos espacios de indagación y análisis sobre las diferentes materias primas de origen natural que se puedan implementar en la reducción de contaminantes en nuestros diferentes entornos naturales.

II. OBJETIVOS

2.1. Objetivo General

Evaluar la cinética y dinámica de adsorción de Cromo VI en semilla de *Moringa oleífera* con bajo grado de aceite como bioadsorbente.

2.2. Objetivos Específicos

- Determinar el proceso de obtención de semilla triturada de *Moringa oleífera* con bajo grado de aceite para su uso como bioadsorbente, a escala de laboratorio.
- Evaluar la cinética de adsorción de cromo VI con semilla triturada de *Moringa oleífera* a diferentes concentraciones y diferentes masas de adsorbente, empleando las ecuaciones de Pseudo-Primer orden y Pseudo-Segundo orden.
- Determinar la dinámica de adsorción de cromo hexavalente utilizando columnas empacadas con semilla triturada de *Moringa Oleífera* a diferentes concentraciones y velocidades de flujo, a escala de laboratorio.

III. MARCO TEORICO

En este acápite se presenta las generalidades de la *Moringa oleífera*, sus aplicaciones y viabilidad como agente reductor de cromo hexavalente. De igual forma se detalla la literatura en base a la cinética y dinámica de adsorción de cromo VI en aguas sintéticas a escala de laboratorio utilizando columnas empacadas a diferentes concentraciones y velocidades de flujo.

3.1. Generalidades de la *Moringa oleífera*

La *Moringa oleífera* conocida comúnmente como Marango es un árbol pequeño y de crecimiento acelerado que usualmente alcanza los 10 a 12 metros de altura, las condiciones óptimas para el crecimiento de las plantas son temperaturas entre 25-30°C, posee raíces fuertes y profundas un periodo de vida promedio de 20 años y sus frutos son capsulas trilobuladas conocidas como vainas los cuales varían de color con respecto al estado de madurez. (Gutierrez Gomez, 2010)

Es originario de los Himalayas, pero ha sido introducido en diferentes lugares como: el sureste asiático, Asia occidental, África del Oeste, Madagascar, el sur de la Florida, las islas del Caribe, en América desde México hasta Brasil. Una característica importante de la *Moringa* es su capacidad de resistencia a la sequía, siendo un árbol cultivable en regiones semiáridas o áridas. (Sanchez Peña, Martinez Avila, Sinagawa Garcia, & Vazquez Rodriguez, 2013).

3.2. Aplicaciones de la *Moringa oleífera*

Las dos formas más relevantes del aprovechamiento de la *Moringa oleífera* son la parte benéfica en la salud humana y la parte del uso como tratamiento de los efluentes.

La *Moringa oleífera* es un árbol al cual se le atribuyen cuantiosas propiedades, tanto benéficas a la salud como al medio ambiente; desde un fuerte potenciador de la nutrición humana, hasta un nuevo método natural de tratamiento de aguas fluviales y aguas turbias (Sanchez Peña, Martinez Avila, Sinagawa Garcia, & Vazquez Rodriguez, 2013).

3.3. Generalidades del Cromo Hexavalente

Entre los metales, el cromo ha atraído amplio interés público y de las diferentes agencias regulatorias debido a la toxicidad que ejerce sobre los ecosistemas, incluyendo microorganismos y animales.

El cromo es un metal de transición localizado en el grupo VI-B de la tabla periódica, aunque puede existir en varios estados de oxidación, las formas más comunes y estables en el ambiente son el cromo trivalente (Cr III) y el cromo hexavalente (Cr VI), el cual poseen estructuras químicas distintas, el cromo VI considerado la forma más toxica del cromo, se encuentra usualmente asociado al oxígeno en forma de cromatos (CrO_4^{2-}) y dicromatos ($Cr_2O_7^{2-}$) que debido a su gran solubilidad son altamente móviles en el suelo y en ambientes acuáticos (Gutierrez, Corona & Espino Saldaña, 2010).

El cromo hexavalente es un fuerte agente oxidante y en presencia de materia orgánica es reducido a cromo III. Actualmente se ha establecido que diversos compuestos de cromo, en forma de óxidos, cromatos y dicromatos son contaminantes ambientales presentes en agua, suelo y efluentes de industrias debido a que dicho metal es ampliamente utilizado en distintas actividades manufactureras, tales como cromado electrolítico, fabricación de explosivos, curtido de pieles, aleación de metales y fabricación de colorantes y pigmentos.

3.3.1. Toxicidad del cromo

Las características toxicas del Cr (III), en contraste con las del Cr (VI), son actualmente objeto de considerables discusiones entre autoridades sanitarias de diferentes países y representantes de la industria curtidora e institutos de investigación. Si bien en defensa del Cr (III) se exponen los argumentos para demostrar que no existen razones científicamente demostrables para establecer límites tan estrictos para la descarga del mismo a distintos cuerpos receptores. Conjuntamente con la comparación de los efectos tóxicos entre el Cr (III) y el Cr (VI), un aspecto que merece ser considerado con dedicación es la posibilidad que el Cr (III) pudiera ser oxidado a Cr (VI) en las diferentes condiciones que ofrece el medio natural (Martinez F. , 2013).

3.3.2. Efectos en el medio ambiente

La contaminación al ambiente por cromo se da principalmente por la actividad humana. En la Figura 3.1 se muestra el ciclo del cromo en el ambiente cuando es liberado producto de actividades industriales (Molina, Aguilar, & Cordovez, 2010).

La concentración de cromo en el aire en forma de material particulado puede aumentar como resultado de la quema de carbón o petróleo, la producción de acero, soldadura de acero inoxidable, manufactura de productos químicos y el uso de productos que contienen cromo.

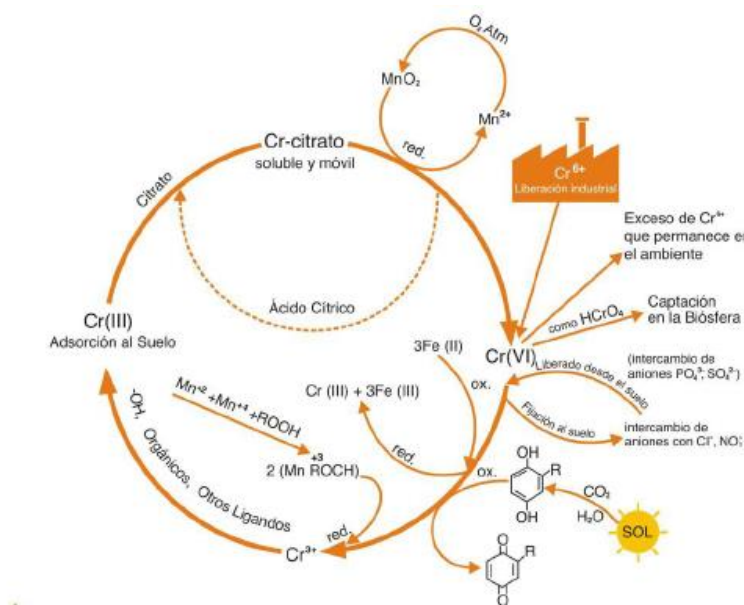


Figura 3.1: ciclo del cromo en el medio ambiente.

Fuente: (Egg, 2016)

La contaminación de las aguas ocurre por la descarga de desechos derivados de la manufactura de colorantes y pigmentos para el curtido del cuero; la mayor parte de las veces el cromo se va al fondo y una pequeña parte se diluye en el agua, el suelo también puede contaminarse debido al depósito de residuos de las industrias y cenizas de carbón proveniente de plantas generadoras de electricidad (Molina, Aguilar, & Cordovez, 2010).

3.3.3. Contaminación de Cromo en Nicaragua

Las principales fuentes de contaminación por cromo a los diferentes cuerpos receptores provienen de la industria del curtido de cuero. Según el análisis elaborado por Alvarado (2019) en su artículo denominado "*Impacto de los vertidos de tenerías sobre la calidad físico-química y la integridad biológica del sedimento*

del Rio Chiquito, León”, se basa en la evaluación del impacto ambiental de las aguas residuales provenientes de tenerías al Rio Chiquito.

Para este estudio se realizaron muestreos en el periodo lluvioso comprendido en mayo 2016 y en el periodo seco comprendido en enero 2017 en los sitios de aguas arribas (sitio no impactado por aguas residuales de tenerías) y aguas abajo (sitio después de los vertidos de aguas residuales de tenerías). Una vez realizados los muestreos y el análisis de los resultados, se concluyó que:

- Los parámetros físico-químicos indicaron que el sedimento en los sitios de estudio del Rio Chiquito es de textura arenosa (media y fina), de pH casi neutral, potenciales redox ligeramente negativos y que solo se diferencian en su conductividad eléctrica probablemente debido al impacto negativo de las sales de los vertidos de la actividad de tenería.
- La concentración de los 11 metales y metaloides de interés indican que existen altas probabilidades de que ocurran efectos adversos a la vida acuática debido a la contaminación por hierro y cinc en ambos sitios (mayo 2016), mercurio en ambos sitios (enero, 2017) y por cromo en aguas abajo (enero, 2017).

3.3.4. Remoción de Cromo

Una serie de tecnologías para la eliminación de contaminantes inorgánicos y orgánicos de soluciones acuosas se han desarrollado a lo largo de los años, incluyendo entre ellas: el intercambio iónico, precipitación, degradación fotocatalítica, filtración por membrana, carbón activado y adsorción (Albis Arrieta, Ortiz Toro & Martínez De la Rosa, 2017)

Esta serie de alternativas de remoción de metales se han puesto en práctica debido a “los graves problemas de salud y ambientales que surgen en presencia de altas concentraciones de cromo en cuerpos receptores de agua, como consecuencia de los diversos procesos industriales” (Rodas Quiroz & Nurinda Tercero, 2016).

A continuación, se detallan los procesos físico-químicos antes mencionados para la remoción de metales pesados:

- **Intercambio iónico:** El intercambio iónico es un proceso de separación física en la que los iones intercambiados no se modifican químicamente, su

principal ventaja es la recuperación del valor de metal y menos volumen de lodos producidos.

- **Precipitación:** Es la técnica más utilizada en los procesos industriales ya que es relativamente sencilla de operar y selectiva, aunque su mantenimiento es relativamente alto debido a la alta producción de lodos.
- **Degradación fotocatalítica:** Se basa en la transferencia de carga a través de la interfaz entre el semiconductor y la solución acuosa contaminada, donde la conductividad aumenta con la temperatura y se genera un par de electro-hueco, ocurriendo así la adsorción de los fotones y la distribución de diferentes estados electrónicos, degradando moléculas orgánicas, colorantes y metales pesados.
- **Filtración por membrana:** La filtración por membrana se emplea comúnmente para tratar y recuperar sales metálicas de residuos generados en procesos galvanoplásticos, en la producción de alimentos y bebidas y en la explotación y producción de hidrocarburos.
- **Carbón activado:** Este tipo de proceso ha demostrado ser un adsorbente eficiente para la eliminación de una amplia variedad de contaminantes orgánicos e inorgánicos presentes en el medio ambiente acuático.
- **Adsorción:** Esta técnica presenta la remoción de una amplia variedad de contaminantes, alta capacidad, cinética rápida y posiblemente selectiva dependiendo del adsorbente de lo cual depende su rendimiento (Caviedes Rubio, Muñoz Calderon, Perdomo Gualtero, Rodriguez Acosta, & Sandoval Rojas, 2015).

3.4. Aguas residuales de tenería

Las aguas residuales provenientes del proceso de curtido de cuero realizado en las tenerías contienen ciertos contaminantes muy perjudiciales. Son aguas catalogadas como tóxicas y peligrosas, dado su alto contenido en cromo y sales neutras, que se generan en el curtido de las pieles debido a que se realiza con sales de cromo.

El cromo trivalente (Cr^{+3}), es el que se encuentra en mayor cantidad en estos efluentes, no es de gran toxicidad, pero bajo ciertas condiciones del medio, puede oxidarse pasando a cromo hexavalente (Cr^{+6}), el cual es de mayor toxicidad

afectando los ciclos biológicos y al ser humano, por esto su concentración está muy limitada en los vertidos de cauces y colectores (Rodas Quiroz & Ñurinda Tercero, 2016).

En estos afluentes, también se encuentra la presencia de sulfuros, los cuales son utilizados para la eliminación del pelo. Los insumos químicos responsables de la contaminación de las aguas que normalmente utilizan las tenerías están descritos en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Principales contaminantes en el agua de una curtiembre.

Etapa	Insumos Químicos
Ribera	Cal, Carbonato de sodio, Cloruro de sodio, Hidróxido de sodio, Pesticidas (preservantes), Sulfuro de sodio, Tenso-activos
Curtido	Ácido fórmico, Ácido sulfúrico, Bicarbonato de sodio Bisulfito de sodio, Cloruro de sodio, Productos enzimáticos Desengrasantes, Formiato de sodio, Sintanos, Solventes Sulfato de amonio (desencalante), Sulfatos de cromo Taninos, Tenso-activos
Acabado	Aceites, Acetato de butilo, Acetato de etilo, Acido fórmico Butanol, Ciclohexano, Etilenglicol, Kerosene, Metil, butilcetona Tolueno, Etilbenceno, Percloroetileno

Fuente: Rodas Quiroz & Ñurinda Tercero (2016)

3.4.1. Composición del afluente

La caracterización del efluente a la salida del proceso indica que entre las sustancias que contienen las aguas residuales de una curtiembre se encuentran cloruros, sulfanatos alifáticos, condensados de ácido acrílico, polifenoles, ácidos grasos, tintas proteínas, carbohidratos solubles y sulfuros de sodio (Riveras & Martinez, 2020).

Estos efluentes están generalmente caracterizados por presentar baja biodegradabilidad, alto contenido de sólidos suspendidos y materia orgánica (especialmente mediante el pelambre), elevado contenido de nitrógeno, pero bajos contenidos de fósforo. La DQO de un agua residual de tenería oscila entre 1500 y 35000 mg/L, esta materia orgánica es de naturaleza particulada adicionalmente estos efluentes son muy cambiantes dependiendo del origen y naturaleza de las pieles. En la Tabla 3.2 se presenta la concentración de algunos contaminantes presentes en este tipo de efluentes.

Tabla 3.2. Contenidos aproximados de contaminantes en las aguas residuales de curtiembre.

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

Fuente: Riveras & Martinez (2020)

3.5. Espectroscopia por infrarrojo (IR)

La espectroscopia IR es el método por el cual se estudia la absorción o emisión de energía radiante originada por la interacción entre la radiación electromagnética y el material de estudio.

Un espectro IR se obtiene al pasar radiación a través de una muestra y determinar que fracción de esta radiación incidente ha sido absorbida. La energía particular a la que aparece cada pico en un espectro guarda relación con la frecuencia de vibración de una parte de la molécula.

La interacción de la radiación infrarroja con la materia provoca en esta alguna alteración por lo que dicha alteración guarda relación con cambios en el estado vibracional de las moléculas. El espectro vibracional de una molécula se considera una propiedad física única y por tanto característica de esta molécula, así entre otras aplicaciones el espectro IR se puede usar como “huella dactilar” en la identificación de muestras mediante la comparación con espectros de referencia. (Serrano, 2022)

Existen modos vibracionales que inducen oscilaciones que pueden entrar en resonancia con un haz de IR. Esto produce un intercambio de energía entre el haz y las moléculas constituyentes, existe un comportamiento característico para un enlace con un tipo atómico, un entorno químico y una concentración de enlaces determinadas. Se puede decir entonces, que en un espectro infrarrojo se pueden manifestar bandas asociadas a prácticamente todos los compuestos moleculares. Cada una de estas bandas correspondería a un movimiento de vibración de uno de los enlaces dentro de la molécula. Se sostiene entonces que el conjunto constituye la huella dactilar del compuesto. Cada compuesto tendrá entonces un

comportamiento particular frente a un haz de infrarrojo, en esto se basa la eficacia de la IR. (Pique & Vazquez, 2012)

3.6. Adsorción

La adsorción es el proceso donde uno o más componentes (adsorbatos) se sienten atraídos y se unen a la superficie de un sólido (adsorbente) con el que están en contacto (Figura 3.2). La naturaleza exacta de la unión (iónica, covalente o metálica) depende de las propiedades de las especies involucradas, pero el material adsorbido generalmente se clasifica en fisisorción, quimisorción y sorción electrolítica. (Benavente, 2008)

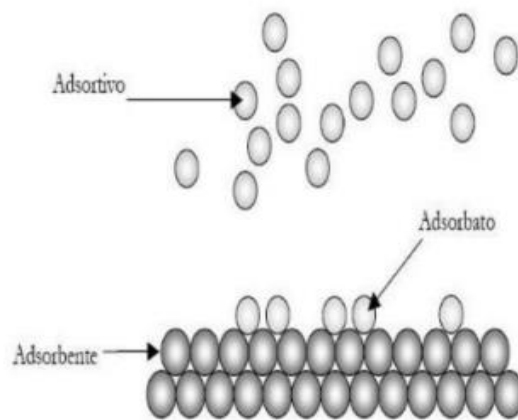


Figura 3.2: Proceso de Adsorción.

Fuente: Condori Huancapaza & Quispe Yapo (2020)

3.6.1. Tipos de adsorción

Entre los tipos de adsorción de metales pesados en soluciones acuosas podemos destacar:

- **Adsorción por Intercambio:** Es aquel proceso en el cual los iones del soluto, se concentran en la superficie del adsorbente, realizándose una atracción por fuerzas electrostáticas, dándose a cabo el proceso de atracción de las cargas eléctricas entre positivas y negativas. La carga del ion es el factor determinante en la adsorción de intercambio, si tenemos dos adsorbatos iónicos iguales en varios factores, pero uno con mayor carga que otro, el de mayor carga será el que sea adsorbido. Para dos adsorbatos con igual carga, el tamaño molecular es el que determina cual será adsorbido (Paredes Quispe & Valle Alvarado, 2020).

- **Adsorción Física:** También llamada fisisorción, es aquel proceso que utiliza las fuerzas de Van Der Waals, aplicado en situaciones donde la superficie del adsorbente no es fija para la molécula adsorbida, sino está libre de trasladarse dentro de la interfase.
- **Adsorción Química:** También llamada quimisorción, es aquel proceso donde la participación química del adsorbato y adsorbente es elevada, similar a un enlace químico.

3.6.2. Cinética de adsorción

En la adsorción, como proceso dependiente del tiempo, la velocidad efectiva de la adsorción depende tanto de las condiciones de operación (flujo, temperatura, composición y presión) que son necesario conocer su rapidez para el diseño y evaluación de adsorbentes. Esto es importante porque la cinética describe la tasa de adsorción del adsorbato, que a su vez controla al tiempo residente en la interfaz adsorbente-solución (Condori Huancapaza & Quispe Yapo, 2020).

Por otra parte, Bernal Morales & Aguirre Domelin (2022) establecen que la cinética de adsorción es importante para observar cómo varia la concentración del adsorbato en función del tiempo, el cual nos ayuda a identificar el tiempo en el que el proceso es óptimo, con esto se puede determinar la isoterma de adsorción que se utilizara. Entre las cinéticas por las que se puede describir el proceso por el que ocurre la adsorción utilizando biomasa se pueden encontrar modelo de Pseudo-primer orden, modelo de Pseudo-segundo orden, la ecuación de Elovich, entre otros.

3.6.3. Modelos cinéticos de adsorción

A continuación, en la Tabla 3.3 se describen los modelos cinéticos de adsorción de metales en soluciones acuosas.

Tabla 3.3. Modelos cinéticos de adsorción.

Modelo cinético	Ecuación	Parámetro
Pseudo-primer orden	$q_t = q_e(1 - e^{-k_1 t})$	q_e , es la capacidad de adsorción en el equilibrio, k_1 es la constante de Pseudo-primer orden.
Pseudo-segundo orden	$q_t = \frac{t}{(\frac{1}{k_2 q_e^2}) + (\frac{t}{q_e})}$	k_2 es la constante de Pseudo-segundo orden, q_e es la capacidad de adsorción en el equilibrio.
Ecuación de Elovich	$q_t = \frac{1}{\beta} \ln(\alpha \cdot \beta) + \frac{1}{\beta} \ln t$	α es la constante de la ecuación de Elovich, β es el exponente en la ecuación de Elovich.
Difusión intraparticular	$q_t = k\sqrt{t}$	k es la constante de difusión.

