



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE CIENCIAS

CARRERA INGENIERÍA QUÍMICA

**ADSORCIÓN DE MERCURIO (II) SOBRE CARBÓN ACTIVO
FUNCIONALIZADO EN CONDICIONES ESTACIONARIAS Y
DINÁMICAS**

Trabajo de Integración Curricular

Tipo: Proyecto de Investigación

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERO QUÍMICO

AUTORES: KEVIN RONALDO CHUTO LEMA

BYRON RAÚL GUAMÁN SILVA

DIRECTOR: Dr. FABIÁN ERNESTO ARIAS ARIAS PhD

Riobamba – Ecuador

2023

© 2023, Kevin Ronaldo Chuto Lema & Byron Raúl Guamán Silva

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

Nosotros, Kevin Ronaldo Chuto Lema y Byron Raúl Guamán Silva, declaramos que el presente Trabajo de Integración Curricular es de nuestra autoría y los resultados del mismo son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autores asumimos la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este Trabajo de Integración Curricular; el patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 11 de mayo de 2023



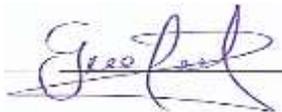
Kevin Ronaldo Chuto Lema
C.I: 060505335-4



Byron Raúl Guamán Silva
C.I: 060625103-1

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
CARRERA INGENIERÍA QUÍMICA

El Tribunal del Trabajo de Integración Curricular certifica que: El Trabajo de Integración Curricular; Tipo: Proyecto de Investigación, “**ADSORCIÓN DE MERCURIO (II) SOBRE CARBÓN ACTIVO FUNCIONALIZADO EN CONDICIONES ESTACIONARIAS Y DINÁMICAS**”, realizado por los señores: **KEVIN RONALDO CHUTO LEMA Y BYRON RAÚL GUAMÁN SILVA**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del Trabajo de Integración Curricular, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

	FIRMA	FECHA
Ing. Gabriela Viviana Tubón Usca PhD PRESIDENTE DEL TRIBUNAL		2023-05-11
Dr. Fabián Ernesto Arias Arias PhD DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR		2023-05-11
Ing. Mayra Paola Zambrano Vinuesa Mgs. ASESORA DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR		2023-05-11

DEDICATORIA

Al culminar la carrera de Ingeniería Química, quiero dedicarle este trabajo a mi padre Guillermo Chuto en el cielo, y a mi madre Carmelina Lema por ser un ejemplo de constancia, esfuerzo y coraje para enfrentar las circunstancias complejas de la vida, a mi madre que siempre ha estado apoyándome incondicionalmente para darme la educación, pero luego de este largo camino que emprendimos juntos, quiero decirles que estoy listo para enfrentarme a la vida primero con la bendición de Dios y luego con la guía de mis padres, y que mediante la voluntad de Dios les dedicaré los días que me quedan por vivir para tratar de honrarles en todo momento y disfrutar la vida como siempre queremos. A mi hermana Alicia Chuto, que a pesar de las circunstancias en las buenas y en las malas me ha apoyado, y hemos estado juntos con un mismo objetivo que es el honrar la memoria de nuestro padre y de nuestra madre. Sepa ella que siempre estaré tratando mejorar y superarme para que se sienta orgullosa de mí. Y así ir juntos por el camino de la victoria en este duro camino llamado vida.

Kevin

El presente trabajo está dedicado a Dios por permitirme cumplir este logro al poder culminar mi carrera profesional y principalmente a mi abuelita María Olga Guilcapi Ramírez que a pesar de no estar presente en este momento conmigo siempre fue y será un ejemplo a seguir ya que sus enseñanzas vivirán siempre en mí, a mis padres Verónica y Raúl que siempre creyeron en mí y fueron ese apoyo incondicional que siempre necesite para salir adelante, a mi hermano Juan a pesar de las dificultades siempre hemos estado unidos en las buenas y las malas, a mi familia, la cual siempre me ha enseñado que a pesar de que la vida nos puede poner pruebas muy duras, siempre podremos salir adelante mientras estemos unidos, que lo imposible siempre puede lograrse si podemos alma, vida y corazón para poder lograrlo y finalmente a mi hermanita que está en camino para alegrar mi vida y poder buscar ser un ejemplo a seguir para ella.

Byron

AGRADECIMIENTO

Agradecemos primeramente a Dios por darnos la oportunidad de vivir la vida que él nos obsequió, también por ser propiciarnos de sabiduría durante este proceso de realizar este proyecto de titulación. A la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo por brindarnos la oportunidad de obtener esta ingeniería, y por inculcarme valores, principios y enseñanzas que forman parte del día a día de su gestión como universidad y de la cultura que transmite a cada uno de los miembros que forman parte de ella. A nuestro director de tesis, Dr. Fabián Arias, a mi asesora, Ing. Mayra Zambrano y al Dr. Mauricio Álvarez, por ser un apoyo y ejemplo de que con constancia y trabajo se pueden conseguir los mejores resultados en la vida. A mis amigos, Graciela Casillas, Mayra Guano, Brithany González, Jennifer Salamea, Génesis Rangel, Iván López y Edwin Valdivieso, que han sido mis compañeros tanto dentro como fuera del aula y han estado batallando junto a mí para conseguir esta meta todos juntos.