Fuente: Condori Huancapaza & Quispe Yapo (2020)

3.6.3.1. Ecuación de Pseudo-Primer Orden

La ecuación de velocidad de Lagergren fue la primera ecuación de velocidad para la sorción en un sistema liquido/solido basado en la capacidad sólida. Esta ecuación se puede linealizar para su uso en el análisis cinético de los resultados experimentales (Benavente, 2008).

$$\log(q_e - q_t) = \log(q_e) - \frac{k_1}{2.303} t \quad \text{Ec. 1}$$

La ecuación de pseudo-primer orden posee algunas desventajas las cuales podemos mencionar:

- La ecuación linealizada Ec. 1 no da valores teóricos de q_e que concuerden con los valores de q_e experimentales.
- Las parcelas son solo lineales durante aproximadamente los primeros 30 minutos. Más allá de este periodo inicial de 30 minutos, los datos experimentales y los resultados teóricos no se correlacionan bien.

Este modelo se ha aplicado ampliamente para la adsorción de iones metálicos en quitosano como la adsorción de: Au (III), la adsorción de As (III), y As (IV), adsorción de Cu (II), adsorción de Cr (VI) y Cu (II). En algunos casos el modelo de Pseudo-primer orden se ajusta bien a los datos experimentales y permite la evaluación de k_1 , en otros casos la ecuación de Pseudo-segundo orden ha tenido mucho más éxito.

3.6.3.2. Ecuación de Pseudo-Segundo Orden

Si la tasa de adsorción tiene un mecanismo de segundo orden, el Pseudo-segundo Orden la ecuación de velocidad cinética de quimisorción se expresa mediante la ecuación 2, por lo que la forma lineal de la ecuación de Pseudo-segundo Orden está dada por:

$$\frac{t}{q_{(t)}} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \quad Ec. 2$$

Con esta ecuación no hay problema en asignar un q_e efectivo, porque q_e y k_2 se pueden obtener a partir de la pendiente y la intersección de la gráfica de t/q_t vs t .

En el modelo de Pseudo-segundo Orden también se ha aplicado a datos experimentales para la adsorción de iones metálicos en quitosano. Adsorción de Cu (II) en perlas de quitosano, por lo que se ha descrito de manera eficaz utilizando este método.

3.6.4. Adsorción en columnas empacadas

Las columnas de adsorción, enfocándonos principalmente a las torres de lecho fijo son equipos diseñados para realizar una separación (adsorción), donde contienen en su interior partículas de un adsorbente, a esta torre ingresa un fluido a tratar el cual entra en contacto con las partículas sólidas, el soluto que sea afín quedará retenido por el adsorbente y de esta manera saldrá un fluido purificado de este compuesto (Bernal Morales & Aguirre Domelin, 2022).

Las columnas empacadas son utilizadas en una gran gama de procesos, como destilación, extracción, humidificación (deshumidificación) y en absorción gaseosa. Este tipo de equipo se usan para proveer un contacto íntimo entre las fases que coexisten en un proceso determinado que suceda a contracorriente; esto proporciona grandes áreas de contacto interfacial, con el objetivo de facilitar el intercambio de masa, calor o ambos simultáneamente.

En general se recomienda seleccionar un tamaño de empacado menor al 10% del diámetro de la columna, se ha observado en general la eficiencia de transferencia de masa es similar para empacados del mismo tamaño (Olivarez Soza & Guevara Mendieta, 2016).

Por otra parte, Rodas Quiroz & Ñurinda Tercero (2016) establecen que la operación de adsorción en columnas de lecho fijo consiste en hacer fluir una

solución contaminada con adsorbato a velocidad constante a través del lecho. En estas operaciones a medida que avanza el tiempo el adsorbato se va acumulando en el lecho de adsorción y por lo tanto el proceso se presenta en un estado estacionario.

Al pasar el fluido con el adsorbato por la columna en forma descendente, la capa superior de adsorbente se satura y el fenómeno de transferencia de masa del adsorbato desde la solución hacia el adsorbente se hace de una manera efectiva en una zona relativamente estrecha llamada zona de adsorción (Z_A), en la cual los cambios de contracorriente se hacen significativos. A medida que transcurre el tiempo la zona de adsorción se desplaza a través del lecho como una onda que avanza hacia la parte inferior del mismo a velocidad constante generalmente más lenta que la velocidad del fluido.

Después de un tiempo la parte inferior de la zona de adsorción alcanza el fondo del lecho y la concentración del adsorbato en el efluente comienza a cambiar abruptamente. En este momento se dice que se ha alcanzado el punto de ruptura, a partir de este tiempo la concentración del adsorbato en el efluente de salida aumenta con rapidez, al pasar la zona de adsorción a través del fondo del lecho, hasta alcanzar aproximadamente el mismo valor de la entrada del lecho.

3.6.4.1. Punto de Ruptura

Se denomina punto de ruptura al valor máximo en la concentración del adsorbato que se puede permitir a la salida de la columna, y al tiempo empleado para alcanzar esta concentración específica se le llama tiempo de ruptura para cada una de las condiciones de operación de la columna (Figura 3.3). El tiempo de ruptura se adopta como el lapso que transcurre cuando la concentración del adsorbato llegue a su concentración más baja con respecto a la concentración inicial.

Generalmente un lecho fijo se opera hasta el punto de ruptura el cual decrece al aumentar el tamaño de la partícula de adsorbente, al incrementar el flujo del fluido a través del lecho y al aumentar el contenido inicial de adsorbato en la alimentación.

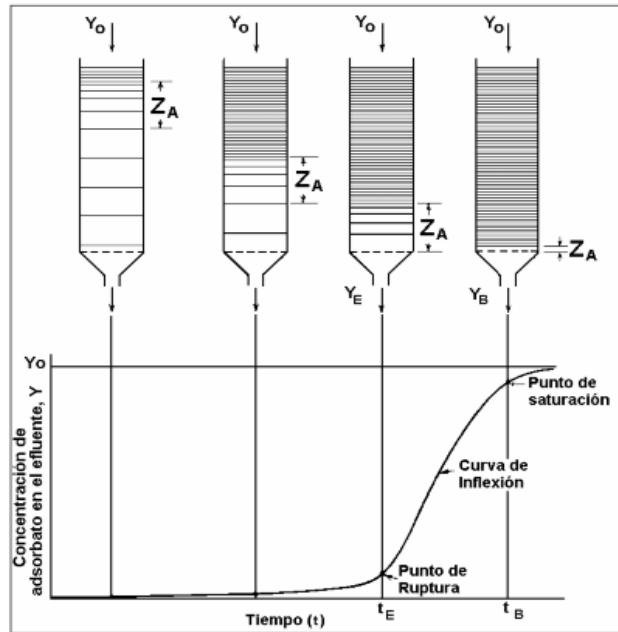


Figura 3.3: Proceso de adsorción en un lecho fijo.
Fuente: Rodas Quiroz & Ñurinda Tercero (2016)

IV. HIPÓTESIS

Para la realización de este estudio se consideraron dos hipótesis para los dos diseños: Hipótesis nula e Hipótesis alternativa. Los planteamientos de estas hipótesis se tomaron para la realización de los diseños experimentales que se propusieron a continuación:

4.1. Diseño experimental para el estudio de la cinética de adsorción de cromo hexavalente

- **Hipótesis nula:** La masa de adsorbente y la concentración inicial del ion Cromo no tienen efecto sobre el ajuste de las ecuaciones de Pseudo-primer orden y Pseudo-segundo orden asociadas a la cinética de adsorción de Cromo Hexavalente utilizando la semilla triturada de *Moringa oleífera*.
- **Hipótesis alternativa:** al menos puede existir un efecto de la masa o la concentración inicial del ion en el ajuste de las ecuaciones de Pseudo-primer orden y Pseudo-segundo orden asociadas a la cinética de adsorción de Cromo Hexavalente utilizando la semilla triturada de *Moringa oleífera*.

4.2. Diseño experimental para la evaluación de la dinámica de adsorción de Cromo VI utilizando semilla triturada de *Moringa oleífera*

- **Hipótesis nula:** Las concentraciones iniciales del ion y velocidades de flujo no influyen en el comportamiento de la dinámica de adsorción de cromo hexavalente utilizando la semilla triturada de *Moringa oleífera*.
- **Hipótesis alternativa:** Al menos una de las variables independiente: concentraciones iniciales del ion y velocidades de flujo, influyen en el comportamiento de la dinámica de la adsorción de cromo hexavalente utilizando la semilla triturada de *Moringa oleífera*.

V. METODOLOGIA

En este acápite se describen los procedimientos que se realizaron de igual manera se describen los materiales y equipos que se utilizaron en el estudio de las características de la *Moringa oleífera* y en la evaluación de su eficiencia en la adsorción de cromo hexavalente en aguas sintéticas realizadas a escala de laboratorio, tomando de referencia valores reportados en diferentes estudios consultados.

Para la realización de los diferentes análisis que se requirieron en esta práctica, éstos se llevaron a cabo en el laboratorio de Ingeniería Ambiental, de la Carrera de Ingeniería Química de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI), Managua, Nicaragua.

5.1. Recolección de semillas de Moringa

Las semillas de *Moringa oleífera* que se utilizaron en esta práctica, como agente adsorbente, se recolectaron en el municipio de La Paz Centro del Departamento de León, teniendo las siguientes georreferencias: 12°19'27.44" N y 86°37'17.11" O y una elevación de 70 msnm. En la Figura 5.1 se muestra la ubicación del Municipio de La Paz Centro.

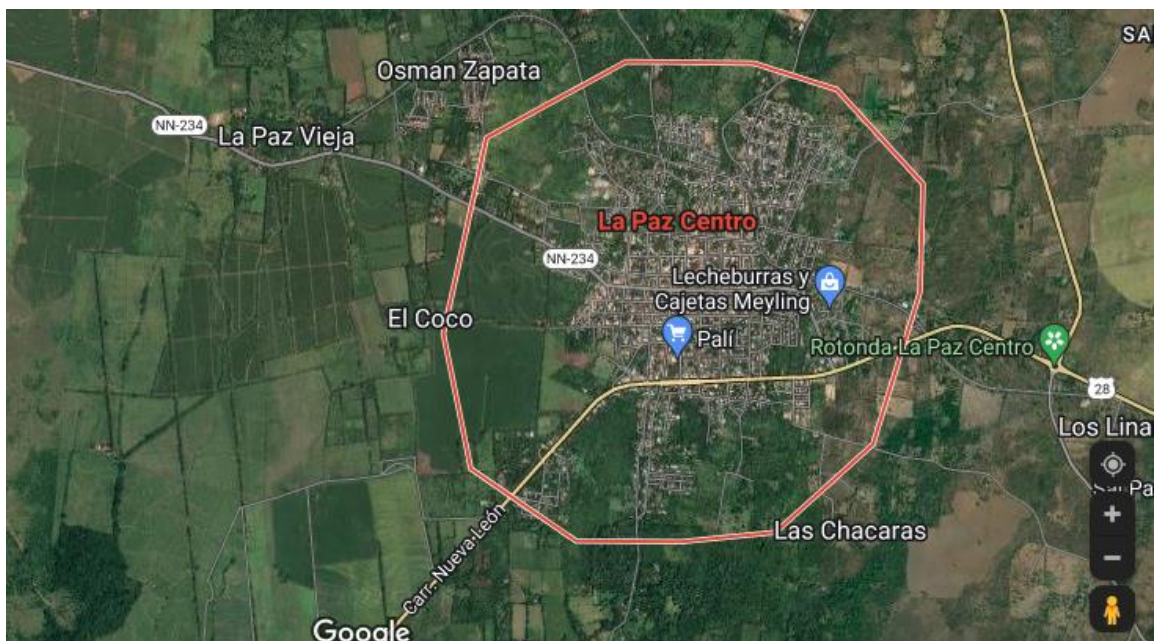


Figura 5.1. Ubicación del municipio de La Paz Centro.

Fuente. Google Earth (18-05-22)

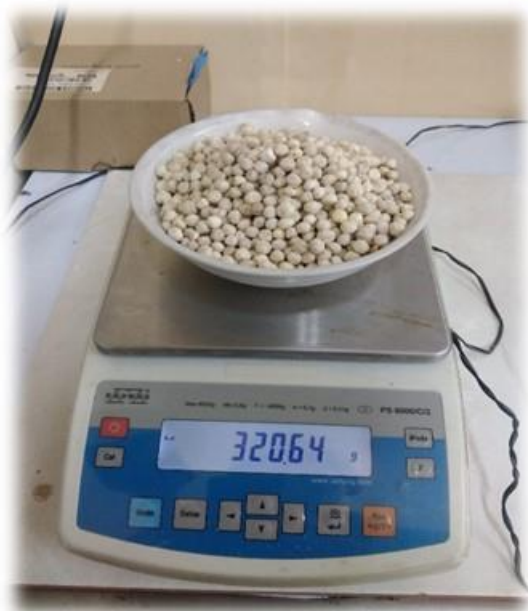
5.2. Reactivos y materiales de laboratorio

Los equipos, reactivos y cristalería de laboratorios que se utilizaron en las pruebas experimentales se especifican en las Tablas A.1, A.2 y A.3, respectivamente, en la sección de Anexo A.1.

5.3. Preparación de las semillas de Moringa

En este acápite se describen las etapas de preparación de la semilla de *Moringa oleífera*, para su posterior extracción de aceite con el objetivo de obtener semillas con un bajo grado de aceite y así, evitar materias en suspensión e incremento de la materia orgánica, durante su aplicación como adsorbente en el proceso de adsorción de cromo hexavalente.

- **Selección:** en esta etapa se separaron las semillas en mal estado de aquellas que tenían las condiciones idóneas para su uso en este estudio
- **Pesaje inicial:** se pesó en una balanza marca RADWAG-PS 6000/C/2, 800 gramos de la semilla de *Moringa oleífera*.
- **Descascarado:** en esta etapa se separó la cáscara (tés cafés) de la semilla de Moringa, ya que la parte de la semilla que se utilizó en las pruebas experimentales de adsorción es el cotiledón. La separación se realizó de forma manual utilizando un mortero de porcelana y un mazo.
- **Pesaje:** una vez separadas la semilla y la cáscara, se pesó por separado en una balanza, para así obtener datos del peso de la semilla sin cáscara y el peso de la cáscara (Figura 5.2.a).
- **Lavado:** una vez pesada la semilla de Moringa se continuó con la etapa de lavado. Para ello, se preparó una solución de lavado conteniendo 8 g de NaCl en 1000 ml de agua destilada (Figura 5.2.b). La solución preparada se calentó en una plancha de calentamiento a 100°C por 30 minutos, una vez transcurrido el tiempo se agregaron las semillas a la solución y se dejó reposar durante 5 minutos. Subsiguientemente, se filtró en un colador con el fin de eliminar materias inapropiadas.



(a)



(b)

Figura 5.2. Proceso de (a) Pesaje de la semilla de *Moringa oleífera*, y (b) lavado de la semilla.

- **Secado:** en esta etapa las semillas de *Moringa oleífera* se llevaron al horno a una temperatura de 130°C por un tiempo de 30 minutos a 1 hora para que las semillas contengan un grado de humedad mínimo. Transcurrido el tiempo, se retiró el recipiente que contiene las semillas del horno y se dejó reposar por un tiempo de 15 minutos para luego volver a verificar su peso.
- **Trituración:** una vez verificado el peso de las semillas secas de *Moringa* se procedió a obtener partículas de menor tamaño con el objetivo de aumentar el área de contacto entre la *Moringa oleífera* y el agua sintética. La reducción de tamaño de la semilla se realizó en un procesador industrial. Posteriormente se pesó (Figura 5.3.a).
- **Tamizado:** para la obtención del tamaño de partícula que se necesitó para ambos estudios, la biomasa triturada se colocó en un tamiz con un diámetro de 0.45 mm y se realizó el proceso de tamizado (Figura 5.3.b). Al final, se obtuvieron dos tamaños de partículas de la semilla triturada: un tamaño menor de 0.45 mm (fino) y el otro, mayor a 0.45 mm (grueso).



(a)



(b)

Figura 5.3. Proceso de (a) pesado de la semilla después del secado y triturado, y (b) proceso de tamizado de la semilla, después de la etapa de trituración.

5.4. Análisis IR de la semilla triturada de *Moringa oleífera*

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

La pastilla, que debe ser homogénea y finísima, se colocó en una placa para muestras y se insertó en el Espectrofotómetro Alpha FTIR–Bruker. Posteriormente, se obtuvieron los espectros IR de la semilla de *Moringa oleífera* obtenida.

5.5. Proceso de extracción de aceite a la semilla de *Moringa oleífera*

La extracción del aceite de la semilla triturada de *Moringa oleífera* se realizó mediante el proceso de hidrodestilación. El proceso es el siguiente:

La semilla de *Moringa oleífera* triturada se introdujo en una olla evaporadora y se agregó 2 litros de agua para que la biomasa quedara totalmente sumergida. Luego, se selló la olla evaporadora y se calentó en una plancha marca Corning PC-420D a una temperatura de 100°C por el lapso de 1 hora (Figura 5.4).



Figura 5.4. Proceso de extracción de aceite.

Una vez transcurrido el tiempo de calentamiento se apagó el equipo y se dejó reposar por 30 minutos para luego realizar la separación de la fase líquida utilizando un colador de tela. El líquido obtenido en esta fase es el aceite de Moringa que se guardó en un beaker de 2000 ml; por otra parte, las semillas trituradas se colocaron en un recipiente de aluminio para realizar nuevamente el proceso de secado en el horno a una temperatura de 130°C.

Transcurrido el tiempo de secado se retiraron del horno las semillas y se dejaron reposando por 30 minutos. Posteriormente se realizó el proceso de filtración del aceite (este proceso se llevó a cabo para evitar materias en suspensión o residuos) utilizando un Erlenmeyer de 500 ml, un embudo de vidrio y papel filtro. Luego del filtrado, se guardó el aceite en un recipiente de plástico.

5.6. Análisis de aceite en la semilla de *Moringa oleífera*

Previo al análisis de aceite realizado a la semilla triturada de *Moringa oleífera*, se realizó un análisis de humedad en un equipo marca Sartorius, modelo MA-150. En una placa se agregó una pequeña porción de la semilla triturada de *Moringa Oleífera* una vez verificado que la semilla triturada contenía un porcentaje mínimo de humedad se procedió a realizar la extracción del aceite.

Para el análisis de aceite a la semilla de *Moringa oleífera* se utilizó el método Soxhlet ya que es capaz de realizar extracciones de manera automática, con un solvente que se evapora y se condensa llegando siempre de manera pura a la muestra (Figura 5.5.a). La metodología se describe a continuación:

Primeramente, se realizó el pesaje de los dedales que iban a contener la muestra de semilla triturada, y al dedal se le agregó una porción de algodón (este serviría como tapón más adelante) y se procedió a pesar nuevamente el dedal con el

algodón. Luego, se pesó la cantidad específica de semilla triturada en una balanza analítica marca Sartorius LE-6202S y se agregó al dedal. Por último, se incorporó el tapón de algodón y todo este conjunto se pesó nuevamente; de igual manera, se pesaron los balones volumétricos que se utilizaron posteriormente en el análisis.

Una vez obtenido los pesos correspondientes, se adicionó 250 ml de hexano al balón volumétrico y se agregaron 3 perlas de ebullición con el propósito que la ebullición del mismo no fuera tan violenta. El balón se colocó en una plancha de calentamiento y se adjuntó el conjunto (dedal, muestra y algodón) en el equipo de extracción Soxhlet (Figura 5.5.a). Subsiguientemente, se procedió a encender la plancha de calentamiento al punto de ebullición del hexano, 6 minutos después se apreciaron las primeras gotas. Al transcurrir 30 minutos, el goteo del hexano a la muestra se mostró de manera más constante y una vez transcurrida 1 hora de trabajo del equipo se realizó la primera recirculación del hexano y se notó un ligero cambio de color en el balón que contenía el hexano (de incoloro a un tono amarillento). Esto es debido a que se iba realizando el proceso de extracción del aceite a la semilla triturada, luego se continuó la extracción durante 8 horas.