Kevin

Agradezco a Dios por brindarme la salud, la sabiduría y la fuerza para poder llegar a cumplir esta meta, culminar la Carrera de Ingeniería Química, siempre buscando poder ayudar a los demás siendo el principal objetivo de un buen profesional. A la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo por ser la institución encargada de formar profesionales y emprendedores que buscan mejorar la calidad de vida de las personas. Al Dr. Fabian Arias nuestro director de tesis por ser aquella persona que nos supo guiar para crear un trabajo de excelencia, a la Ing. Mayra Zambrano y al Dr. Mauricio Álvarez por siempre asesorarnos con el fin de responder dudas y brindarnos pautas para realizar el trabajo a conciencia. A mis amigos Paola Cayambe, Denis Córdova, Jorge Román, Ismael Guamanquispe, Henry Cando, Estiven Bastidas, Robert Fiallos y Juan Guijarro, que siempre estuvieron ahí para salir todos adelante y ser profesionales de calidad. Finalmente, a mi familia por ser una fuente de apoyo e inspiración para cumplir mis sueños y metas.

Byron

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE ABREVIATURAS	xi
ÍNDICE DE TABLAS.....	xiii
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	xv
ÍNDICE DE ECUACIONES	xvii
ÍNDICE DE ANEXOS	xviii
RESUMEN	xix
SUMMARY	xx
INTRODUCCIÓN	1

CAPÍTULO I

1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	4
1.1 Planteamiento del problema.....	4
1.2. Limitaciones y delimitaciones	5
1.3. Problema general de investigación	6
1.4. Problemas específicos de investigación.....	6
1.5. Objetivos.....	6
1.5.1. <i>Objetivo general</i>	6
1.5.2. <i>Objetivos específicos</i>	6
1.6. Justificación.....	7
1.6.1. <i>Justificación teórica</i>	7
1.6.2. <i>Justificación metodológica</i>	7
1.6.3. <i>Justificación práctica</i>	8
1.7. Hipótesis	8

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO	9
2.1. Antecedentes de investigación	9
2.1.1. <i>Mercurio</i>	10
2.1.2. <i>Propiedades químicas del mercurio</i>	11
2.1.3. <i>Usos del mercurio</i>	12
2.1.4. <i>Emisiones de mercurio en la atmósfera</i>	12

2.1.5.	<i>Efectos del mercurio sobre el medio ambiente</i>	13
2.1.6.	<i>Efectos del mercurio en la salud de los seres humanos</i>	14
2.1.7.	<i>Mercurio en el Ecuador</i>	15
2.1.8.	<i>Carbón activo</i>	17
2.1.9.	<i>Estructura del carbón activado</i>	18
2.1.10.	<i>Forma física del carbón activado</i>	19
2.1.11.	<i>Características del carbón activado</i>	20
2.1.12.	<i>Funcionamiento del carbón activado</i>	21
2.1.13.	<i>Materias primas para obtener el carbón activado</i>	21
2.1.14.	<i>Aplicaciones del carbón activado</i>	22
2.1.15.	<i>Capacidad de adsorción del carbón activado</i>	24
2.1.16.	<i>Activación del carbón activado</i>	24
2.1.16.1.	<i>Activación física</i>	25
2.1.16.2.	<i>Activación química</i>	25
2.1.17.	<i>Clasificación de los poros de carbón activado</i>	26
2.1.18.	<i>Tratamiento de aguas con carbón activado</i>	27
2.1.19.	<i>Carbón activado en Ecuador</i>	27
2.1.20.	<i>Técnicas de caracterización óptica de carbón activado</i>	28
2.1.20.1.	<i>Espectroscopia infrarroja (IR)</i>	28
2.1.20.2.	<i>Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)</i>	29
2.1.21.	<i>Adsorción</i>	30
2.1.22.	<i>Isotermas de adsorción</i>	31
2.1.22.1.	<i>Isoterma de Langmuir</i>	31
2.1.22.2.	<i>Isoterma de Freundlich</i>	32
2.1.23.	<i>Capacidad de adsorción</i>	32
2.1.24.	<i>Parámetros que influyen en la adsorción</i>	33
2.1.24.1.	<i>Efecto de la temperatura</i>	33
2.1.24.2.	<i>pH</i>	33
2.1.24.3.	<i>Tiempo de equilibrio</i>	33
2.1.24.4.	<i>Cantidad de adsorbente</i>	33
2.1.25.	<i>Cinética de adsorción</i>	34
2.1.26.	<i>Modelos de cinética de adsorción</i>	34
2.1.26.1.	<i>Modelo de Pseudo Primer Orden</i>	34
2.1.26.2.	<i>Modelo de Pseudo Segundo Orden</i>	35
2.1.27.	<i>Equilibrio de adsorción</i>	35
2.1.28.	<i>Termodinámica de adsorción</i>	36

2.1.28.1. <i>Energía libre de Gibbs</i>	37
2.1.29. <i>Estudios dinámicos de columna</i>	38
2.1.29.1. <i>Estudio continuo de adsorción en lecho fijo</i>	38
2.1.29.2. <i>Adsorción dinámica</i>	39
2.2. Referencias Teóricas	40

CAPÍTULO III

3. MARCO METODOLÓGICO	42
3.1. Enfoque de investigación	42
3.2. Nivel de investigación	42
3.3. Diseño de investigación	42
3.3.1. <i>Pruebas estacionarias</i>	42
3.3.2. <i>Prueba dinámica</i>	44
3.3.3. <i>Según la manipulación o no de la variable independiente</i>	44
3.3.4. <i>Según las intervenciones en el trabajo de campo</i>	45
3.4. Tipo de estudio	45
3.5. Población y planificación, selección y cálculo del tamaño de la muestra	45
3.6. Métodos, técnicas e instrumentos de investigación	45
3.6.1. <i>Prueba de contenido de mercurio</i>	46
3.6.2. <i>Prueba piloto del proceso de funcionalización</i>	46
3.6.3. <i>Prueba de remoción de mercurio de la muestra piloto de funcionalización</i>	46
3.6.4. <i>Preparación y caracterización del carbón activo impregnado con cloruro</i>	47
3.6.4.1. <i>Espectrofotometría de infrarrojo (IR)</i>	47
3.6.4.2. <i>Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)</i>	47
3.6.5. <i>Pruebas estacionarias</i>	48
3.6.5.1. <i>Proceso experimental de la prueba de tiempo de contacto</i>	48
3.6.5.2. <i>Proceso experimental de la prueba de isotermas de adsorción</i>	49
3.6.5.3. <i>Proceso experimental de la prueba del efecto del pH sobre la capacidad de adsorción del carbón activo funcionalizado</i>	49
3.6.5.4. <i>Proceso experimental de la prueba de masa adsorbente</i>	50
3.6.5.5. <i>Proceso experimental de la prueba de punto isoeléctrico</i>	51
3.6.6. <i>Prueba dinámica</i>	51

CAPÍTULO IV

4.	MARCO DE ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	52
4.1.	Prueba de contenido de mercurio (II) en el carbón activado funcionalizado	52
4.2.	Obtención del material adsorbente para la investigación	52
4.3.	Prueba de remoción de mercurio (II) con carbón activado comercial	53
4.4.	Prueba de remoción de mercurio (II) con carbón activado funcionalizado con cloruros	54
4.5.	Análisis infrarrojo del carbón activado comercial	54
4.6.	Análisis infrarrojo del carbón activado funcionalizado con grupos cloruro	55
4.7.	Análisis de Microscopia Electrónica de Barrido (SEM)	57
4.7.1.	<i>Carbón activado comercial</i>	<i>57</i>
4.7.2.	<i>Carbón activado funcionalizado con grupos cloruro</i>	<i>59</i>
4.7.3.	<i>Carbón activado funcionalizado más mercurio (Hg +2)</i>	<i>61</i>
4.8.	Pruebas estacionarias	62
4.8.1.	<i>Prueba estacionaria de tiempo de contacto</i>	<i>62</i>
4.8.1.1.	<i>Prueba a 25 °C de temperatura</i>	<i>62</i>
4.8.1.2.	<i>Prueba a 30 °C de temperatura</i>	<i>63</i>
4.8.1.3.	<i>Prueba a 35 °C de temperatura</i>	<i>65</i>
4.8.1.4.	<i>Cinética de adsorción</i>	<i>66</i>
4.8.2.	<i>Prueba de isothermas de adsorción</i>	<i>70</i>
4.8.2.1.	<i>Isothermas de adsorción a diferentes temperaturas</i>	<i>71</i>
4.8.3.	<i>Prueba estacionaria del efecto del pH sobre la capacidad de adsorción del carbón activado funcionalizado</i>	<i>75</i>
4.8.4.	<i>Prueba estacionaria de masa adsorbente</i>	<i>76</i>
4.8.5.	<i>Prueba estacionaria de punto isoeléctrico de carbón activado funcionalizado</i>	<i>78</i>
4.9.	Prueba dinámica de adsorción de mercurio (II) sobre carbón activado funcionalizado	80
4.9.1.	<i>Prueba dinámica durante 24 horas con un caudal de 7mL/min</i>	<i>80</i>
4.9.2.	<i>Prueba dinámica con diferente caudal</i>	<i>82</i>
 CAPÍTULO V		
5.	MARCO PROPOSITIVO	84
5.1.	Propuesta	84
5.1.1.	<i>Filtros de carbón activado funcionalizado</i>	<i>85</i>
CONCLUSIONES.....		88
RECOMENDACIONES.....		90