Una vez transcurrida las 8 horas de extracción, se apagó la plancha de calentamiento, se removió el equipo que contenía el refrigerante y se separó el conjunto (dedal, muestra y algodón) del equipo de extracción Soxhlet. Se dejó enfriar el balón que contenía el hexano para determinar la cantidad de hexano que aun contenía. Subsiguientemente, el dedal se almacenó en un desecador por 1 hora y luego se verificó el peso nuevamente. Por último, el hexano se vertió en un balón limpio y el balón se incorporó a un equipo Rotavapor marca BUCHI-Waterbath-B-480 a una temperatura aproximada de 60°C por el tiempo de 1 hora (Figura 5.5.b). Una vez transcurrido el tiempo, se realizó el pesaje del balón que contenía la grasa removida y se realizaron los cálculos de remoción de aceite por medio de la siguiente ecuación:

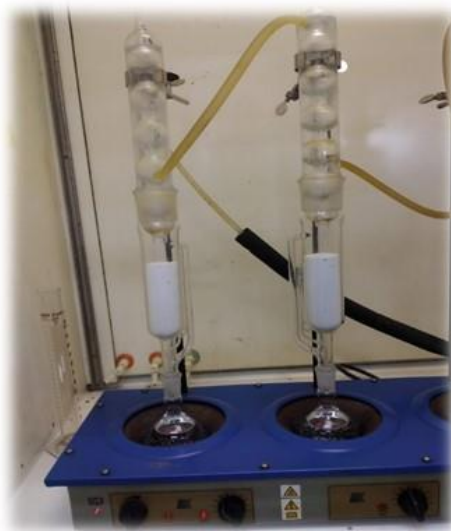
$$\% \text{ de Grasa Cruda} = (W_1 - W_2) \times \frac{100}{S} \quad \text{Ec. 3}$$

Dónde:

W1= Peso del matraz vacío (g)

W2= Peso del matraz y grasa extraída (g)

S= Peso de la muestra



(a)



(b)

Figura 5.5. Aparato de extracción Soxhlet. (a) Proceso de extracción de aceite por Soxhlet y (b) Separación de la grasa del hexano en un Rotavapor.

5.7. Elaboración de la solución sintética de cromo VI

Para esta etapa se prepararon soluciones estándares de cromo VI de acuerdo a los siguientes pasos:

Primeramente, se preparó una solución madre de cromo VI de 1000 mg/l disolviendo 3.7350 g de cromato de potasio (K_2CrO_4) en 250 ml de agua destilada. Se diluyó en 1 litro en un frasco volumétrico con agua destilada (1 ml de la solución preparada es igual a 500 μg de Cr). Posteriormente, se prepararon las soluciones sintéticas de cromo a diferentes concentraciones y volúmenes, según correspondía, al pH de trabajo. Para ello, se retomaron los resultados de pH obtenidos por Leshchenko y Martinez (2020) quienes concluyeron que el pH no tiene efecto en la remoción del cromo hexavalente en un rango de 4 a 7.

5.8. Estudio de la cinética de adsorción

Para el estudio de la cinética se utilizaron concentraciones de cromo VI de 25 y de 50 mg/l para cada solución. Los experimentos se realizaron con una réplica con el fin de obtener la estimación del error experimental y para poder calcular la respuesta más precisa del estudio.

En cada experimento, se adiciono 1000 ml de la solución de cromo VI a una concentración definida y un pH de 7, en un beaker de 2000 ml, para

posteriormente agregar una porción de la masa del bioadsorbente (2 o 5 g). Luego, se llevó la mezcla a un agitador magnético marca Corning PC-420D a un rango de velocidad de 260-280 rpm por un periodo de agitación de 8 horas. A la muestra se le tomaron alícuotas de 10 ml en un intervalo de 2 minutos a 2 horas durante todo el periodo del experimento.

Subsiguientemente, cada alícuota se filtró con un papel filtro con el objetivo de eliminar cualquier materia en suspensión y luego se le determinó la concentración de cromo hexavalente por Espectrometría de Absorción Atómica. Para el cálculo de la capacidad de adsorción (q_t) de cromo hexavalente en el bioadsorbente se utilizó la siguiente ecuación:

$$q_t = \frac{(C_i - C_f)V}{m} \quad Ec. 4$$

Donde:

q_t : Capacidad de adsorción en función del tiempo (mg/g)

C_i : Concentración inicial (mg/L)

C_f : Concentración final de la adsorción (mg/L)

V : Volumen de la solución (L)

m : Masa del bioadsorbente (g)

Se determinó el mecanismo de la cinética de adsorción y los datos experimentales se ajustaron a los modelos de Pseudo-primero orden (Ec.1) y Pseudo-segundo orden (Ec.2).

5.9. Estudio de la Dinámica de adsorción

5.9.1. Determinación de la Densidad de conjunto

Para la determinación de la densidad real de la semilla triturada de M.O. se realizó el pesaje de la masa de adsorbente en una balanza marca RADWAG-PS 6000/C/2. Las porciones de masa fueron correspondientes a: 35, 50 y 65 ml. En la Figura A.1 del Anexo A.2.1 se muestra las probetas utilizadas con cada una de las porciones de semilla de *Moringa oleífera*. Por cada porción de masa, se calculó la densidad de conjunto mediante la siguiente ecuación:

$$\rho_{eq} = \frac{M_q}{V_{tq}} \quad Ec. 5$$

Donde:

M_q : es la masa seca de la *Moringa oleífera*, en gramos.

V_{tq} : es el volumen total de la *Moringa oleífera*, en cm³.

5.9.2. Determinación de la Densidad de partícula

La determinación de la densidad de partícula se realizó mediante el método de picnómetro. Para ello, se realizó la calibración de los picnómetros en el laboratorio de Ingeniería Ambiental-UNI. En la Figura A.2 del Anexo A.2.2 se muestra los picnómetros con cada una de las masas de semilla de *Moringa oleífera* utilizados. La densidad de partícula se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$\rho_p = \frac{(m_{pi+B} - m_{pi})}{[V_p - (\frac{m_{pi+B+w} - m_{pi+B}}{\rho_w})]} \quad Ec. 6$$

Donde:

p_i : Picnómetro.

m_{pi+B} : Masa del picnómetro más la biomasa.

m_{pi+B+w} : Masa del picnómetro más la biomasa más el contenido de agua.

ρ_w : Densidad del agua.

5.9.3. Determinación de la Porosidad total

Una vez obtenidos los datos de la densidad de conjunto y la densidad de partícula, se procedió a calcular la porosidad total mediante la siguiente ecuación:

$$\varepsilon_t = 1 - \frac{\rho_c}{\rho_p} \quad Ec. 7$$

Donde:

ε_t : es la *porosidad* total de la semilla triturada de la *Moringa oleífera*.

ρ_c : es la densidad de conjunto en g/cm³.

ρ_p : es la densidad de partícula en g/cm³.

5.9.4. Determinación del Volumen del Lecho

Para determinar el volumen del lecho (BV, por sus siglas en inglés) en la columna de adsorción se requiere conocer los siguientes parámetros: el volumen de flujo (V_f) y el volumen del adsorbente (V_{ad}). El cálculo se realiza mediante la siguiente ecuación:

$$BV_t = \frac{V_f}{V_{ad}} \times 1000 \quad Ec. 8$$

Donde:

V_f : es el volumen de flujo que atraviesa la columna en un tiempo determinado en litros (L).

V_{ad} : es el volumen de adsorbente en la columna en cm^3 .

El volumen de flujo en un tiempo (t) se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$V_f = \frac{Caudal_{promedio} (L/min)}{t (min)} \quad Ec. 9$$

Y el volumen de adsorbente se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$V_{ad} = \frac{Masa\ del\ adsorbente\ (g)}{\rho_{eq}} \quad Ec. 10$$

Donde ρ_{eq} es la densidad en conjunto (en g/cm^3) de la semilla triturada de *Moringa oleífera*.

5.9.5. Montaje de la columna de adsorción

Para este experimento, se construyó la columna a partir de 1 probeta de vidrio graduada de 250 ml con un diámetro interno de 2.8 cm, un diámetro externo de 3.1 cm y una altura de 33.5 cm. A las probetas se les retiró la parte inferior (base) y la parte superior, luego ambas probetas se unieron para formar la columna. Una vez unidas en la parte inferior de esta se colocó un filtro de soporte para ubicar el material adsorbente, este conjunto se sujetó mediante un soporte universal.

El agua sintética entró a la columna a una concentración inicial de cromo de 2.70 mg/l y 0.5 mg/l se depositó en un envase de 5000 ml y se transportó con una bomba peristáltica con un caudal promedio de 2 y 4 ml/s, hacia la columna de adsorción que tuvo una altura del lecho que permaneció constante de 20 cm.

A la salida de la columna se tomaron alícuotas en un intervalo de tiempo de 5 minutos durante el tiempo de trabajo de la columna, cada alícuota fue de 10 ml de agua sintética en probetas pequeñas. Posteriormente, se determinó la concentración del cromo por Espectroscopia de Absorción Atómica, en un equipo GBC AAS 932 plus. En el Anexo A.3 se presenta el procedimiento a seguir y las

condiciones de trabajo para determinar la concentración de cromo por absorción atómica

La capacidad de adsorción del bioadsorbente se determinó por medio de la curva de ruptura, debido a que esta muestra el comportamiento de una columna de lecho fijo desde el punto de vista del metal que es posible retener. A partir de la curva de ruptura se pudo determinar la cantidad total de cromo hexavalente que se retuvo o capacidad máxima de la columna q en (mg) por medio de las siguientes ecuaciones:

$$q = \frac{Q}{1000} C_0(t - 0) \quad Ec. 11$$

En donde: Q es el caudal (ml/min)

La cantidad total del metal que paso por la columna m_{Cr} se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$m_{Cr} = \frac{C_0 * Q * t}{1000} \quad Ec. 12$$

El porcentaje total del metal retenido durante la operación total de la columna se obtuvo mediante:

$$\%R = \frac{q}{m_{Cr}} * 100 \quad Ec. 13$$

De igual forma que en los procesos discontinuos, los estudios de equilibrio de una columna requieren del valor de la capacidad de adsorción q_e (mg del metal adsorbido/ gramos de bioadsorbente), el cual se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$q_e = \frac{q}{m} \quad Ec. 14$$

Donde: m corresponde a la masa de la biomasa (g)

La caracterización de la muestra después de aplicar el bioadsorbente se midió el grado de remoción del cromo hexavalente de las aguas sintéticas preparadas previamente para ser comparadas con el estudio realizado por (Riveras & Martinez, 2020).

5.10. Diseño Experimental

5.10.1. Diseño del Estudio de la Cinética de Adsorción

Para el estudio de la cinética de adsorción se evaluaron las siguientes variables:

- Masa de adsorbente (2 y 5 g).
- Concentración inicial del ion cromo (25 y 50 mg/L).

Los parámetros constantes para este estudio son:

- pH de la solución: 7.
- Tiempo de agitación: 8 horas.
- Velocidad de agitación: 260 – 280 rpm.

Para la realización del diseño experimental se hizo uso del software STATGRAPHIS centurión XVI, considerando lo siguiente:

- El diseño experimental que se aplicó fue un diseño factorial de 2^2 , en donde se especifican 2 factores experimentales o variables independientes. Para cada análisis se realizó una réplica con un total de 8 ejecuciones, 2 bloques y un modelo de interacciones de 2 factores con 4 coeficientes y un orden aleatorizado (descrito en la Tabla 5.2).
- La variable respuesta para este estudio fue la capacidad de adsorción (q_e) de cromo hexavalente en unidad mg/g. Los datos experimentales se ajustaron a los modelos de Pseudo-Primer orden y Pseudo-segundo orden.
- La masa de bioadsorbente (g), como variable independiente, tiene dos niveles 2 y 5 gramos de biomasa.
- La concentración inicial del ion cromo (mg/l), como variable independiente. Para este factor se establecieron dos niveles: 25 y 50 mg/l.

En la Tabla 5.1 se describen las variables independientes con sus niveles y las variables dependientes.

Tabla 5.1. Variables o Factores Independientes y Dependientes.

Variables Independientes	No. de Niveles	Niveles	Variables Dependiente
Masa de bioadsorbente	2	2 g	Ajuste de los datos experimentales (q_e) de Cromo VI a las ecuaciones de Pseudo-primer orden y Pseudo-segundo orden.
		5 g	
Concentración inicial de Cr VI	2	25 mg/L	
		50 mg/L	

Fuente: fuente propia

En la Tabla 5.2 se detallan los cruces de variables obtenidos por el software para llevar a cabo el trabajo experimental para el estudio de la cinética de adsorción.

Tabla 5.2. Tabla de diseño aleatorizada del estudio de la cinética de adsorción.

No	Factores independientes	
	Masa (g)	Concentración inicial del ion (mg/L)
1	2	25
2	2	50
3	5	25
4	5	50
5	2	25
6	2	50
7	5	25
8	5	50

Fuente: fuente propia

5.10.2. Estudio de la Dinámica de adsorción

Para el estudio de la dinámica de adsorción se tomaron como factores independientes:

- Concentración inicial del ion Cromo VI (mg/L).
- Velocidad de flujo (mL/s)

Los parámetros que se tomaron constante para este estudio son:

- Masa de adsorbente: 35 g
- Volumen de solución: 5,000 mL
- pH de la solución: 7.
- Altura del lecho 20 cm.

Utilizando nuevamente el software STATGRAPHIS centurión XVI, para la dinámica de adsorción se consideró lo siguiente:

- El diseño experimental fue de tipo factorial 2^2 por bloques con un diseño de corridas experimentales aleatorizado (descrito en la Tabla 5.4). En este caso, no se realizaron réplicas por falta de material adsorbente, obteniéndose un total de 4 pruebas experimentales.
- Como variable dependiente, la concentración final de Cromo hexavalente en la salida de la columna de adsorción en unidades de mg/L. Con estos datos experimentales, se evaluó el comportamiento de la dinámica de la adsorción de cromo VI en la semilla triturada de *Moringa oleífera*.
- Concentración inicial del ion (mg/L), como variable independiente, teniendo dos niveles a la entrada de la columna de adsorción de 2.70 y 5.9 mg/L de cromo hexavalente.
- Velocidad de flujo (mL/s), como variable independiente. Para este factor se establecieron dos niveles de velocidad de flujo que entraron a la columna de adsorción: de 1 y 2 mL/s.

En la Tabla 5.3 se describen las variables independientes con sus niveles y las variables dependientes.

Tabla 5.3. Variables o Factores Independientes y Dependientes.

Variables Independientes	No. de Niveles	Niveles	Variables Dependiente
Concentración inicial de Cr VI (mg/L)	2	2.70	Comportamiento de la dinámica de la adsorción de cromo hexavalente utilizando la semilla triturada de <i>Moringa oleífera</i> .
		5.00	
Velocidad de flujo (mL/s)	2	25 mg/L	
		50 mg/L	

Fuente: fuente propia

En la Tabla 5.4 se detallan los datos correspondientes obtenidos por el software para realizar las diferentes ejecuciones para el estudio de la dinámica de adsorción.

Tabla 5.4. Tabla de diseño aleatorizada del estudio de la dinámica de adsorción.

No	Factores independientes	
	Concentración inicial del ion (mg/L)	Velocidades de flujo (mL/s)
1	2.70	1
2	2.70	2
3	5.93	1
4	5.91	2

Fuente: fuente propia

VI. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

En este acápite se presentan los principales resultados y su discusión acerca del estudio de la cinética y dinámica de adsorción de cromo VI de aguas sintéticas a un pH previamente definido. Este estudio incluye la caracterización de las principales propiedades de la semilla de *Moringa oleífera*.

6.1. Caracterización de la semilla de *Moringa oleífera*

La *Moringa oleífera* es una planta rica en minerales, aminoácidos y proteínas, de acuerdo a las estructuras de las semillas, estas presentan moléculas orgánicas que poseen grupos funcionales polares: hidroxilos ($-\text{OH}$), carboxilos ($-\text{COOH}$) y aminos ($-\text{NH}_2$), que funcionan como sitios activos para la retención de iones metálicos. La Tabla 6.1 establece la composición de las semillas de M.O., observándose que las proteínas que contienen las semillas, constituyen el segundo nutriente mayoritario después de los lípidos.

Tabla 6.1. Composición de la semilla de *Moringa oleífera*.

Nutrientes	Contenido
Humedad	4.7 – 8.9
Lípidos o grasas	30.8 – 43.6
Proteínas	18.9 – 40.3
Hidratos de Carbono	10.6 – 40.1
Fibra	1.4 – 12.2
Cenizas	2.6 – 5.4

Fuente: (Coello, 2022)

6.2. Preparación de la semilla de *Moringa Oleífera*

Para este estudio se utilizaron 800 gramos de semillas de *Moringa oleífera*. Durante el proceso de selección de la semilla se obtuvo una pérdida de 10% debido a que ciertas semillas estaban en mal estado. Esta pérdida durante la selección indica que el estado inicial del material es crucial para garantizar la calidad del bioadsorbente. Este porcentaje podría reducirse con un mejor control de calidad en la recolección o almacenamiento de las semillas.

En el proceso de descascarado de la semilla se obtuvo un rendimiento del 75.09% correspondiente al cotiledón y un 24.91% correspondiente a la cáscara (tés cafés).

El rendimiento del 75.09% de cotiledones frente al 24.91% de cáscaras muestra que la mayor parte del material es aprovechable para la adsorción, lo que refuerza la viabilidad del uso de estas semillas en aplicaciones experimentales. No obstante, las cáscaras podrían evaluarse como subproducto para otros usos, como aditivos para compostaje o biomasa energética. Posteriormente, en el proceso del lavado se eliminó las impurezas que aún podrían contener las semillas.

En la parte del secado, se perdió un porcentaje de humedad de 96.00%, lo que indica que las semillas, después de la etapa de lavado contienen una cantidad significativa de agua. Este resultado sugiere que la etapa de secado es crítica para evitar la degradación del material y mejorar su capacidad de adsorción.

En la etapa de triturado se obtuvo un porcentaje de rendimiento del 65.09%, con respecto al peso inicial de la semilla con cáscara. Por último, en el proceso de tamizado el rendimiento fue del 36.89% para un diámetro de partícula menor a 0.45 mm y un rendimiento del 28.20% correspondiente al diámetro de partícula mayor a 0.45 mm. La mayor proporción de partículas con un tamaño menor a 0.45 mm (36.89%) resalta la eficacia del proceso de trituración y tamizado. Esto es importante porque las partículas más finas tienden a aumentar la superficie específica, mejorando la capacidad de adsorción. No obstante, el material más grueso (28.20%) podría ser evaluado para aplicaciones donde se requiera una menor resistencia al flujo en columnas de lecho fijo.

6.3. Análisis de aceite en la semilla de *Moringa oleífera*

Previo al análisis de aceite se realizó un análisis de humedad a la muestra de semilla triturada de *Moringa oleífera*, los porcentajes de humedad de ambas muestras se detallan en la Tabla 6.2. El resultado muestra que la semilla previa a la extracción de aceite contiene una cantidad mayor de humedad en comparación con la semilla triturada después de la extracción del aceite. Esta variación radica en el almacenamiento de la semilla y en el tratamiento de secado utilizado en el procesamiento de la semilla triturada.

Tabla 6.2. Análisis de humedad a la semilla triturada de *Moringa oleífera*.

Muestra	Porcentaje de Humedad
Semilla sin extracción de aceite	3.54 %
Semilla con extracción de aceite	0.94 %

Fuente: fuente propia

En el proceso de extracción de aceite se pesaron los conjuntos que contendrían las muestras trituradas de *Moringa oleífera*, valores detallados en la Tabla B.1 en la sección de Anexos (Anexo B). La Tabla 6.3 detalla los resultados obtenidos en la extracción por el método Soxhlet.

Tabla 6.3. Resultados del porcentaje de grasa extraída y retenida en la semilla después de la extracción de aceite.