GLOSARIO
BIBLIOGRAFÍA
ANEXOS

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

CA	Carbón activado
CAF	Carbón activado funcionalizado
°C	Grados centígrados
Hg	Mercurio
HCl	Ácido clorhídrico
HNO₃	Ácido nítrico
HgO	Óxido de mercurio
Hg(NO₃)₂	Nitrato de mercurio
CuCl₂	Cloruro de cobre
NaOH	Hidróxido de sodio
NaBH₄	Borohidruro de sodio
OMS	Organización Mundial de la Salud
ESPOCH	Escuela Superior Politécnica de Chimborazo
FT / IR	<i>Fourier Transform Infrared Spectroscopy</i> (Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier)
SEM	<i>Scanning Electron Microscope</i> (Microscopia Electrónica de Barrido)
HVAC	<i>Heating – Ventilation – Air conditioning</i> (Calefacción, Ventilación y Aire Acondicionado)
Ppm	Partes por millón
Ppb	Partes por billón
pH	Potencial de Hidrógeno
Kg	Kilogramo
G	Gramo
Mg	Miligramo
µg	Microgramo
L	Litro
mL	Mililitro
mg/mL	Miligramos por mililitro
mg/L	Miligramos por litro
mg/g	Miligramos por gramo
Ce	Concentración al equilibrio
Cm	Centímetro
min	Minutos

H	Horas
S	Segundos
%	Porcentaje
V	Volumen
mV	Milivoltios
% m/v	Porcentaje masa – volumen
g/mL	Gramos por mililitro
g/mol	Gramos por mol
r.p.m.	Revoluciones por minuto
q_e	Capacidad de adsorción

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1:	Limitaciones y delimitaciones presentes en el Proyecto de Investigación.....	5
Tabla 1-2:	Formas en las que se encuentra el mercurio (II) en la naturaleza.....	10
Tabla 2-2:	Propiedades químicas del mercurio (II)	12
Tabla 3-2:	Aplicaciones del mercurio (II)	12
Tabla 4-2:	Causas de la contaminación producida por mercurio liberado a la atmósfera.....	13
Tabla 5-2:	Efectos negativos para la salud de las personas al exponerse a vapores de mercurio	14
Tabla 6-2:	Enfermedades producidas por intoxicación de mercurio.....	15
Tabla 7-2:	Producción minera en el Ecuador	15
Tabla 8-2:	Actividad minera de las provincias del Ecuador	16
Tabla 9-2:	Límites permitidos de acuerdo con la ley ecuatoriana y la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos.....	17
Tabla 10-2:	Formas de producir el carbón activado	19
Tabla 11-2:	Materiales para obtener carbón activado.....	22
Tabla 12-2:	Usos del carbón activado en la vida cotidiana.....	23
Tabla 13-2:	Clasificación de los poros presentes en el carbón activado	26
Tabla 14-2:	Parámetros del carbón activado comercial	27
Tabla 1-3:	Parámetros para la prueba estacionaria de tiempo de contacto.....	42
Tabla 2-3:	Parámetros para la prueba estacionaria de isotermas	43
Tabla 3-3:	Parámetros para la prueba estacionaria de pH.....	43
Tabla 4-3:	Parámetros para la prueba estacionaria de masa adsorbente	43
Tabla 5-3:	Parámetros para la prueba estacionaria de punto isoeléctrico.....	44
Tabla 6-3:	Parámetros para la prueba dinámica.....	44
Tabla 7-3:	Variables de la investigación	44
Tabla 8-3:	Laboratorios de la ESPOCH	45
Tabla 1-4:	Resultados de la prueba de contenido de mercurio (II) del CA comercial.....	52
Tabla 2-4:	Resultados de la prueba de contenido de mercurio (II) del CAF.....	52
Tabla 3-4:	Resultados de la obtención de material adsorbente	53
Tabla 4-4:	Resultados de la prueba de remoción de Hg de la muestra de carbón activado comercial.....	54
Tabla 5-4:	Resultados de la prueba de remoción de Hg de la muestra de carbón activo funcionalizado	54
Tabla 6-4:	Resultados de la prueba de tiempo de contacto a 25 °C	62