No	W1	W2	S	Contenido de % de Grasa extraída	% Grasa retenida en la semilla
1	110.71	136.17	68.81	41.27	41.27
2	111.30	134.95	64.96	36.41	4.86
3	109.31	117.58	20.04	37.00	4.27

Fuente: fuente propia

Nota: W1 es el peso del matraz vacío en gramos, W2 es el peso del matraz más la grasa extraída y S es el peso de la muestra.

Los resultados se detallan a continuación:

En el análisis de la muestra No 1 se determinó un porcentaje de aceite contenido en la semilla sin extracción de aceite de un 41.27%, el cual se encuentra en el rango establecido por la literatura ya que la semilla no se había sometido a la extracción de aceite. De acuerdo a Lozano (2019) La semilla de *Moringa oleífera* es la parte que más se aprovecha debido al contenido de aceite que oscila entre un 30.8 y 43.6%.

El análisis de la muestra No 2 del porcentaje de aceite realizado a la semilla triturada luego del proceso de extracción de aceite fue de un 36.41%, por lo que el porcentaje de grasa que aun contenía la semilla fue de un 4.86%. Por su parte, el análisis de la muestra No 3, de la semilla triturada con extracción de aceite, indicó que el valor extraído de aceite fue de un 37.0%, por lo que el porcentaje de grasa que aun contenía la semilla fue de un 4.27%.

El proceso de secado permitió reducir significativamente el contenido de humedad de las semillas trituradas a un promedio de 0.94%. La disminución de la humedad es un indicador de que el material está bien estabilizado, lo cual es crucial para evitar degradación microbiológica o cambios estructurales que puedan afectar su rendimiento en aplicaciones experimentales posteriores.

Asimismo, se logró disminuir el contenido de aceite a un promedio de 4.56%, lo que las hace aptas para ser utilizadas en experimentos específicos de adsorción. Este bajo contenido de aceite puede influir positivamente en la capacidad de adsorción, ya que reduce la interferencia de lípidos con los sitios activos del material.

6.4. Caracterización del Análisis Espectral

La caracterización de los grupos funcionales presentes en la semilla de *Moringa oleífera* se realizó por espectroscopia infrarroja (IR). El análisis del espectro IR realizado a la semilla se detalla a continuación:

La Figura 6.1 indica que el espectro obtenido de la semilla triturada de *Moringa Oleífera* describe una banda amplia y alta que se extiende entre un rango de 3,500 y 3,200 cm^{-1} esta banda es debido al estiramiento de los grupos hidroxilos (O-H), y demás uniones simples al Hidrogeno, que a la vez son proteínas, ácidos grasos, carbohidratos y lignina los cuales están presentes en la semilla de *Moringa oleífera*.

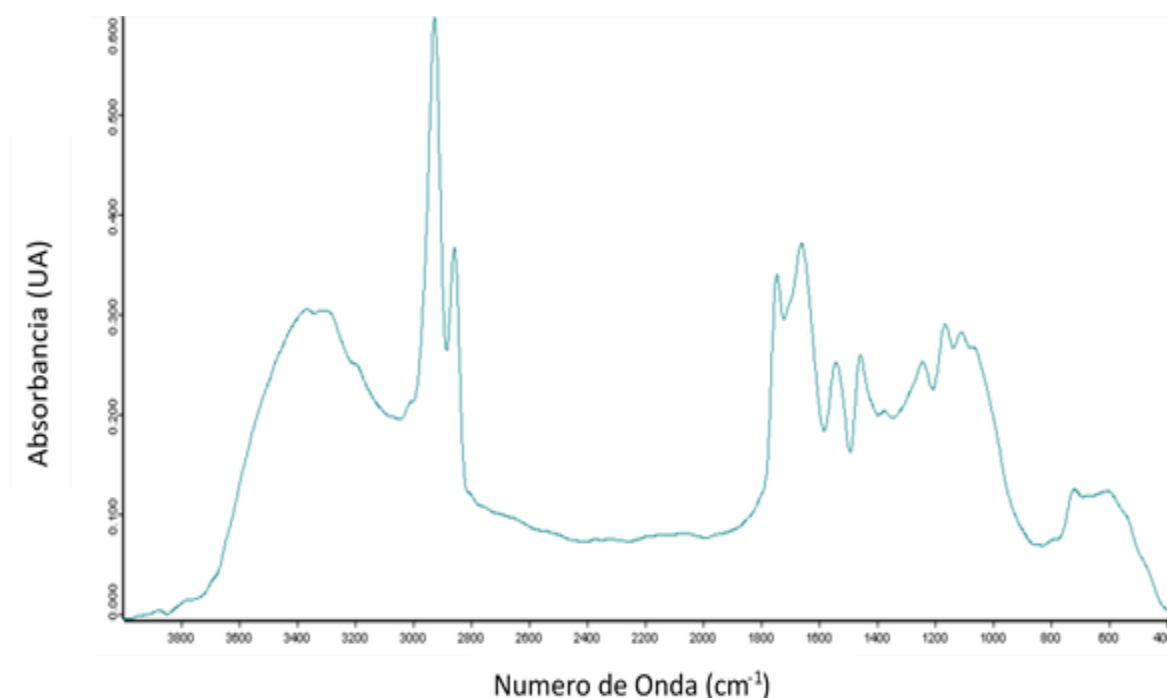


Figura 6.1. Resultados del espectro IR realizado a la semilla triturada de *Moringa oleífera*.

Los picos más alto comprendidos en el rango de 3,000 y 2,800 cm^{-1} se deben al estiramiento de bandas ligadas al enlace de estiramiento correspondiente al grupo C-H, ya que dichos grupos pertenecen a los compuestos orgánicos de la semilla,

en el rango de los 2,500 y 2,000 cm^{-1} no se aprecian estiramiento de bandas debido a que no hay relación a los enlaces triples, en el rango de 2,000 y 1,500 cm^{-1} podemos apreciar la región llamada de los dobles enlaces, en los que aparecen los enlaces de vibración $\text{C}=\text{C}$ Y $\text{C}=\text{O}$, la banda asociada al enlace $\text{C}=\text{O}$ se refleja en el rango de 1,830 y 1,650 cm^{-1} , por lo que se confirman dicho enlace de las proteínas en el grupo amida ($\text{C}=\text{O}$) en la semilla de *Moringa oleífera*.

Al comparar nuestros resultados con un estudio realizado por Hernández Páez (2017) se observa un comportamiento similar que caracterizan las bandas principales de la semilla de *Moringa oleífera* que forman parte de los grupos funcionales principales descritos anteriormente, detallando los grupos (NH_3 y $-\text{COOH}$), los cuales son responsables de realizar la coagulación y floculación, obteniendo así una buena remoción del ion Cr VI .

6.5. Evaluación de la Cinética de Adsorción

Para la evaluación de la cinética de adsorción de cromo VI en semilla triturada de *Moringa oleífera* con bajo grado de aceite, se realizaron corridas experimentales con dosis de biomasa de 2, 5 y 10 g, a diferentes concentraciones iniciales y un tamaño de partícula de <0.45 mm.

Los datos obtenidos fueron ajustados a los modelos de Pseudo-primer orden (Ec.1) y Pseudo-segundo orden (Ec.2) y se representan gráficamente en las Figuras 6.2 a 6.7. Los datos experimentales se presentan en la sección de anexos (Anexo B), Tablas B.2 a B.7.

Los resultados obtenidos para cada grafico se detallan a continuacion:

- **Figura 6.2:** Corresponde al análisis N°1, con una cantidad de biomasa de 2 g y una concentración inicial (Co) de 31.75 mg/L. El mejor ajuste de los datos se obtuvo con el modelo de pseudo-segundo orden, presentando un coeficiente de determinación (R^2) de 0.9994; mientras que el modelo de pseudo-primer orden arrojó un R^2 de 0.839.
- **Figura 6.3:** Corresponde al análisis N°2, con una cantidad de biomasa de 2 g y $\text{Co} = 65.65$ mg/L. El modelo de pseudo-segundo orden mostró el mejor ajuste, con un R^2 de 0.9943, en contraste con el modelo de pseudo-primer orden, que obtuvo un R^2 de 0.7025. Este valor de R^2 indica que el ajuste es regular y que el modelo de pseudo-primer orden no describe tan bien el proceso de adsorción.

- **Figura 6.4:** Corresponde al análisis N°3, utilizando 5 g de biomasa y $C_0 = 32.37$ mg/L. Nuevamente, el mejor ajuste se obtuvo para el modelo de pseudo-segundo orden, con un R^2 de 0.9515, mientras que el modelo de pseudo-primero orden presentó un R^2 de 0.4911, lo cual indica que este modelo no describe tan bien el proceso de adsorción.
- **Figura 6.5:** Corresponde al análisis N°4, con una cantidad de biomasa de 5 g y $C_0 = 72.88$ mg/L. El modelo de pseudo-segundo orden demostró el mejor ajuste, con un R^2 de 0.9968, mientras que el modelo de pseudo-primero orden presentó un R^2 de 0.8497.
- **Figura 6.6:** Corresponde al análisis N°5, utilizando 10 g de biomasa y $C_0 = 31.22$ mg/L. Los resultados muestran que el modelo de pseudo-segundo orden ofrece el mejor ajuste, con un R^2 de 0.9646; en tanto que el modelo de pseudo-primero orden presentó un R^2 de 0.9546. Se observa, además, que la diferencia entre los R^2 para ambos modelos es mínima.
- **Figura 6.7:** Corresponde al análisis N°6, con una cantidad de biomasa de 10 g y $C_0 = 64.25$ mg/L. En este caso, el mejor ajuste de los datos experimentales se obtuvo con el modelo de pseudo-primero orden, con un R^2 de 0.9663, mientras que el modelo de pseudo-segundo orden alcanzó un R^2 de 0.9395. Al igual que en el análisis anterior, la diferencia entre los ajustes de ambos modelos es mínima.

En resumen, para los experimentos N°1 al N°4, los resultados indican que el modelo de pseudo-segundo orden ofrece el mejor ajuste de los datos, con una clara diferencia en los valores de R^2 respecto al modelo de pseudo-primero orden. Esto sugiere que, bajo estas condiciones de operación, el mecanismo predominante en la adsorción de cromo VI en el adsorbente no está controlado por la transferencia de masa, sino por la adsorción química. En este caso, la etapa limitante del proceso está asociada con la interacción entre los iones cromo VI y los sitios activos del adsorbente, lo que es consistente con el comportamiento de adsorción de segundo orden.

La quimisorción implica una interacción fuerte entre el ion cromo VI y los sitios activos del adsorbente, donde los iones son retenidos a través de enlaces químicos, como puentes de hidrógeno o interacciones electrostáticas. Este tipo de adsorción es más lento y controlado por la disponibilidad de sitios activos en el adsorbente, lo que sugiere que la etapa de adsorción es el paso limitante.

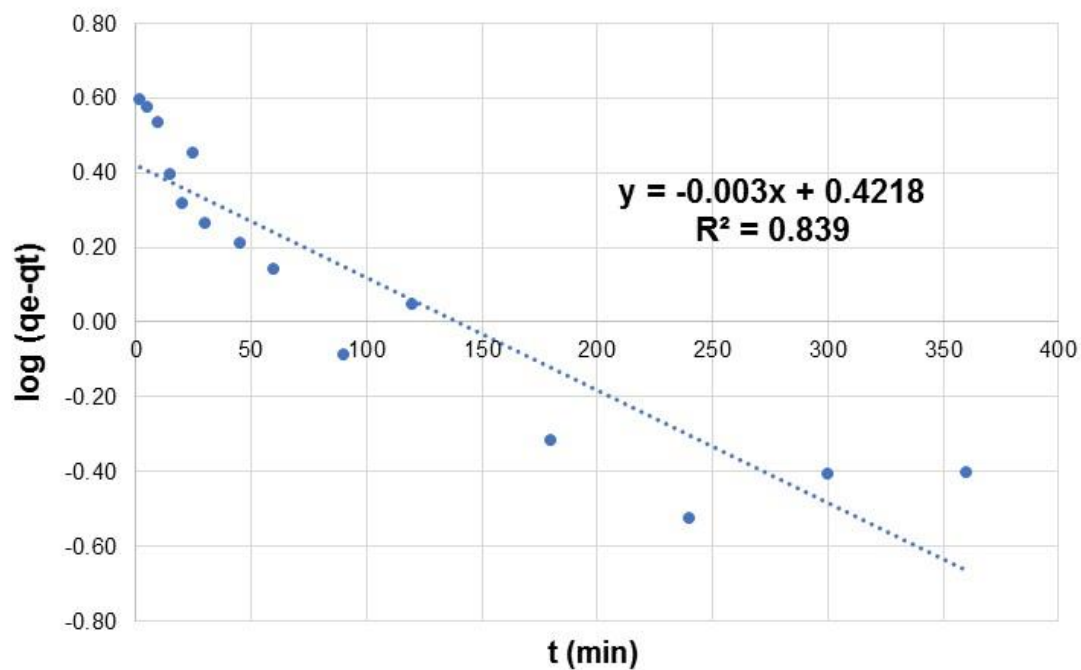
Por otro lado, los experimentos N°5 y N°6 muestran una tendencia favorable al modelo de pseudo-segundo orden, aunque en el experimento N°6, el valor de R^2

para este modelo fue ligeramente superior al del pseudo-primer orden. Estos resultados sugieren que, al aumentar la cantidad de biomasa en contacto con la solución de cromo VI, se incrementa la cantidad de iones adsorbidos debido a la mayor disponibilidad de sitios activos en la semilla de *Moringa oleífera*. A mayor cantidad de adsorbente, el mecanismo predominante en la adsorción parece ser la transferencia de masa, ya que la mayor superficie activa facilita un transporte más eficiente de los iones cromo hacia los sitios de adsorción.

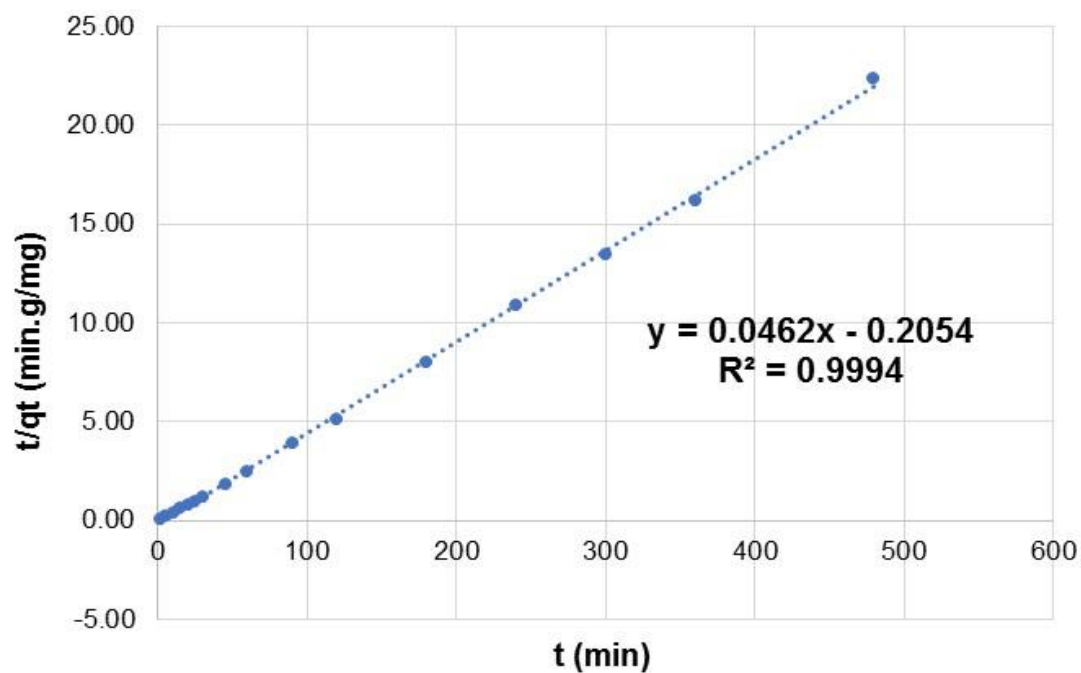
La transferencia de masa se refiere al transporte de los iones de cromo VI desde la solución hacia los sitios de adsorción, lo cual depende de la cantidad de superficie activa disponible en el adsorbente. Cuando hay más biomasa, la disponibilidad de sitios activos es mayor, y la adsorción depende más del transporte de los iones hacia esos sitios que de la interacción química entre el ion y el adsorbente.

Estos hallazgos confirman la hipótesis alternativa planteada en el estudio. Existe un efecto claro de la masa del adsorbente sobre el ajuste de los datos experimentales a los modelos cinéticos de pseudo-primer y pseudo-segundo orden. La cantidad de biomasa no solo influye en la capacidad de adsorción, sino también en el mecanismo predominante del proceso.

En experimentos con menor cantidad de adsorbente, la adsorción química es la etapa controlante, ya que la cantidad de sitios activos es menor y la velocidad de adsorción depende de la interacción química con esos sitios. Sin embargo, al aumentar la cantidad de biomasa, la transferencia de masa se convierte en el factor limitante del proceso de adsorción del ion cromo hexavalente usando semillas trituradas de *Moringa oleífera* como adsorbente, ya que el proceso está más controlado por la eficiencia con la que los iones alcanzan los numerosos sitios activos presentes en el adsorbente.

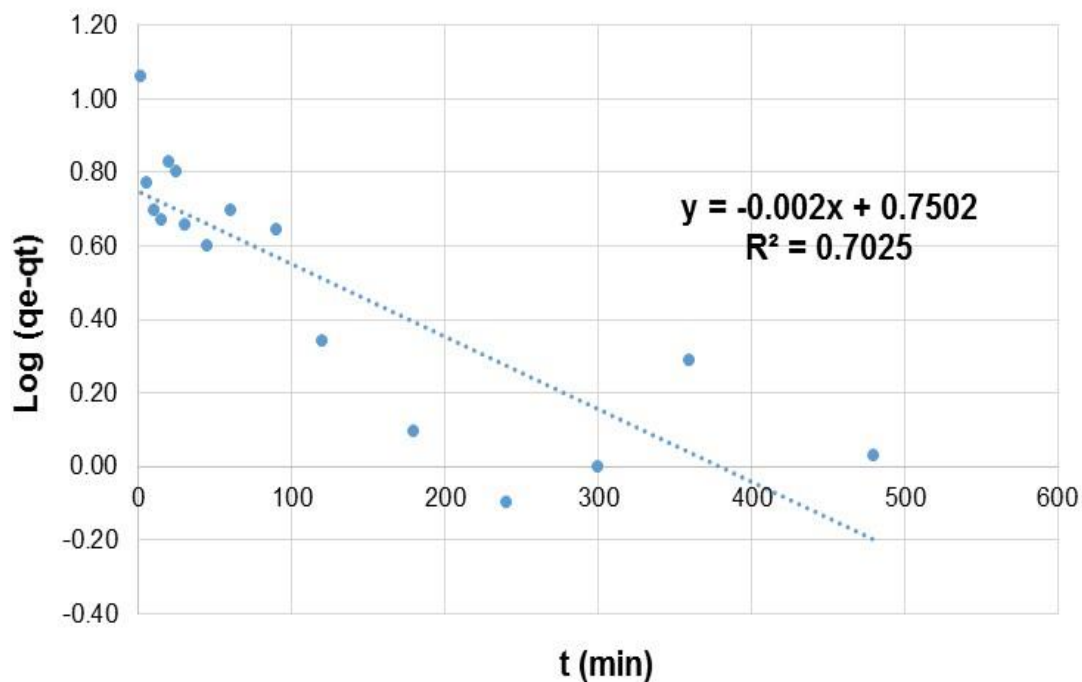


a) Pseudo-primer orden

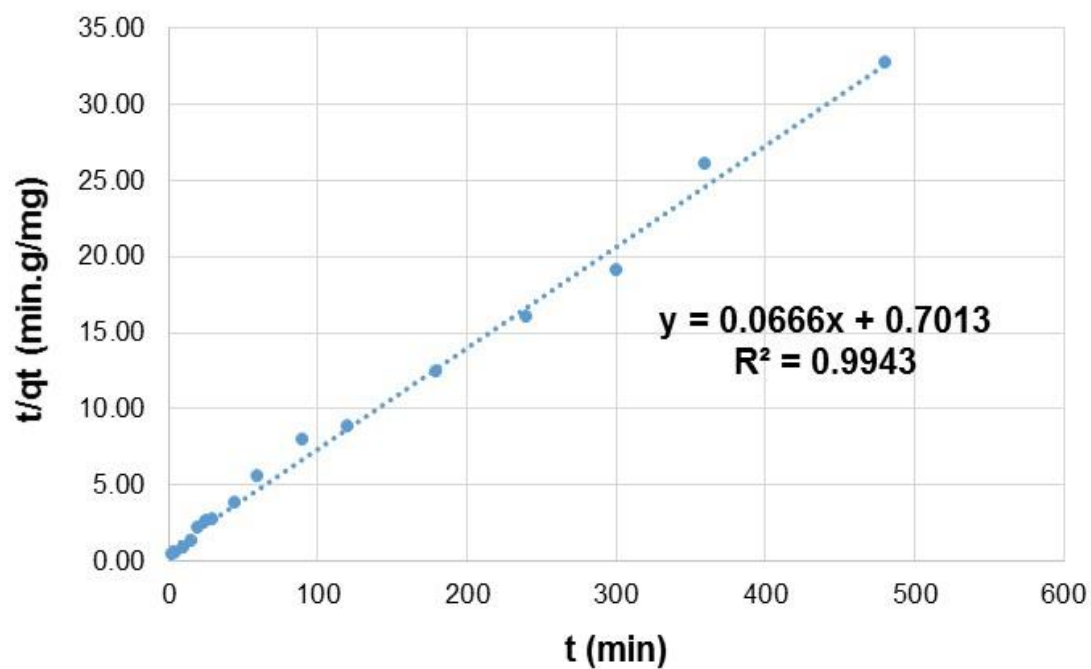


b) Pseudo-segundo orden

Figura 6.2. Ajuste de las ecuaciones de pseudo-primer orden y pseudo-segundo orden con una masa de semilla triturada de M.O. de 2 g y $C_0=31.75$ mg/L.