Tabla 7-4:	Resultados de la prueba de tiempo de contacto a 30 °C	63
Tabla 8-4:	Resultados de la prueba de tiempo de contacto a 35 °C	65
Tabla 9-4:	Parámetros de modelo cinético pseudo primer orden y pseudo segundo orden a diferentes temperaturas.....	70
Tabla 10-4:	Resultados de la prueba de isothermas de adsorción a diferentes temperaturas	70
Tabla 11-4:	Resultados de la capacidad de adsorción de las isothermas	71
Tabla 12-4:	Parámetros del modelo de adsorción de Langmuir y Freundlich considerando diferentes temperaturas.....	74
Tabla 13-4:	Resultados de la prueba del efecto del pH a diferentes rangos	75
Tabla 14-4:	Resultados de la prueba de masa adsorbente.....	76
Tabla 15-4:	Capacidad de adsorción de la prueba estacionaria de masa adsorbente.....	78
Tabla 16-4:	Resultados de la prueba de punto isoelectrico.....	78
Tabla 17-4:	Resultados de la prueba dinámica a un caudal de 7 mL/min	80
Tabla 18-4:	Resultados de la prueba dinámica a un caudal de 15 mL/min	82

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1-2:	Mercurio.....	11
Ilustración 2-2:	Carbón activado	17
Ilustración 3-2:	Microporos del carbón activo	18
Ilustración 4-2:	Estructura arreglada de las capas de carbón activado	18
Ilustración 5-2:	Forma física del carbón activado	19
Ilustración 6-2:	Tipos de carbón activado en el mercado	20
Ilustración 7-2:	Funcionamiento del carbón activado	21
Ilustración 8-2:	Cáscara de coco para fabricar carbones vegetales	22
Ilustración 9-2:	Tipos de microporos del carbón activado	26
Ilustración 10-2:	Diagrama esquemático del IR.....	29
Ilustración 11-2:	Microscopio Electrónico de Barrido	30
Ilustración 12-2:	Isotermas de adsorción presentes en el equilibrio	36
Ilustración 13-2:	Esquema de la columna de lecho fijo	39
Ilustración 1-4:	Espectro infrarrojo de la muestra de carbón activado comercial.....	55
Ilustración 2-4:	Espectro infrarrojo de la muestra de carbón activado funcionalizado con cloruros	56
Ilustración 3-4:	Análisis SEM de muestras de carbón activado comercial.....	58
Ilustración 4-4:	Análisis SEM de muestras de carbón activado funcionalizado	60
Ilustración 5-4:	Análisis SEM de muestras de carbón activado funcionalizado con mercurio	61
Ilustración 6-4:	Concentración vs Tiempo a 25 °C.....	63
Ilustración 7-4:	Concentración vs Tiempo a 30 °C.....	64
Ilustración 8-4:	Concentración vs Tiempo a 30 °C.....	65
Ilustración 9-4:	Cinética de adsorción de pseudo primer orden de mercurio (II) sobre carbón activo funcionalizado en función del tiempo de contacto a 25 °C.....	66
Ilustración 10-4:	Cinética de adsorción de pseudo segundo orden de mercurio (II) sobre carbón activo funcionalizado en función del tiempo de contacto a 25 °C.....	67
Ilustración 11-4:	Cinética de adsorción de pseudo primer orden de mercurio (II) sobre carbón activo funcionalizado en función del tiempo de contacto a 30 °C.....	67
Ilustración 12-4:	Cinética de adsorción de pseudo segundo orden de mercurio (II) sobre carbón activo funcionalizado en función del tiempo de contacto a 30 °C.....	68
Ilustración 13-4:	Cinética de adsorción de pseudo primer orden de mercurio (II) sobre carbón activo funcionalizado en función del tiempo de contacto a 35 °C.....	68

Ilustración 14-4:	Cinética de adsorción de pseudo segundo orden de mercurio (II) sobre carbón activo funcionalizado en función del tiempo de contacto a 35 °C.....	69
Ilustración 15-4:	Isoterma de adsorción de mercurio (II) sobre carbón activo funcionalizado a 25 °C según el modelo de Freundlich	71
Ilustración 16-4:	Isoterma de adsorción de mercurio (II) sobre carbón activo funcionalizado a 25 °C según el modelo de Langmuir.....	72
Ilustración 17-4:	Isoterma de adsorción de mercurio (II) sobre carbón activo funcionalizado a 30 °C según el modelo de Freundlich	72
Ilustración 18-4:	Isoterma de adsorción de mercurio (II) sobre carbón activo funcionalizado a 30 °C según el modelo de Langmuir.....	73
Ilustración 19-4:	Isoterma de adsorción de mercurio (II) sobre carbón activo funcionalizado a 35 °C según el modelo de Freundlich	73
Ilustración 20-4:	Isoterma de adsorción de mercurio (II) sobre carbón activo funcionalizado a 35 °C según el modelo de Langmuir.....	74
Ilustración 21-4:	Adsorción de mercurio (II) sobre carbón activo funcionalizado en función del pH ($C_0 = 776.23$ ppb, masa = 0.2 g, V = 10 mL)	75
Ilustración 22-4:	Concentración vs masa adsorbente	77
Ilustración 23-4:	Efecto de la concentración inicial sobre el proceso de adsorción (V = 40 mL, $C_0 = 445.57$ ppb).....	77
Ilustración 24-4:	Potencial eléctrico vs pH.....	79
Ilustración 25-4:	Prueba dinámica con un caudal de 7 mL/min	81
Ilustración 26-4:	Prueba dinámica con un caudal de 15 mL/min	83
Ilustración 1-5:	Diseño del filtro de carbón activado funcionalizado propuesto.....	84
Ilustración 2-5:	Estructura microporosa de los filtros de carbón activado.	85
Ilustración 3-5:	Filtro de carbón activado utilizado para purificar agua de consumo humano	86
Ilustración 4-5:	Composición de un filtro comercial de carbón activado.....	86

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1-2:	Isoterma de Langmuir.....	31
Ecuación 2-2:	Ecuación lineal de la Isoterma de Langmuir.....	31
Ecuación 3-2:	Isoterma de Freundlich.....	32
Ecuación 4-2:	Ecuación lineal de la Isoterma de Freundlich.....	32
Ecuación 5-2:	Capacidad de adsorción.....	32
Ecuación 6-2:	Ecuación lineal del modelo de pseudo primer orden.....	34
Ecuación 7-2:	Ecuación lineal del modelo de pseudo segundo orden.....	35
Ecuación 8-2:	Ecuación del coeficiente de distribución.....	36
Ecuación 9-2:	Parámetros termodinámicos.....	36
Ecuación 10-2:	Energía libre de Gibbs.....	37
Ecuación 11-2:	Cálculo de la energía libre de Gibbs.....	38
Ecuación 12-2:	Modelo de Bohart y Adams.....	40
Ecuación 1-4:	Aplicación de la ecuación cinética de pseudo primer orden.....	69
Ecuación 2-4:	Aplicación de la ecuación cinética de pseudo segundo orden.....	69

ÍNDICE DE ANEXOS

- ANEXO A:** MATERIA PRIMA DE LA INVESTIGACIÓN
- ANEXO B:** MATERIALES UTILIZADOS EN LA INVESTIGACIÓN
- ANEXO C:** REACTIVOS UTILIZADOS EN LA INVESTIGACIÓN
- ANEXO D:** EQUIPOS UTILIZADOS EN LA INVESTIGACIÓN
- ANEXO E:** PRUEBA PILOTO DE FUNCIONALIZACIÓN DE CARBÓN ACTIVADO
- ANEXO F:** PROCESO DE FUNCIONALIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA
- ANEXO G:** PRUEBAS ESTACIONARIAS
- ANEXO H:** PRUEBAS DINÁMICAS Y ANÁLISIS
- ANEXO I:** RESULTADOS DE LA CINÉTICA DE ADSORCIÓN DE LA PRUEBA DE TIEMPO DE CONTACTO
- ANEXO J:** RESULTADOS DE LA PRUEBA ESTACIONARIA DE LAS ISOTERMAS DE ADSORCIÓN
- ANEXO K:** RESULTADOS DE LA CAPACIDAD DE ADSORCIÓN DE LA PRUEBA DE PH
- ANEXO L:** RESULTADOS DE LA CAPACIDAD DE ADSORCIÓN DE LA PRUEBA DE MASA ADSORBENTE
- ANEXO M:** RESULTADOS DE LA CAPACIDAD DE ADSORCIÓN DE LAS PRUEBAS DINÁMICAS

RESUMEN

El presente trabajo de investigación tuvo como objetivo el estudio dinámico y estacionario de remoción de mercurio mediante adsorción con carbón activado funcionalizado (CAF), inicialmente se lavó el carbón activo con HCl (37%) y agua destilada, luego se funcionaliza con una solución de CuCl_2 al 12% (m/V), posteriormente se caracterizó la composición y superficie del CAF mediante análisis IR y SEM; la adsorción de Hg^{+2} se analizó mediante pruebas estacionarias determinando: Tiempo de contacto a tres diferentes temperaturas y concentración constante, el análisis de isotermas se realizó a 25°C, 30°C y 35°C a masa constante y siete diferentes concentraciones de Hg^{+2} , el efecto de pH se realizó en un rango de 2-11 a masa de CAF y concentración de Hg^{+2} constantes, el punto isoelectrico se realizó con masa de CAF constante NaOH y HCl (0.1N), el efecto de la masa adsorbente se realizó en un rango de 0.3 – 1.25g de CAF a concentraciones de mercurio constante, las pruebas dinámicas en columna se realizó a diferentes caudales 7mL/min – 15mL/min y con una masa de 100g de CAF. Mediante los modelos de cinética de adsorción se determinó su capacidad máxima de adsorción 0.1317 mg Hg^{+2} /g CAF a 30°C con un tiempo de contacto de 240 minutos, a un pH=6 se observa la adsorción más eficiente, y su punto isoelectrico a pH=9, el aumento de la masa del CAF es directamente proporcional a la capacidad de adsorción y finalmente en las pruebas dinámicas se constató que el CAF no se saturó a las condiciones experimentadas, ya que su capacidad de adsorción luego de los tiempos establecidos era muy alta. Por las pruebas realizadas se concluye que el CAF es un buen adsorbente, por lo cual se recomienda emplearlo para los procesos de adsorción de Hg^{+2} en aguas contaminadas.