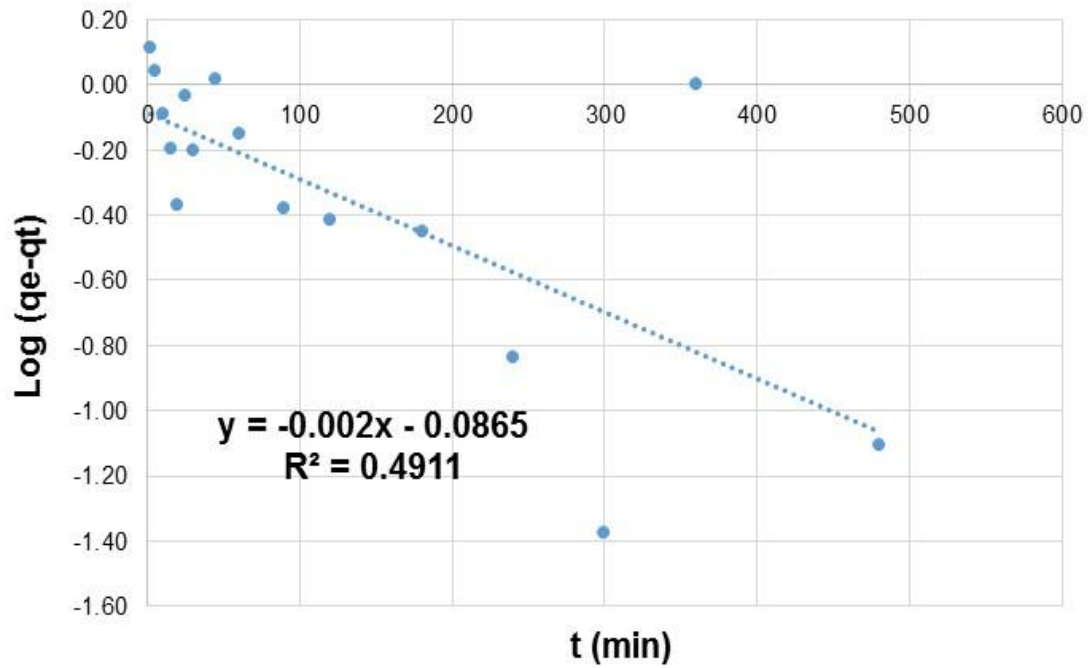


a) Pseudo-primer orden

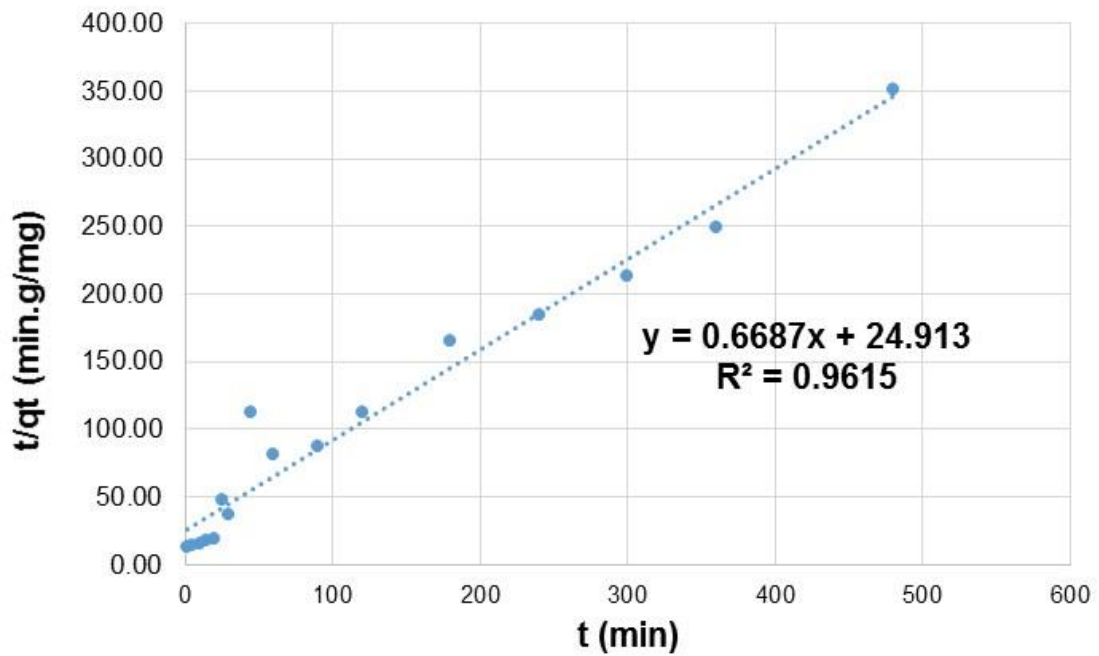


b) Pseudo-segundo orden

Figura 6.3. Ajuste de las ecuaciones de pseudo-primer orden y pseudo-segundo Orden con una masa de semilla de M.O. triturada de 2 g y $C_0=65.65$ mg/L.

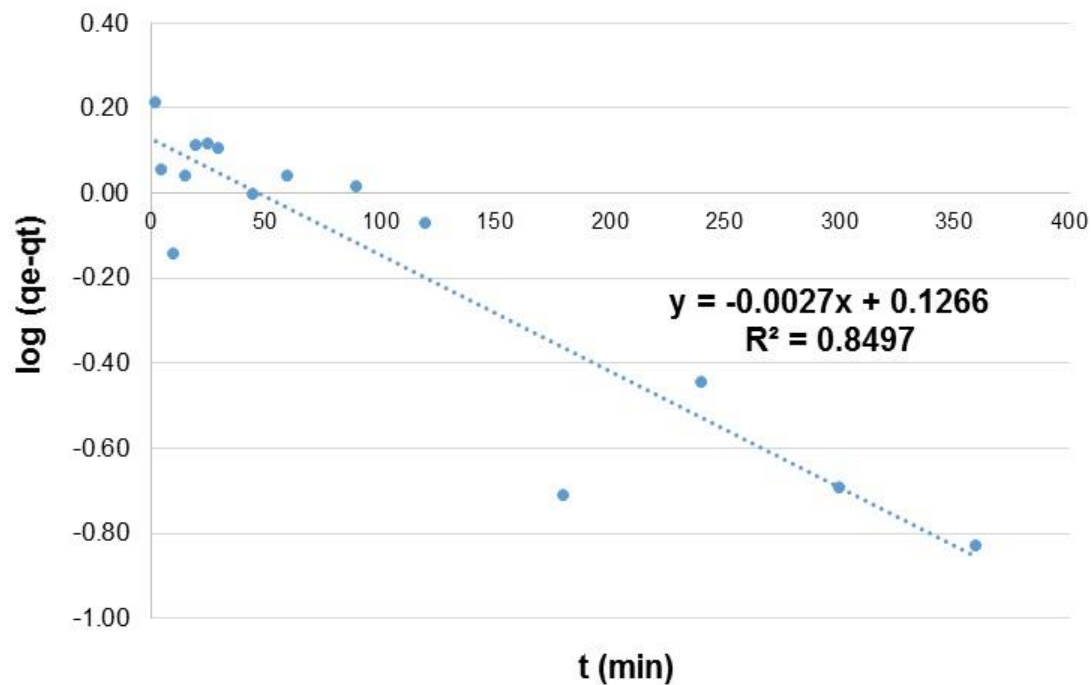


a) Pseudo-primer orden

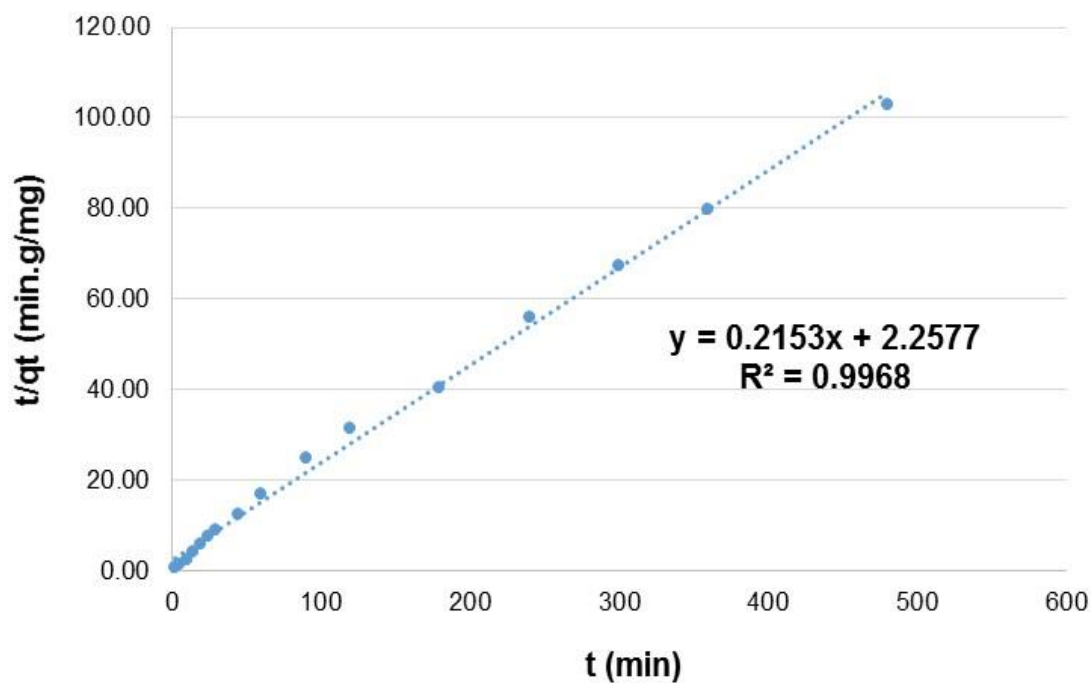


b) Pseudo-segundo orden

Figura 6.4. Ajuste de las Ecuaciones de pseudo-primer orden y pseudo-segundo orden con una masa de semilla triturada de 5 g y $C_0 = 32.37 \text{ mg/L}$.

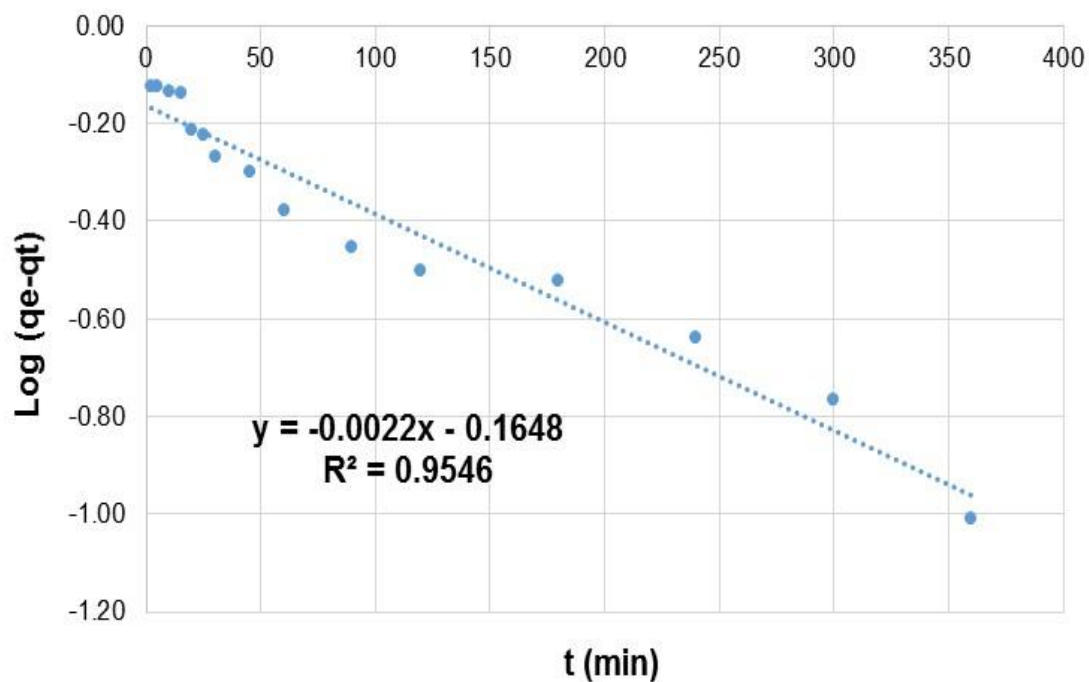


a) Pseudo-primer orden

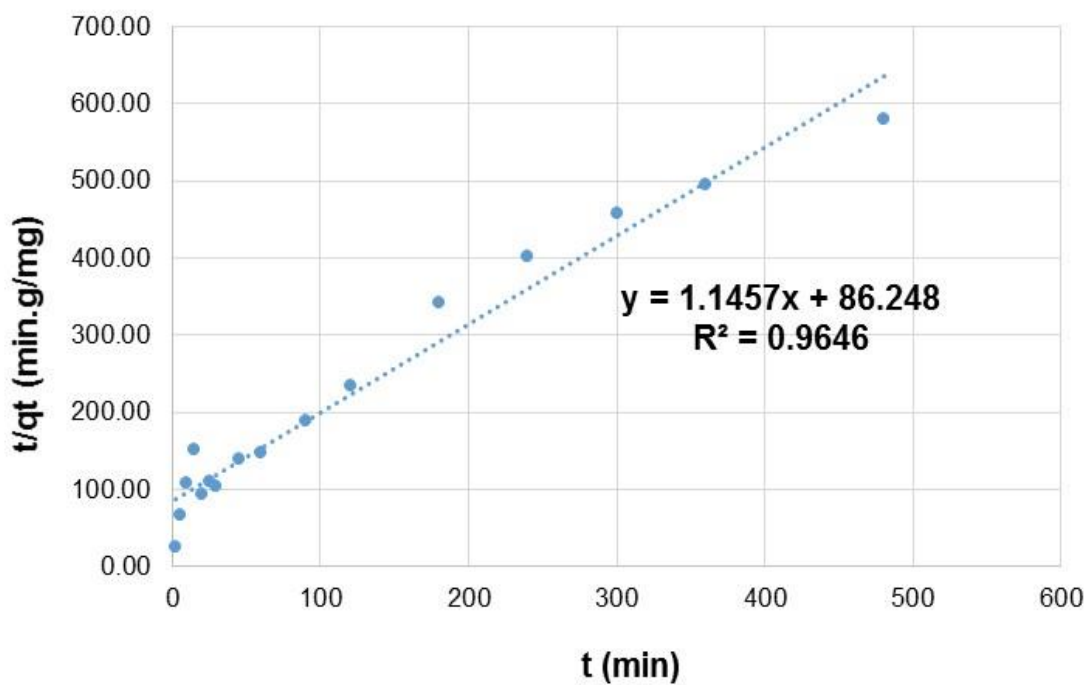


b) Pseudo-segundo orden

Figura 6.5. Ajuste de las Ecuaciones de pseudo-primer orden y pseudo-segundo orden con una masa de semilla triturada de 5 g y $C_0=72.88$ mg/L.

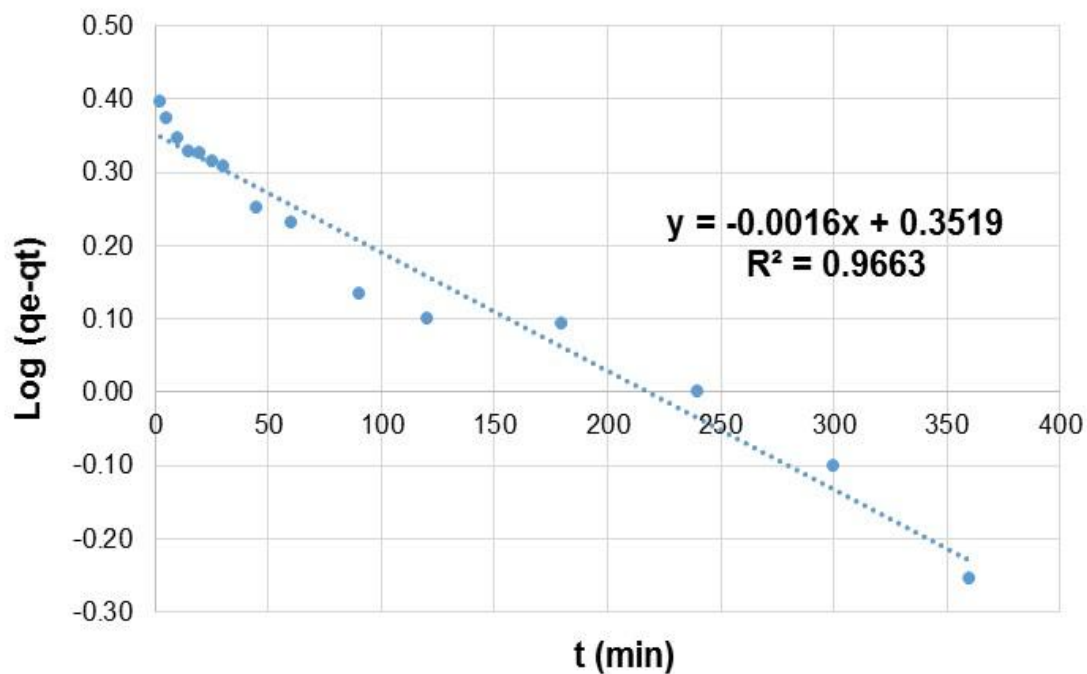


a) Pseudo-primer orden

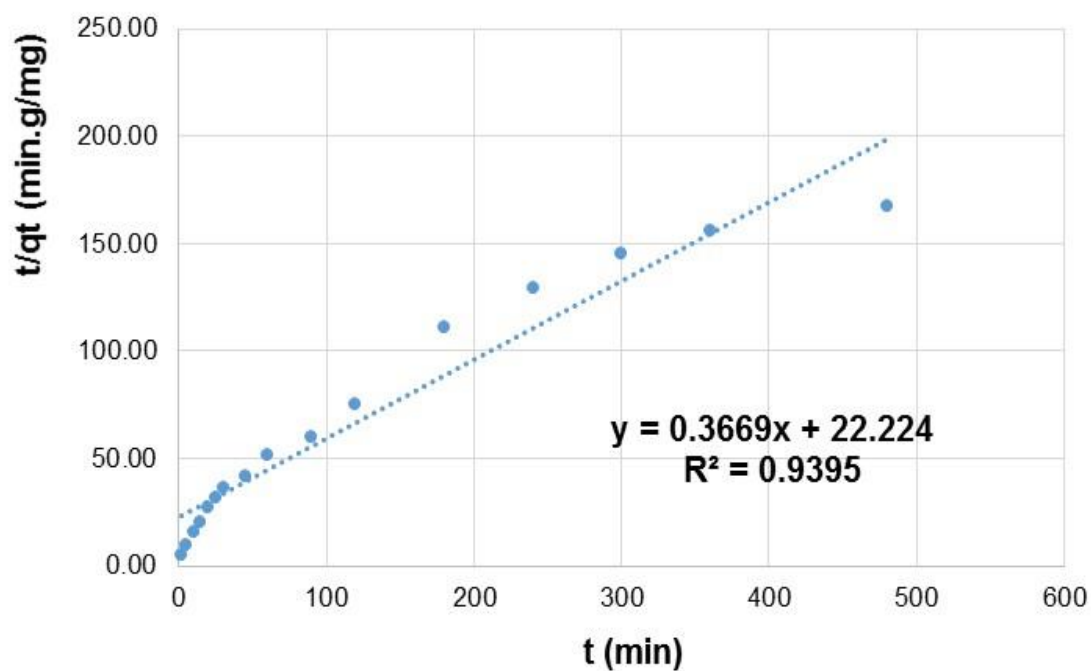


b) Pseudo-segundo orden

Figura 6.6. Ajuste de las Ecuaciones de pseudo-primer orden y pseudo-segundo orden con una masa de semilla de 10 g y $C_o = 31.22 \text{ mg/L}$.



a) Pseudo-primer orden



b) Pseudo-segundo orden

Figura 6.7. Ajuste de las Ecuaciones de pseudo-primer orden y pseudo-segundo orden con una masa de semilla triturada de 10 g y $C_0 = 64.25 \text{ mg/L}$.

En la Tabla 6.4 se describen los parámetros q_e , k_1 y k_2 para la cinética de adsorción de Cr VI, los cuales corresponden a los valores de las ecuaciones de Pseudo-primer orden y Pseudo-segundo orden. En donde q_e es la capacidad de adsorción en el equilibrio, k_1 es la constante de Pseudo-primer orden y k_2 es la constante de Pseudo-segundo orden.

Tabla 6.4. Valores de q_e , k_1 y k_2 para Cr VI, determinados de acuerdo a los modelos de Pseudo-primer orden y Pseudo-segundo orden utilizando diferentes masas de adsorbente, diferentes concentraciones iniciales y tamaño de partícula de <0.45 mm.

Masa de bioadsorbente (g)	Concentración inicial (mg/l)	Pseudo-Primer Orden		Pseudo-Segundo Orden	
		q_e (mg/g)	k_1 (min ⁻¹)	q_e (mg/g)	k_2 (g/mg·min)
2.0	31.75	2.64	6.90×10^{-3}	21.64	1.03×10^{-2}
2.0	65.65	5.63	4.60×10^{-3}	15.02	6.32×10^{-3}
5.0	32.37	0.81	4.61×10^{-3}	1.50	1.78×10^{-2}
5.0	72.88	1.33	6.21×10^{-3}	4.64	2.05×10^{-2}
10.0	31.22	0.68	5.06×10^{-3}	0.87	1.52×10^{-2}
10.0	64.25	2.25	3.68×10^{-3}	2.73	6.03×10^{-3}

Fuente: fuente propia

Los resultados encontrados concuerdan con trabajos realizados por diferentes autores. En un estudio realizado por Lema Mita & Perez Guevara (2021), los autores reportaron valores para la adsorción de Cromo VI en cáscara de naranja y cáscara de limón valores de k_1 de $2.24 \times 10^{-2} \text{ min}^{-1}$ y k_2 de $2.02 \times 10^{-3} \text{ g/mg} \cdot \text{min}$ y un ajuste predominante al Pseudo-segundo orden con una correlación de 0.99.

Por su parte, Albis A. & Dominguez (2015), en un estudio cinético realizado a la cáscara de yuca para la adsorción de Cr VI, presentaron valores generalizados para el valor de las constantes de Pseudo-primer orden y Pseudo-segundo orden que oscilan entre 0.030 y 0.055, respectivamente. El modelo predominante en este caso fue el Pseudo-segundo orden, indicando que en uno de sus ajustes predominó también el Pseudo-primer orden.

De igual manera, Tovar Tejada, Villanova Ortiz & Ruiz Paternina (2016), en un estudio realizado a diferentes biomásas orgánicas en la cinética de adsorción de Cr VI, encontraron que los datos se ajustaron a los modelos cinéticos de Pseudo-

primer orden y Pseudo-segundo orden, obteniendo que los tres casos expuestos están regidos por el mecanismo de Pseudo-segundo orden.

Los resultados encontrados por estos autores y nuestros resultados confirman que el mecanismo clave depende de la relación entre el adsorbato (Cr VI) y el adsorbente (biomasa de *Moringa oleífera*). Para adsorbentes con menor cantidad de biomasa (como en los experimentos N°1 a N°4), la adsorción química parece ser el mecanismo limitante, ya que la velocidad de adsorción depende de la interacción química del adsorbato con los sitios activos del adsorbente. Sin embargo, cuando la cantidad de biomasa aumenta (N°5 y N°6), el mecanismo predominante cambia hacia la transferencia de masa, ya que el proceso está más controlado por la eficiencia con la que los iones alcanzan los numerosos sitios activos presentes en el adsorbente.

6.6. Determinación de la Dinámica de Adsorción

6.6.1. Determinación de la Densidad de Conjunto

Esta propiedad se determinó agregando diferentes masas de bioadsorbente en una probeta de 100 mL, y posteriormente pesando su contenido. En la Tabla 6.5 se detalla los resultados obtenidos, los cuales indican un valor promedio de densidad de conjunto de 0.49 g/cm³.

Tabla 6.5. Densidad de Conjunto para la Semilla triturada de *Moringa oleífera*.

Masa probeta (g)	Volumen de biomasa (mL)	Probeta + biomasa (g)	Masa de biomasa (g)	Densidad C (g/cm ³)
127.39	35	144.00	16.61	0.47
	50	152.09	24.70	0.49
	65	160.10	32.71	0.50
	Promedio			0.49

Fuente: fuente propia

6.6.2. Determinación de la Densidad de Partícula

La densidad de partícula de la semilla triturada de *Moringa oleífera* se calculó tomando en consideración que la densidad del agua es de 0.998 g/cm³ a una temperatura ambiente de 25°C. En la Tabla 6.6 se muestra los datos y el resultado que se obtuvo fue una densidad de partícula de 0.73 g/cm³.

Tabla 6.6. Densidad de partícula para la Semilla triturada de *Moringa oleífera*.

No	Masa de pic. (g)	Pic. + biomasa (g)	Pic. + biomasa + agua (g)	Densidad Partícula (g/cm ³)
1	20.91	21.96	70.43	0.73

Fuente: fuente propia

6.6.3. Determinación de la porosidad total

La porosidad total del lecho se calculó dividiendo las cantidades de densidad de conjunto y densidad de partícula de la biomasa. La Tabla 6.7 refleja el dato promedio de la porosidad total del bioadsorbente utilizado en este estudio, el cual fue de 0.67 g/cm³.

Tabla 6.7. Porosidad total para la Semilla triturada de *Moringa oleífera*.

No	Densidad de Conjunto (g/cm ³)	Densidad Partícula (g/cm ³)	Porosidad Total
1	0.49	0.73	0.67

Fuente: fuente propia

6.6.4. Determinación de la Dinámica de Adsorción

Para evaluar la dinámica de adsorción de cromo VI utilizando semilla triturada de *Moringa oleífera* con bajo contenido de aceite, se consideraron los siguientes parámetros: una cantidad fija de biomasa en el lecho de 35 g, con un tamaño de partícula superior a 0.45 mm, que permaneció constante a lo largo de los experimentos. Se variaron las concentraciones iniciales del ion metálico y las velocidades de flujo para analizar su efecto en el proceso de adsorción.

Los datos experimentales obtenidos durante la dinámica de adsorción de cromo VI con semilla triturada de *Moringa oleífera* se presentan detalladamente en la sección de Anexos (Anexo B), específicamente en las Tablas B.8 a B.11. Estos datos fueron ajustados a las curvas de adsorción, graficando la relación C/Co en función del volumen del lecho (BV, por sus siglas en inglés). Los resultados gráficos se ilustran en las Figuras 6.8 a 6.11, donde se observa el comportamiento del sistema durante el proceso.

Los gráficos obtenidos, correspondientes al uso de una columna de lecho fijo con semilla triturada de *Moringa oleífera*, muestran una disminución progresiva en la

concentración del ion cromo VI a lo largo del periodo de operación de la columna, indicando la efectividad del material adsorbente en la remoción del contaminante.

Las observaciones y los resultados obtenidos se detallan a continuación:

- **Experimento N°1** (Figura 6.8): se emplearon 5 L de agua sintética con una concentración inicial de 2.70 mg/L, los cuales ingresaron a la columna con un caudal promedio de 1 mL/s, con una velocidad de operación de la bomba peristáltica de 35 rpm. En los primeros minutos de operación, se observó una captación de ion cromo VI de aproximadamente el 50%, ya que el valor del punto de ruptura se situó en torno a 0.5. A medida que la solución seguía ingresando a la columna, el valor de C/C_o aumento progresivamente hasta alcanzar el punto de saturación de la biomasa, a un volumen del lecho de 52.5.
- **Experimento N°2** (Figura 6.9): se utilizó el mismo volumen de solución sintética con la misma concentración que en el experimento anterior, pero se modificó el caudal de entrada a 2 mL/s, con una velocidad de operación de la bomba de 75 rpm. El aumento del caudal de alimentación impidió determinar con precisión el tiempo de ruptura, ya que el valor de C/C_o incrementó rápidamente (superior a 0.8) a un volumen de lecho de 10 y en tan solo 5 minutos de operación. Este aumento en el caudal de entrada redujo el tiempo de contacto entre el lecho y los iones cromo VI presentes en el agua sintética, lo que dificultó una adsorción eficiente del ion metálico por parte del adsorbente.
- **Experimento N°3** (Figura 6.10): se utilizó 5 L de agua sintética con una concentración inicial de 5.93 mg/L, la cual ingresó con un caudal de entrada de 1 mL/s y una velocidad de operación de la bomba de 35 rpm. Los resultados no fueron del todo satisfactorios en la retención del cromo VI, ya que solo se alcanzó un 45% de adsorción del ion metálico ($C/C_o = 0.55$) a un volumen de lecho de 3.7. Posteriormente, se observa un rápido incremento del valor de C/C_o (superior a 0.65) hasta alcanzar su punto de saturación ($C/C_o > 0.9$) al minuto 45 de trabajo, manteniéndose constante hasta finalizar el experimento.
- **Experimento N°4** (Figura 6.11): en este experimento se utilizó un caudal de entrada de 2 mL/s y trabajo de operación de la bomba de 75 rpm, con una concentración inicial de agua sintética de 5.91 mg/L. Durante los primeros minutos se observó que el tiempo de contacto entre el adsorbente y el adsorbato fue extremadamente corto, ya que el valor de C/C_o fue de 0.68 a

un volumen de lecho de 10, lo que impidió determinar con precisión el tiempo de ruptura. Similar al experimento N°3, hubo un rápido incremento del valor de C/Co , llegando a su punto de saturación ($C/Co > 0.9$) en solo 25 minutos de operación.

En general, los resultados experimentales de la dinámica de adsorción del ion Cr VI en columnas revelan que, en los experimentos 2 y 4, no fue posible determinar con exactitud el tiempo de ruptura debido al incremento del caudal de alimentación. Un flujo mayor disminuye el tiempo de contacto entre el lecho y la solución, lo que provoca un colapso en la columna, ocasionando que el agua sintética se desborde por la parte superior y no permita el paso continuo de la solución.

Por otro lado, en los experimentos 1 y 3, sí se pudo identificar parte del punto de ruptura, con valores de C/Co entre 0.50 y 0.55 mg/L respectivamente. Esta fase es de especial interés, ya que en ella se registró el porcentaje máximo de captación del ion, alcanzando un 50% y un 45% de adsorción respectivamente, bajo condiciones de operación con caudales más bajos. Estos experimentos confirman la hipótesis alternativa planteada en este estudio, dado que al menos una variable, en este caso la velocidad de alimentación de la columna, influye significativamente en el proceso de adsorción.

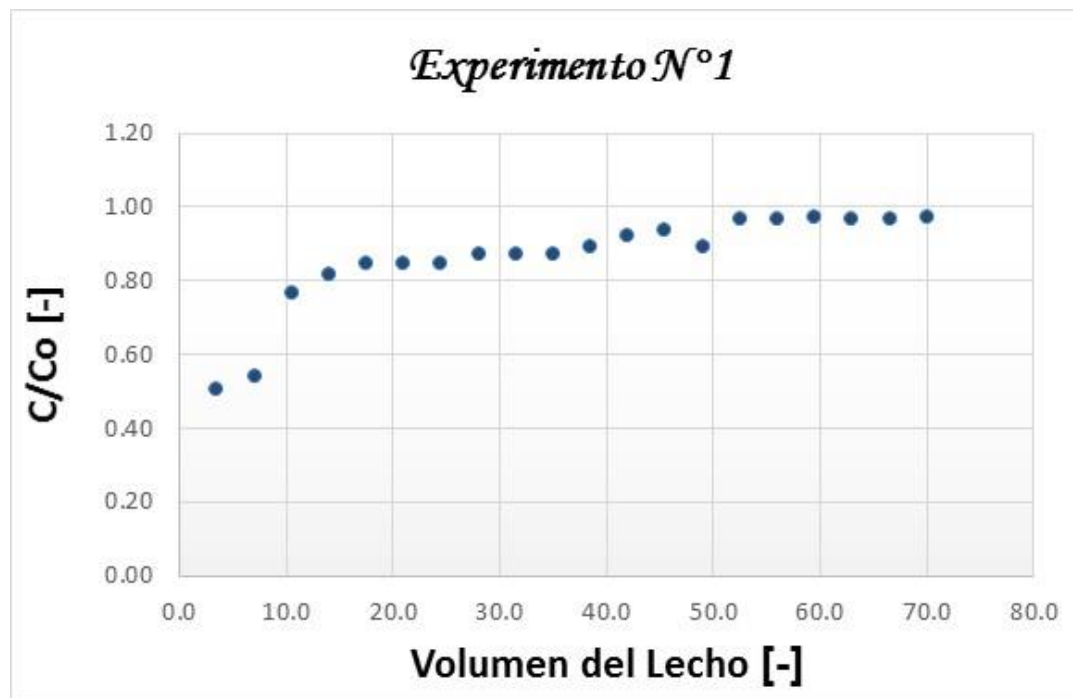


Figura 6.8. Comportamiento de la curva de la dinámica de adsorción de cromo VI, con masa de 35 g, $Co=2.60$ mg/L, $Q=1$ mL/s y velocidad=35 rpm.

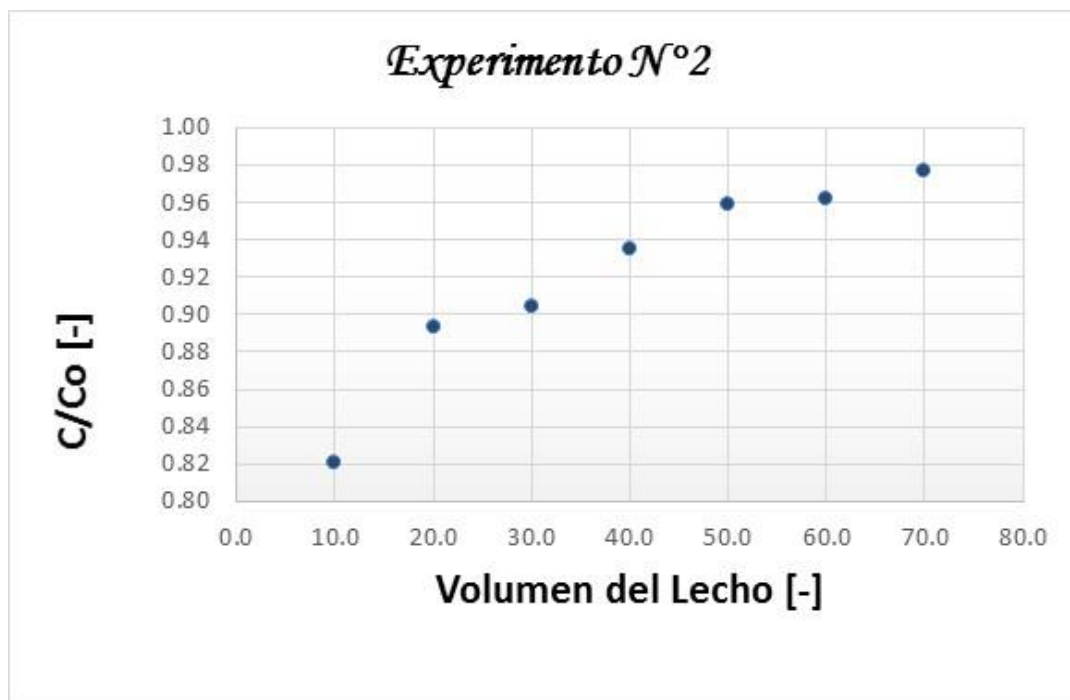


Figura 6.9. Comportamiento de la curva de la dinámica de adsorción de cromo VI, con masa de 35 g, $C_o=2.97$ mg/L, $Q=2$ mL/s y velocidad=75 rpm.

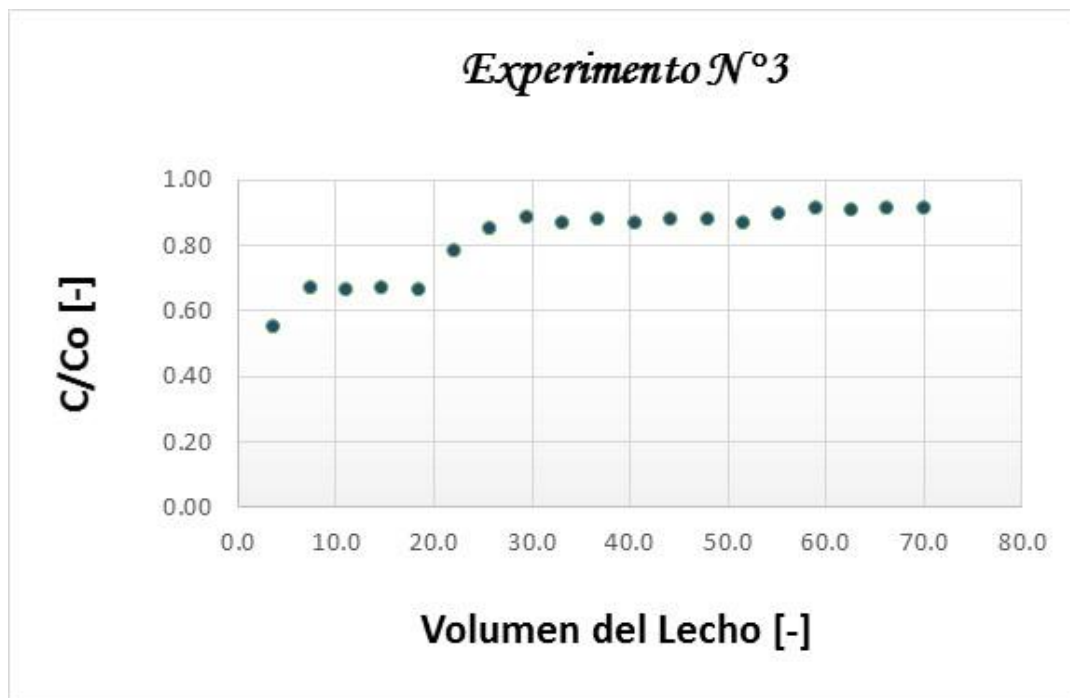


Figura 6.10. Comportamiento de la curva de la dinámica de adsorción de cromo VI, con masa de 35 g, $C_o=5.93$ mg/L, $Q=1$ mL/s y velocidad=35 rpm.