Palabras clave: <ADSORCIÓN>, <FUNCIONALIZACIÓN>, <CARBÓN ACTIVO>, <MERCURIO>, <ISOTERMAS>, <TIEMPO DE CONTACTO>, <DINÁMICA>, <CINÉTICA DE ADSORCIÓN>.

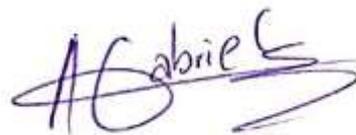


1201-DBRA-UPT-2023

SUMMARY

The objective of the present research work consisted of a dynamic and stationary study of mercury removal by adsorption with functionalized activated carbon (CAF). Initially the activated carbon was washed with HCl (37%) and distilled water, then it is functionalized with a solution of CuCl_2 at 12% (m/V), subsequently the composition and surface of the CAF was characterized by IR and SEM analysis; the adsorption of Hg^{+2} was analyzed by stationary tests determining: contact time at three different temperatures and constant concentration; the isotherm analysis was performed at 25°C, 30°C and 35°C at constant mass and seven different Hg^{+2} concentrations; the pH effect was performed in a range of 2-11 at constant CAF mass and Hg^{+2} concentration; the isoelectric point was performed with constant CAF mass NaOH and HCl (0.1N); the adsorbent mass effect was carried out in the range of 0.3 - 1.25g CAF at constant mercury concentrations. Dynamic column tests were conducted at different flow rates i.e. 7mL/min - 15mL/min and with a mass of 100g CAF. Using adsorption kinetics models, the maximum adsorption capacity was determined to be 0.1317 mg Hg^{+2} /g CAF at 30°C with a contact time of 240 minutes; the most efficient adsorption is observed at pH=6, and its isoelectric point at pH=9, the increase of the CAF mass is directly proportional to the adsorption capacity and finally, it was found that the CAF was not saturated at the conditions experienced in the dynamic tests, since its adsorption capacity after the established times was very high. From the tests carried out, it is concluded that CAF is a good adsorbent, so it is recommended to use it for Hg^{+2} adsorption processes in contaminated waters.

Keywords: <ADSORPTION>, <FUNCTIONALIZATION>, <ACTIVE CARBON>, <MERCURY>, <ISOTHERMALIZATION>, <CONTACT TIME>, <DYNAMICS>, <ADSORPTION KINETICS>.



Abg. Ana Gabriela Reinoso. Mgs.

C.I: 1103696132

INTRODUCCIÓN

El mercurio es un metal que puede encontrarse en la naturaleza ya sea de manera natural o a causa de las actividades del hombre, este metal pesado es perjudicial para la salud de las personas u organismos vivos que entren en contacto directo con este metal, las causas principales por las cuales se contaminan el agua en Ecuador es por la mala intervención o la no intervención en el tratamiento de aguas que son desechadas por actividades mineras ya sean grandes o pequeñas, las mismas que son descargadas al medio ambiente sin ningún tratamiento que reduzca la cantidad de concentración de mercurio que se encuentran en las aguas que son ocupadas en actividades mineras, causando de esa manera perjuicios en la salud de las personas y los organismos vivos que a su paso también son afectados por este metal, el mercurio en el mundo es considerado peligroso desde el año 1557.

El mercurio como tal es perjudicial y tóxico la misma que causa efectos negativos a la población que consuma este tipo de aguas contaminadas, por lo cual se ha buscado distintos tipos de tratamientos de aguas para reducir la concentración de metales pesados, las mismas que dependiendo los productos que se usan para reducir la concentración de contaminantes pueden llegar a ser muy costosas, por tal motivo se realiza la disminución de metales pesados en el agua de manera más económica posible, en este caso utilizando el carbón activado funcionalizado con grupo cloruros que funcionará como un adsorbente de mercurio, los estándares de mercurio que se ocupan en este caso son preparados en el laboratorio, previa a las pruebas de adsorción sometidas con el fin de reducir la concentración de mercurio y también contrarrestar los efectos adversos que pueden generar el consumo de aguas contaminadas con mercurio.