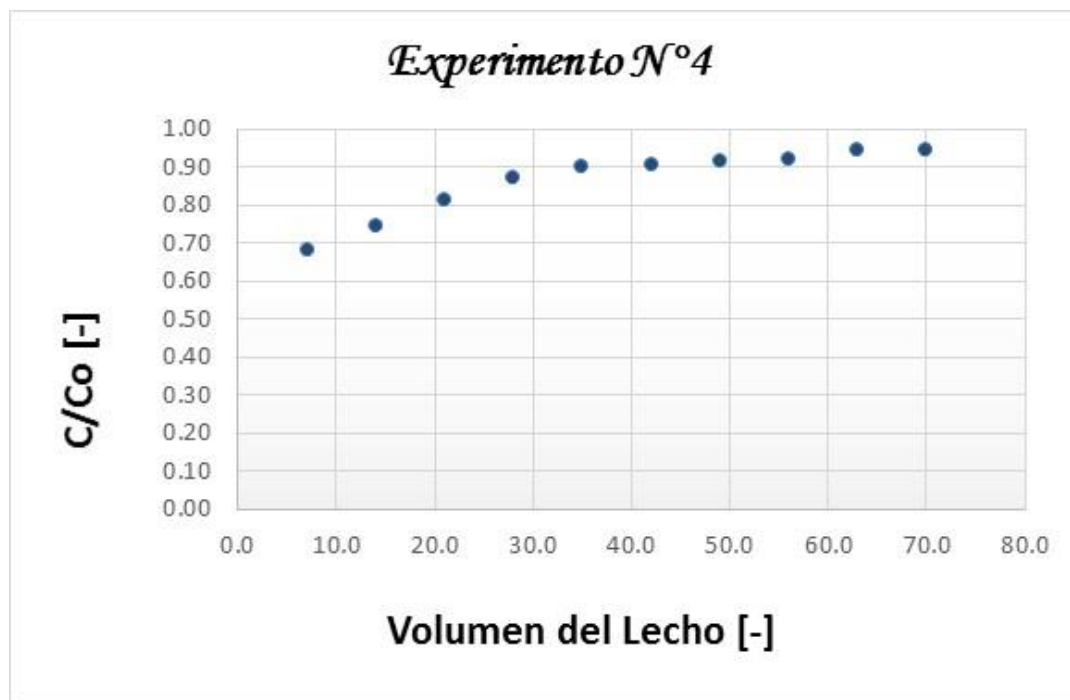


Figura 6.11. Comportamiento de la curva de la dinámica de adsorción de cromo VI, con masa de 35 g, $C_o=5.91$ mg/L, $Q=2$ mL/s y velocidad=75 rpm.

En general, en base a los resultados, se establece lo siguiente:

1. **Influencia del caudal en el proceso de adsorción:** Los resultados experimentales confirman que la velocidad de alimentación (caudal) es una variable clave en el proceso de adsorción del ion cromo VI en columnas de lecho fijo. A mayor caudal, se reduce el tiempo de contacto entre la solución y el adsorbente, lo que disminuye la eficiencia de adsorción. Este comportamiento se observó claramente en los experimentos 2 y 4, donde el aumento del caudal provocó que no se pudiera determinar con precisión el tiempo de ruptura y se alcanzara el punto de saturación de manera acelerada.
2. **Eficiencia de adsorción a caudales bajos:** Los experimentos 1 y 3 demostraron que, con caudales más bajos (1 mL/s), se obtiene una mayor eficiencia de adsorción, alcanzando valores de captación del ion cromo VI de hasta un 50% y un 45% respectivamente. Esto se debe a un mayor tiempo de contacto entre el adsorbente y la solución, lo que permite una mejor retención del ion metálico.
3. **Comportamiento de la columna en condiciones extremas:** Se observó que cuando el caudal es excesivo, como en los experimentos 2 y 4, la columna tiende a colapsar, resultando en el desbordamiento de la solución sintética por

la parte superior de la columna. Este fenómeno limita el funcionamiento óptimo del sistema y demuestra que existe un caudal máximo en el que la columna puede operar sin comprometer su eficiencia.

4. **Importancia de la optimización de las condiciones de operación:** Los experimentos realizados resaltan la importancia de optimizar el caudal de alimentación para maximizar la eficiencia del proceso de adsorción. Un control adecuado de esta variable permite mejorar la capacidad del adsorbente para retener el ion cromo VI, prolongar el tiempo de ruptura y evitar el colapso de la columna.
5. **Confirmación de la hipótesis alternativa:** Los resultados obtenidos respaldan la hipótesis planteada en este estudio, en la cual se afirmaba que la velocidad de alimentación afecta de manera significativa el proceso de adsorción en columnas de lecho fijo. La variación en el caudal tiene un impacto directo sobre la capacidad de adsorción y el comportamiento del sistema, lo que abre la puerta a futuros estudios que exploren otros factores relevantes como la temperatura, la composición del adsorbente o el pH de la solución.

En un estudio realizado por Dima & Zaritzky (2019) en columnas de lecho fijo utilizando partículas de quitosano como agente adsorbente de cromo hexavalente, los autores evaluaron el caudal volumétrico de entrada a la columna y reportaron que la capacidad de adsorción fue más eficiente a velocidades menores del flujo de 3 mL/s ya que se da una buena interacción entre el agua residual y la biomasa y por ende, una buena adsorción. Lo cual concuerda con nuestro estudio y confirma la influencia del caudal en el proceso de adsorción, así como su eficiencia a caudales bajos.

Por su parte, en otro estudio realizado por Aramil (2022) donde se utilizó carbón activado como agente adsorbente, los parámetros que analizaron fueron: cantidad de adsorbente, concentración inicial del Ion y caudal de entrada. La autora llegó a la conclusión que la concentración inicial del Ion tuvo un efecto significativo en las curvas de adsorción observándose mejor la forma de “S” característica de la curva de ruptura y que la capacidad de remoción de cromo VI incrementa cuando la concentración inicial es menor y a flujos menores de entrada a la columna el material adsorbente tiene mayor tiempo de contacto entre sí y por ende mayor remoción. Estas conclusiones concuerdan con los resultados encontrados en este estudio ya que se observó una mayor adsorción a bajas concentraciones del adsorbato y menor caudal de entradas.

VII. CONCLUSIONES

La determinación del proceso para obtener semilla triturada de *Moringa oleífera* mostró un rendimiento total del 65.09%. Por otro lado, el rendimiento de extracción de aceite mediante el proceso de Hidrodestilación alcanzó un porcentaje promedio del 88.95%, lo que refleja una alta eficiencia en la reducción del contenido lipídico de la biomasa.

En la evaluación del análisis cinético de la adsorción de cromo VI utilizando semilla triturada de *Moringa oleífera*, indicó que el modelo de pseudo-segundo orden describe mejor el proceso de adsorción en condiciones de menor biomasa, lo que sugiere que la adsorción está controlada por interacciones químicas entre los iones y los sitios activos. Al incrementar la cantidad de biomasa, la transferencia de masa se convierte en el paso limitante, favoreciendo un ajuste más cercano al modelo de pseudo-primer orden.

La determinación de la dinámica de adsorción de cromo hexavalente en columnas de lecho fijo, utilizando semilla triturada de *Moringa oleífera*, los resultados confirman que la velocidad de alimentación influye significativamente en la eficiencia del proceso de adsorción en columnas de lecho fijo. Caudales más bajos favorecen una mayor retención de Cr VI debido a un tiempo de contacto adecuado, mientras que caudales más altos disminuyen la eficiencia, limitando la capacidad de adsorción del material.

VIII. RECOMENDACIONES

Dentro del amplio campo de estudio de biomasas de origen natural, se plantean las siguientes recomendaciones para futuros trabajos:

- **Optimización de la extracción de aceite:** Se recomienda realizar un estudio comparativo entre diferentes métodos de extracción de aceite a partir de la semilla de *Moringa oleífera*, con el objetivo de determinar el proceso más eficiente en términos de rendimiento. Esto es relevante dado el alto contenido lipídico de esta semilla. Además, se sugiere investigar mejoras en el proceso de hidrodestilación, adaptando equipos y técnicas que permitan optimizar la extracción de aceite bajo este método.
- **Estudios de cinética de adsorción de cromo VI:** Para mejorar los resultados obtenidos experimentalmente, se recomienda utilizar cantidades mayores a 10 gramos de biomasa en los ensayos de adsorción. Un incremento en la cantidad de biomasa en contacto con la solución permite lograr una mayor eficiencia en la remoción del contaminante.
- **Optimización de la dinámica de adsorción en columnas de lecho fijo:** Se sugiere trabajar con cantidades de biomasa en el lecho que oscilen entre 15 y 25 gramos, ya que mayores cantidades mejoran el contacto entre la fase líquida y el material adsorbente, aumentando la eficiencia del proceso. También se recomienda utilizar un tamaño de partícula mayor a 0.45 mm para garantizar un flujo adecuado a través del lecho. En cuanto a la velocidad de flujo, es aconsejable operar con caudales bajos, entre 0.5 y 1 ml/s, para favorecer el contacto entre el adsorbato y el adsorbente y obtener curvas sigmoides (forma de “S”), características de una operación eficiente en lecho fijo.
- **Ampliación del alcance práctico del estudio:** Como propuesta práctica, se recomienda aplicar estos resultados a estudios con aguas residuales provenientes de industrias como tenerías. Esto permitiría evaluar el desempeño del bioadsorbente en condiciones reales y ampliar la aplicabilidad de los hallazgos obtenidos en este trabajo.

IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Albis Arrieta, A. R., Ortiz Toro, J. D., & Martínez De la Rosa, J. E. (2017). Remoción de cromo hexavalente de soluciones acuosas usando cáscara de yuca (*Manihot esculenta*): Experimentos en columna. *Inge CuC*, 13(1), 42–52. <https://doi.org/10.17981/ingecuc.13.1.2017.04>.
- Albis A, C. L. & Dominguez, M. (2015). Analisis cinetico de la adsorcion de Cr VI en soluciones acuosas a concentraciones de 10-20 mg/l con el uso de cascara de yuca amarga (*Manihot esculenta*). *Prospect*, 64-71.
- Alvarado, E. (2019). Impacto de los vertidos de tenerias sobre la calidad fisico-quimica y la integridad biologica del sedimento del Rio Chiquito, Leon Mayo 2016-Enero 2017. *Tesis Monografica de Licenciatura en Quimica Ambiental*. Universidad Nacional Autonoma de Nicaragua, Managua, Managua.
- Aramil, D. L. (2022). Estudio del proceso en continuo de la remocion de Cr VI con CATd. *Tesis de Ingenieria Ambiental*. Tecnologico de estudios superiores de Tianguistenco, division de Ingenieria Ambiental, Mexico.
- Benavente, M. (2008). Adsorption of Metallic Ions onto Chitosan: Equilibrium and Kinetics Studies. *Tesis de licenciatura*. Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.
- Bernal Morales, D. & Aguirre Domelin, N. (2022). Escalamiento columna de adsorcion para la remocion de cromo en las aguas residuales de la industria de curtiembre por medio de la cascara de banano. *Tesis de Ingenieria Quimica*. Fundacion Universidad de America., Bogota.
- Campoverde, O. (2019). Tesis. *Tratamiento de aguas residuales de una empresa industrial de congelados*. Universidad DE PIURA, PIURA.
- Caviedes Rubio, D., Muñoz Calderon, A., Perdomo Gualtero, A., Rodriguez Acosta, D. & Sandoval Rojas, J. I. (2015). Tratamientos para la Remocion de Metales Pesados Comunmente Presentes en Aguas Residuales Industriales. *Ingenieria y Region*.
- Coello, O. K. (2022). Valorización de semillas de moringa mediante procesos germinativos y su aplicacion en alimentos de alto valor nutritivo y funcional. *Tesis de Doctorado*. Instituto de Ciencia y Tecnologia de Alimentos y Nutricion, Madrid, España.
- Condori Huancapaza, M. & Quispe Yapo, J. (2020). Determinación de la Remoción de Cromo (VI) de aguas mediante la adsorcion por carbono a partir de las baterias de litio recicladas modificadas con MnO₂.

Investigacion de grado en Ingenieria Ambiental. Universidad Peruana Union., Lima, Peru.

- Dima, J. & Zaritzky, N. (2019). Adsorcion de Cromo Hexavalente sobre particulas de quitosano en columna de lecho fijo. *Articulo de Investigacion.* Universidad Nacional de la Plata, Argentina.
- Egg, N. (2016). Comparacion de tratamientos actuales para la eliminacion de metales pesados en efluentes industriales en general. *Trabajo final para la especializacion en Ingenieria Ambiental.* Argentina.
- Folkard, G. & Sutherland, J. (1996). *Moringa Oleifera. Un arbol con enormes potenciales.* Turrialba, Costa Rica.
- Gutierrez Gomez, K. (2010). Eficiencia del coagulante de la semilla de Moringa Oleifera en el tratamiento de aguas baja turbidez. *Tesis de licenciatura.* Zamorano Carrera de Desarrollo Socioeconomico y Ambiente, Honduras.
- Gutierrez, Corona, J. & Espino Saldaña, A. (2010). Mecanismos de interaccion con cromo y aplicaciones biotecnologicas en hongos. *latinoam biotecnol.*
- Hernandez Paez, E. (2017). Desarrollo y caracterizacion de un floculante natural a base de semilla de Moringa Oleifera para la reduccion de turbidez en sistemas de captacion de agua pluvial. *Maestria en Ingenieria Quimica, especialidad en Ingenieria de Proyectos.* Benemerita Universidad Autonoma de Puebla, Puebla, Mexico.
- INAA. (30 de Noviembre de 2017). *La Gaceta, Diario Oficial.* Obtenido de La Gaceta, Diario Oficial.
- Lema Mita, K. & Perez Guevara, A. (2021). Evaluación de la capacidad de adsorción de cromo hexavalente en aguas sinteticas mediante el uso de la cascara de naranja (Citrus Sinensis) y cascara de limon (Citrus Limon). *Tesis para la obtencion del titulo en Ingenieria Quimica.* Universidad Central del Ecuador, Quito, Ecuador.
- López Hernández, M. &. (2020). Remoción de cromo hexavalente en aguas contaminadas utilizando cáscara de plátano (Musa paradisiaca) como adsorbente. *Torreón Universitario.*
- Lozano, C. L. (2019). Composicion del aceite de las semillas de Moringa Oleifera y evaluacion de sostenibilidad para su implementacion como cultivo agroforestal en Colombia. *Tesis de Master en tecnologias avanzadas para el desarrollo Agroforestal.* Universidad de Valladolid, Colombia.
- Martinez, F. (2013). Identificacion de contaminantes, prevencion y aprovechamiento de desechos organicos en la produccion de biogas Y biodiesel, en curtidoras y mataderos de la Ciudad de Leon, ubicados en la

- ladera del rio chiquito, septiembre 2012-junio 2013. (*Tesis de Maestria en Energias Renovables y Medio Ambiente*). Universidad Nacional Autonoma de Nicaragua, Leon, Leon.
- Martinez, X. (2021). Adsorción de cromo hexavalente en solución acuosa empleando un compósito organoarcilla-alginato y su potencial aplicacion en un efluente de curtiembre: caso de estudio municipio de Belen-Nariño.
- Molina, N., Aguilar, P. & Cordovez, C. (2010). Plomo, cromo III y cromo VI y sus efectos. *Ciencia & Tecnología para la Salud Visual y Ocular*, 8(01), 77-88.
- Olivarez Soza, N. & Guevara Mendieta, R. (2016). Estudio de la cinética de adsorción y desorción de Mercurio en sistema batch y su remoción en columnas empacadas con quitosano. *Trabajo de Diploma de Ingenieria Quimica*. Universidad Nacional de Ingenieria., Managua.
- Paredes Quispe, M. & Valle Alvarado, M. (2020). Evaluacion de la capacidad de adsorcion de la cascara de limon (citrus limon (L) Burm. F.) para la remocion de cromo (VI) de aguas residuales de la Empresa Textilera Hualhuas. *Tesis de Ingenieria Quimica Industrial*. Universidad Nacional del Centro de Peru., Peru.
- Pique, T. & Vazquez, A. (2012). Uso de espectroscopia infrarroja con transformada de fourier (FTIR) en el estudio de la hidratacion del cemento. *redalyc*, 62-71.
- Riveras, E. & Martinez, R. (2020). Capacidad de adsorcion de cromo en aguas sinteticas y aguas residuales de tenerias en semilla triturada de Moringa Olifera. *Tesis Monografica en Ingenieria Quimica*. Universidad Nacional de Ingenieria, Managua.
- Rodas Quiroz, M. & Ñurinda Tercero, E. (2016). Estudio de adsorcion de cromo hexavalente en columna de lecho fijo con biomasa de tamarindo. *Trabajo de Diploma en Ingenieria Quimica*. Universidad Nacional de Ingenieria, Managua.
- Sanchez Peña, Y., Martinez Avila, G., Sinagawa Garcia, S. & Vazquez Rodriguez, J. (2013). Moringa Olifeira, Importancia, Funcionalidad y Estudios Involucrados. *Revista Cientifica de la Universidad Autonoma de Coahuila*.
- Serrano, M. J. (2022). Espectroscopia Infrarroja. *Posgrado en Ingenieria del agua y el suelo*. Universidad Politecnica de Cartagena, Cartagena.
- Tovar Tejada, C., Villanova Ortiz, A. & Ruiz Paternina, E. (2016). Cinética de adsorción de Cr VI usando biomasas residuales modificadas químicamente en sistemas por lote y continuo. *Revista ION*, Vol. 28(1), 29-41.

ANEXO A

Tablas y Pruebas Experimentales

ANEXO A.1: Equipos, Reactivos y Cristalería usados en los experimentos.

Tabla A.1. Equipos de laboratorio

Equipos	Marca
Horno	-
Balanza analítica	Sartorius-CP2245
Agitador magnético/plancha de calentamiento	Corning pc-420D
Balanza	RADWAG-PS 6000/C/2
Procesador de alimentos	Retsch-GM-200
Espectrómetro de absorción atómica	GBS-AAS-932 Plus
pH-metro	OAKTON pH 510.
tamices	-
Soporte universal	-
Bomba peristáltica	-
Extractor Soxhlet	-
Equipo para análisis de humedad	Sartorius-MA-150
Rotavapor	BUCHI-ROTAVAPOR-R-124

Fuente: fuente propia

Tabla A.2. Reactivos.

Reactivos	Concentración
Cloruro de sodio (NaCl)	-
Cromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$)	-
Estándar de Cromo VI	1000 ppm
Agua destilada	-
Agua desionizada	-
Hidróxido de sodio en lentejas	-
Solución madre de cromo VI	1000 mg/l
Solución de cromo VI a diferentes concentraciones	25, 50, 2.70, 5 mg/l
Hexano	-

Fuente: fuente propia

Tabla A.3. Cristalería y Material de laboratorio.

Cristalería	Capacidad
Beaker	50, 100, 500 y 2000 ml
Erlenmeyer	500 ml
Embudo de filtración	-
probeta	50 ml, 100 ml
picnómetro	50 ml
Balón volumétrico	50,100, 250, 500 y 1000 ml
Mortero de porcelana y mazo	-
Tubos de ensayo	25 ml
Desecador	-
Pipeta graduada	25 ml

Fuente: fuente propia

ANEXO A.2: Ilustraciones de los Equipos y procedimientos utilizados en los experimentos.

Anexo A.2.1: Determinación de la Densidad de Conjunto

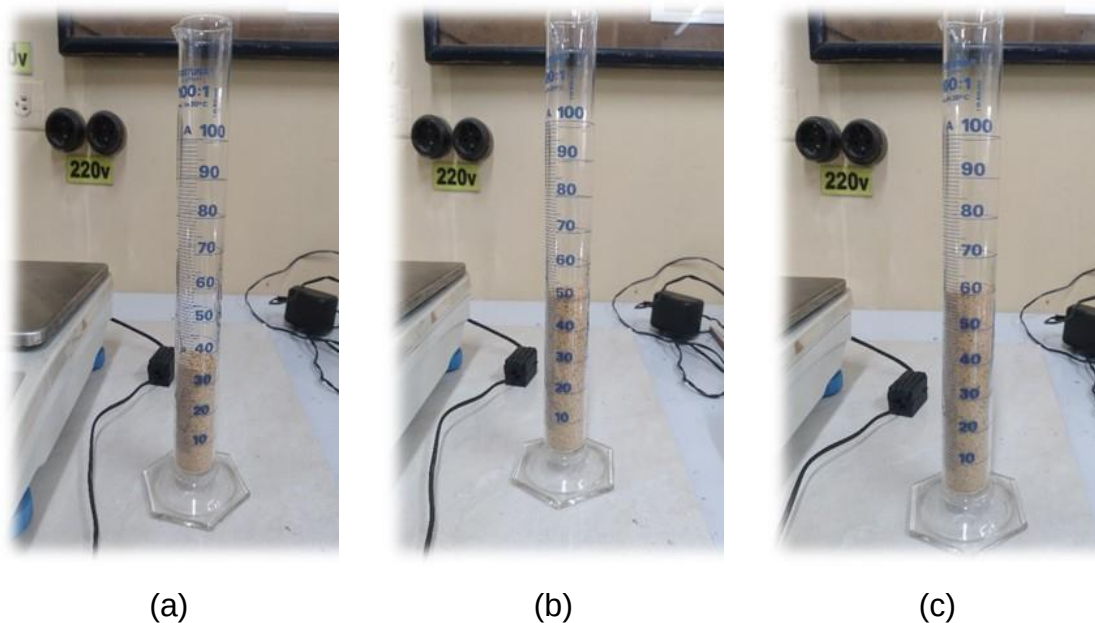


Figura A.1. Determinación de la densidad de conjunto utilizando probetas de 100 ml, con porciones de 35, 50 y 60 ml de semilla triturada de M.O.

Anexo A.2.2: Determinación de la Densidad de Partícula

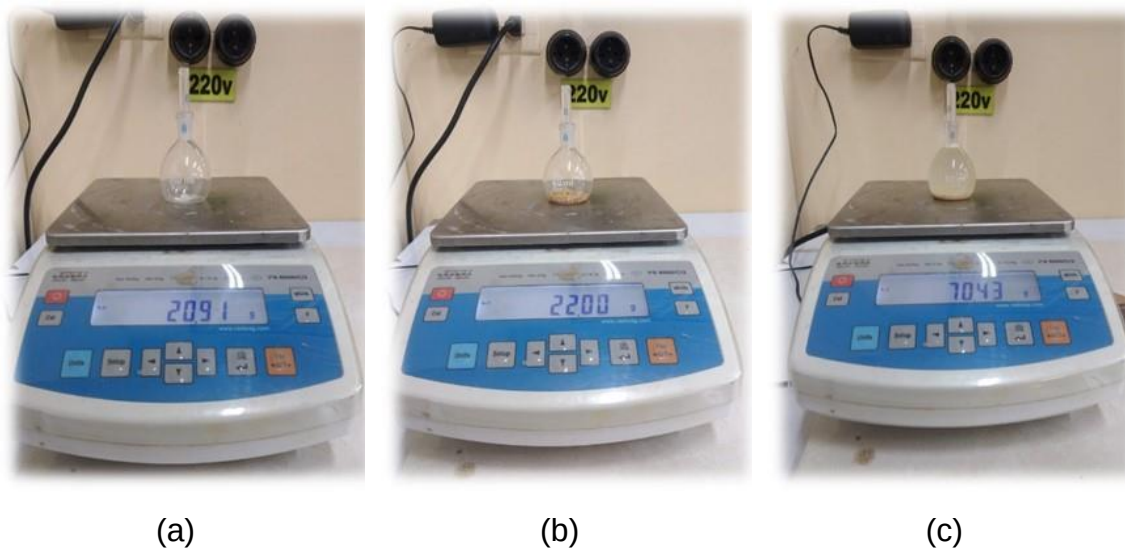


Figura A.2. Determinación de la densidad de partícula por triplicado.

Anexo A.2.3: Determinación de la Cinética y Dinámica de adsorción de cromo VI en semilla de *Moringa oleífera*.



Figura A.3. Preparación de la solución madre de Cr VI



Figura A.4. Elaboración de las soluciones de trabajo, para la cinética de adsorción



Figura A.5. Ajuste de pH



Figura A.6. Toma de muestras para el estudio de la Cinética de Adsorción.



Figura A.7. Preparación de estándares para lectura de Cr VI



Figura A.8. Proceso de adsorción de cromo VI utilizando columnas empacadas con semilla de *Moringa oleífera*.

Anexo A.3: Determinación de Cromo por Espectrometría de Absorción Atómica.

La determinación de las concentraciones de cromo en la solución se realizará en un espectrómetro de absorción atómica marca GBC, modelo AAS-932 Plus.

- **Interferencias.**

Hierro, cobalto, níquel, aluminio y sodio, el cual causan interferencia con la absorbancia del cromo. Estos efectos son removidos por el uso de la llama óxido nitroso-acetileno, para esta parte es mejor oxidar las especies de Cr (III) a Cr (VI) o reducir de Cr (VI) a Cr (III).

- **Apartados y materiales.**

- a) Equipos de adsorción atómica marca GBC, modelo AAS-932 Plus.
- b) Balones volumétricos de 50 ml, que contendrán las muestras a analizar y los estándares.

- **Reactivos.**

- a) Agua desionizada.
- b) 1000 mg/L de Cr VI: solución estándar de Dicromato de potasio.

- **Procedimiento.**

Para cada análisis se deben de cumplir con las condiciones de operación que se presentan a continuación:

elemento	Aluminio
Línea principal	357.9 nm
Sensibilidad mg/L	0.05
Aire/C ₂ H ₂	
Paso de banda	0.2-0.5 nm
Flama	PR: 15 mm
Aire/C ₂ H ₂	Altamente reducida
Corriente de lámpara	6.0 mA

Fuente: fuente propia

ANEXO B

Tablas de Datos Experimentales

Tabla B.1. Resultados de los diferentes pesajes de los conjuntos para análisis Soxhlet.

Materiales	Peso en (g)
Dedal No 1	12.36
Dedal No 2	12.24
Dedal No 1 + algodón	13.59
Dedal No 2 + algodón	14.12
Muestra 1 de semilla triturada	64.96
Muestra 2 de semilla triturada	20.04
Dedal No 1 + algodón + muestra 1	78.55
Dedal No 2 + algodón + muestra 2	34.13
Balón No 1	111.30
Balón No 2	109.31
Matraz + grasa extraída #1	134.95
Matraz + grasa extraída #2	117.58

Fuente: fuente propia

Tabla B.2. Resultados del experimento N°1 del estudio de la Cinética de Adsorción en el ajuste de las ecuaciones de Pseudo-Primer y Pseudo-Segundo. Orden.

Experimento No 1				primer orden		segundo orden
No	Tiempo (min)	Conc. Final (mg/L)	qt (mg/g)	qe-qt	log(qe-qt)	t/qt
1	0	31.75				
2	2	29.38	1.39	3.95	0.60	0.07
3	5	28.97	1.60	3.75	0.57	0.17
4	10	28.28	1.94	3.40	0.53	0.35
5	15	26.45	2.86	2.49	0.40	0.57
6	20	25.61	3.28	2.07	0.31	0.78
7	25	27.12	2.52	2.82	0.45	0.92
8	30	25.16	3.50	1.84	0.27	1.19
9	45	24.73	3.72	1.63	0.21	1.82
10	60	24.24	3.96	1.38	0.14	2.48
11	90	23.12	4.52	0.82	-0.09	3.89
12	120	23.71	4.23	1.12	0.05	5.06
13	180	22.44	4.86	0.48	-0.32	8.02
14	240	22.07	5.05	0.30	-0.53	10.87
15	300	22.26	4.95	0.39	-0.41	13.48
16	360	22.27	4.95	0.40	-0.40	16.17
17	480	21.48	5.34	0.00		22.35

Fuente: fuente propia

Tabla B.3. Resultados del experimento N°2 del estudio de la Cinética de Adsorción en el ajuste de las ecuaciones de Pseudo-Primer y Pseudo-Segundo Orden.

Experimento No 2			Primer Orden		Segundo Orden	
No	Tiempo (min)	Conc. Final (mg/L)	qt (mg/g)	qe-qt	log(qe-qt)	t/qt
1	0	65.65				
2	2	57.09	4.3	11.5	1.06	0.47
3	5	45.98	9.8	5.9	0.77	0.51
4	10	44.08	10.8	5.0	0.70	0.93
5	15	43.46	11.1	4.7	0.67	1.35
6	20	47.57	9.0	6.7	0.83	2.21
7	25	46.85	9.4	6.4	0.80	2.66
8	30	43.25	11.2	4.6	0.66	2.68
9	45	42.06	11.8	4.0	0.60	3.82
10	60	44.06	10.8	5.0	0.70	5.56
11	90	42.92	11.4	4.4	0.64	7.92
12	120	38.53	13.6	2.2	0.34	8.85
13	180	36.62	14.5	1.2	0.10	12.40
14	240	35.72	15.0	0.8	-0.10	16.04
15	300	34.13	15.8	0.0	0.00	19.04
16	360	38.00	13.8	1.9	0.29	26.04
17	480	36.27	14.7	1.1	0.03	32.68

Fuente: fuente propia

Tabla B.4. Resultados del experimento N°3 del estudio de la Cinética de Adsorción en el ajuste de las ecuaciones de Pseudo-Primer y Pseudo-Segundo Orden.

Experimento No 3				Primer Orden		Segundo Orden
No	Tiempo (min)	Conc. Final (mg/L)	qt (mg/g)	qe-qt	log(qe-qt)	t/qt
1	0	32.37				
2	2	31.61	0.15	1.29	0.11	13.16
3	5	30.64	0.35	1.10	0.04	14.45
4	10	29.21	0.63	0.81	-0.09	15.82
5	15	28.31	0.81	0.63	-0.20	18.47
6	20	27.28	1.02	0.43	-0.37	19.65
7	25	29.75	0.52	0.92	-0.04	47.71
8	30	28.3	0.81	0.63	-0.20	36.86
9	45	30.37	0.40	1.05	0.02	112.50
10	60	28.69	0.74	0.71	-0.15	81.52
11	90	27.23	1.03	0.42	-0.38	87.55
12	120	27.06	1.06	0.38	-0.42	112.99
13	180	26.92	1.09	0.36	-0.45	165.14
14	240	25.87	1.30	0.15	-0.84	184.62
15	300	25.35	1.40	0.04	-1.38	213.68
16	360	25.14	1.45	0.00	0.00	248.96
17	480	25.53	1.37	0.08	-1.11	350.88

Fuente: fuente propia

Tabla B.5. Resultados del experimento N°4 del estudio de la Cinética de Adsorción en el ajuste de las ecuaciones de Pseudo-Primer y Pseudo-Segundo Orden.

Experimento No 4				Primer Orden		Segundo Orden
No	Tiempo (min)	Conc. Final (mg/L)	qt (mg/g)	qe-qt	log(qe-qt)	t/qt
1	0	72.88				
2	2	57.74	3.03	1.63	0.21	0.66
3	5	55.25	3.53	1.13	0.05	1.42
4	10	53.19	3.94	0.72	-0.14	2.54
5	15	55.08	3.56	1.10	0.04	4.21
6	20	56.07	3.36	1.30	0.11	5.95
7	25	56.11	3.35	1.30	0.12	7.45
8	30	55.93	3.39	1.27	0.10	8.85
9	45	54.56	3.66	0.99	0.00	12.28
10	60	55.08	3.56	1.10	0.04	16.85
11	90	54.77	3.62	1.04	0.02	24.85
12	120	53.83	3.81	0.85	-0.07	31.50
13	180	50.56	4.46	0.19	-0.71	40.32
14	240	51.39	4.30	0.36	-0.44	55.84
15	300	50.6	4.46	0.20	-0.69	67.32
16	360	50.33	4.51	0.15	-0.83	79.82
17	480	49.59	4.66	0.00		103.05

Fuente: fuente propia

Tabla B.6. Resultados del experimento N°5 del estudio de la Cinética de Adsorción en el ajuste de las ecuaciones de Pseudo-Primer y Pseudo-Segundo Orden.

Experimento No 5				Primer Orden		Segundo Orden
No	Tiempo (min)	Conc. Final (mg/L)	qt (mg/g)	qe-qt	log(qe-qt)	t/qt
1	0	31.22				
2	2	30.45	0.08	0.75	-0.13	25.97
3	5	30.48	0.07	0.75	-0.12	67.57
4	10	30.29	0.09	0.73	-0.13	107.53
5	15	30.23	0.10	0.73	-0.14	151.52
6	20	29.08	0.21	0.61	-0.21	93.46
7	25	28.96	0.23	0.60	-0.22	110.62
8	30	28.35	0.29	0.54	-0.27	104.53
9	45	27.99	0.32	0.50	-0.30	139.32
10	60	27.14	0.41	0.42	-0.38	147.06
11	90	26.48	0.47	0.35	-0.45	189.87
12	120	26.11	0.51	0.32	-0.50	234.83
13	180	25.96	0.53	0.30	-0.52	342.21
14	240	25.26	0.60	0.23	-0.64	402.68
15	300	24.67	0.66	0.17	-0.77	458.02
16	360	23.94	0.73	0.10	-1.01	494.51
17	480	22.96	0.83	0.00		581.11

Fuente: fuente propia

Tabla B.7. Resultados del experimento N°6 del estudio de la Cinética de Adsorción en el ajuste de las ecuaciones de Pseudo-Primer y Pseudo-Segundo Orden.

Experimento No 6				Primer Orden		Segundo Orden
No	Tiempo (min)	Conc. Final (mg/L)	qt (mg/g)	qe-qt	log(qe-qt)	t/qt
1	0	64.25				
2	2	60.47	0.38	2.49	0.40	5.29
3	5	59.22	0.50	2.36	0.37	9.94
4	10	57.84	0.64	2.22	0.35	15.60
5	15	56.94	0.73	2.13	0.33	20.52
6	20	56.84	0.74	2.12	0.33	26.99
7	25	56.31	0.79	2.07	0.32	31.49
8	30	55.97	0.83	2.04	0.31	36.23
9	45	53.5	1.08	1.79	0.25	41.86
10	60	52.62	1.16	1.70	0.23	51.59
11	90	49.22	1.50	1.36	0.13	59.88
12	120	48.22	1.60	1.26	0.10	74.86
13	180	48.03	1.62	1.24	0.09	110.97
14	240	45.64	1.86	1.00	0.00	128.96
15	300	43.55	2.07	0.79	-0.10	144.93
16	360	41.19	2.31	0.56	-0.25	156.11
17	480	35.61	2.86	0.00		167.60

Fuente: fuente propia

Tabla B.8. Resultados del experimento N°1 del estudio de la Dinámica de Adsorción en el ajuste de la curva de adsorción.

No	pH	Tiempo (min)	Conc. Final (mg/L)	C/Co	Vf (L)	BV	C/Co
0	3.71	0	2.601	1.00			
1	3.71	5	1.313	0.50	0.25	3.5	0.50
2	3.71	10	1.410	0.54	0.50	7.0	0.54
3	3.71	15	1.994	0.77	0.75	10.5	0.77
4	3.71	20	2.119	0.81	1.00	14.0	0.81
5	3.71	25	2.196	0.84	1.25	17.5	0.84
6	3.71	30	2.207	0.85	1.50	21.0	0.85
7	3.71	35	2.206	0.85	1.75	24.5	0.85
8	3.71	40	2.261	0.87	2.00	28.0	0.87
9	3.71	45	2.268	0.87	2.25	31.5	0.87
10	3.71	50	2.265	0.87	2.50	35.0	0.87
11	3.71	55	2.324	0.89	2.75	38.5	0.89
12	3.71	60	2.397	0.92	3.00	42.0	0.92
13	3.71	65	2.438	0.94	3.25	45.5	0.94
14	3.71	70	2.324	0.89	3.50	49.0	0.89
15	3.71	75	2.516	0.97	3.75	52.5	0.97
16	3.71	80	2.520	0.97	4.00	56.0	0.97
17	3.71	85	2.522	0.97	4.25	59.5	0.97
18	3.71	90	2.516	0.97	4.50	63.0	0.97
19	4.3	95	2.520	0.97	4.75	66.5	0.97
20	4.3	100	2.522	0.97	5.00	70.0	0.97

Fuente: fuente propia

Tabla B.9. Resultados del experimento N°2 del estudio de la Dinámica de Adsorción en el ajuste de la curva de adsorción.

No	pH	Tiempo (min)	Conc. Final (mg/L)	C/Co	Vf (L)	BV	C/Co
0	3.45	0	2.97	1.00			1.00
1	3.45	5	2.44	0.82	0.71	10.0	0.82
2	3.45	10	2.65	0.89	1.43	20.0	0.89
3	3.45	15	2.69	0.90	2.14	30.0	0.90
4	3.45	20	2.78	0.93	2.86	40.0	0.93
5	3.45	25	2.85	0.96	3.57	50.0	0.96
6	3.45	30	2.86	0.96	4.29	60.0	0.96
7	3.45	35	2.90	0.98	5.00	70.0	0.98
8	3.45	40					
9	3.45	45					
10	4.00	50					

Fuente: fuente propia

Tabla B.10. Resultados del experimento N°3 del estudio de la Dinámica de Adsorción en el ajuste de la curva de adsorción.

No	pH	Tiempo (min)	Conc. Final (mg/L)	C/Co	Vf (L)	BV	C/Co
0	3.57	0	5.93	1.00		0.00	1.00
1	3.57	5	3.28	0.55	0.26	3.7	0.55
2	3.57	10	3.97	0.67	0.53	7.4	0.67
3	3.57	15	3.95	0.67	0.79	11.1	0.67
4	3.57	20	3.97	0.67	1.05	14.7	0.67
5	3.57	25	3.96	0.67	1.32	18.4	0.67
6	3.57	30	4.64	0.78	1.58	22.1	0.78
7	3.57	35	5.06	0.85	1.84	25.8	0.85
8	3.57	40	5.24	0.88	2.11	29.5	0.88
9	3.57	45	5.14	0.87	2.37	33.2	0.87
10	3.57	50	5.21	0.88	2.63	36.8	0.88
11	3.57	55	5.14	0.87	2.89	40.5	0.87
12	3.57	60	5.23	0.88	3.16	44.2	0.88
13	3.57	65	5.21	0.88	3.42	47.9	0.88
14	3.57	70	5.16	0.87	3.68	51.6	0.87
15	3.57	75	5.30	0.89	3.95	55.3	0.89
16	3.57	80	5.42	0.91	4.21	58.9	0.91
17	3.57	85	5.38	0.91	4.47	62.6	0.91
18	3.57	90	5.41	0.91	4.74	66.3	0.91
19	4.29	95	5.42	0.91	5.00	70.0	0.91
20		100					

Fuente: fuente propia

Tabla B.11. Resultados del experimento N°4 del estudio de la Dinámica de Adsorción en el ajuste de la curva de adsorción.

No	pH	Tiempo (min)	Conc. Final (mg/L)	C/Co	Vf (L)	BV	C/Co
0	3.5	0	5.909	1.00			1.00
1	3.5	5	4.037	0.68	0.5	7.0	0.68
2	3.5	10	4.411	0.75	1.0	14.0	0.75
3	3.5	15	4.814	0.81	1.5	21.0	0.81
4	3.5	20	5.157	0.87	2.0	28.0	0.87
5	3.5	25	5.307	0.90	2.5	35.0	0.90
6	3.5	30	5.358	0.91	3.0	42.0	0.91
7	3.5	35	5.406	0.91	3.5	49.0	0.91
8	3.5	40	5.422	0.92	4.0	56.0	0.92
9	3.5	45	5.588	0.95	4.5	63.0	0.95
10	4.1	50	5.575	0.94	5.0	70.0	0.94

Fuente: fuente propia