Este trabajo de investigación es una alternativa para poder disminuir la concentración de mercurio en aguas contaminadas, en este caso se hicieron estándares de mercurio en el laboratorio con propósitos de pruebas de adsorción estacionarias y dinámicas, mediante esta prueba de adsorción, el mercurio que se va a encontrar en el agua será transferido a la superficie del carbón activo funcionalizado.

Lo primero que se efectuó es la funcionalización del carbón activado, previo a la funcionalización de carbón activo se realiza un proceso de lavado con ácido clorhídrico concentrado (37%), usando 5 mL de ácido clorhídrico por cada gramo de carbón activado y luego un lavado con agua destilada, posteriormente se somete al proceso de funcionalización con cloruro de cobre a una solución del 12% (m/v), en esta investigación, se emplearon 5 L de esta solución de ácido clorhídrico por un kilogramo de carbón activado, además, de usar 1.2 kilogramos de cloruro de

cobre para la funcionalización, esto con el fin de modificar las características adsorbentes de carbón activo.

Posterior a esto se ejecutó las pruebas piloto de adsorción para comparar la adsorción de mercurio del carbón activo y del carbón activo funcionalizado, usando estándares de mercurio ((100, 500 y 1000) ppb) con carbón activo funcionalizado y no funcionalizado (0.1 gramos). A continuación, se realizó las pruebas estacionarias de adsorción con estándares de mercurio preparadas en el laboratorio con carbón activo funcionalizado, tomando en cuentas las siguientes pruebas:

- **Prueba estacionaria de tiempo de contacto:** Se preparó un estándar de mercurio de 250 mL a 500 ppb con 1 gramo de carbón activado funcionalizado a tres diferentes temperaturas (25 °C, 30 °C y 35 °C) con agitación constante a 150 r.p.m., de las mismas que se tomó alícuotas de 1 mL a diferentes tiempos ((0.5, 2, 5, 10, 20, 40, 60, 80, 100, 120, 150, 180 y 240) min) para posteriormente aforar a 10 mL en tubos falcon de 15 mL y se hizo las pruebas de adsorción en el generador de hidruros.
- **Prueba estacionaria de isoterma:** Se preparó estándares de mercurio de 40 mL a diferentes concentraciones ((0.1, 0.25, 0.5, 0.75, 1, 1.5 y 2) ppm), cabe mencionar que estas concentraciones de mercurio son proporcionales a las concentraciones descritas en la metodología de esta prueba, con 0.2 g de carbón activo funcionalizado con agitación constante a 150 r.p.m. durante 4 horas, de las mismas que se tomó alícuotas de 1 mL para posteriormente aforar a 10 mL en tubos falcon de 15 mL y se realizó las pruebas de adsorción.
- **Prueba estacionaria de pH:** Se preparó 9 muestras de mercurio de 10 mL cada una, con una concentración de 1 ppm, después se procedió a leer el pH de cada una de ellas, posteriormente se añadió a cada una de las muestras una cantidad de 0.2 g de carbón activo funcionalizado, para las muestras que requerían un pH más ácido se añadió gotas de una solución 0.1 M de HCl, en cambio, para las muestras que necesitaban un pH más básico se procedió a añadir gotas de una solución de 0.1 N de NaOH hasta alcanzar los rangos de pH necesarios, al tener el pH necesario se procedió a agitar durante 4 horas, luego se tomaron alícuotas de 1 mL en tubos falcon de 15 mL y finalmente se las procedió a leer en el generador de hidruros para determinar la cantidad mercurio restante.
- **Prueba estacionaria de masa adsorbente:** Se preparó estándares de mercurio de 40 mL en tubos falcon de 50 mL a 500 ppb a diferentes masas de carbón activo funcionalizado ((0.3, 0.5, 0.8, 1 y 1.25) g) con agitación constante a 150 r.p.m. durante 4 horas, de las mismas que se tomó alícuotas de 1 mL para posteriormente aforar a 10 mL en tubos falcon de 15 mL y se realizó las pruebas de adsorción.

- **Prueba estacionaria de punto isoelectrico:** Se preparó HCl a 0.1 M y NaOH a 0.1 N y se preparó 50 mL de agua destilada con 0.5 g de carbón activo funcionalizado, a esta solución se la colocó en agitación durante 2 horas, después a la misma que se le ajustó el pH entre un rango de 2 y 11, adicionando HCl para reducir el pH y NaOH para subir el pH, posterior a esto se midió el potencial eléctrico de material adsorbente usando el pH-metro con el electrodo de potencial, esto se midió en milivoltios.

Y finalmente se realizó las pruebas dinámicas de adsorción para la cual se preparó en la torre de adsorción donde se ubicó secuencialmente canicas, papel adsorbente y carbón activo funcionalizado en forma de sándwich, cabe mencionar que para estas pruebas se utilizó 100 gramos de carbón activado funcionalizado para cada uno de los caudales, también se preparó un estándar de mercurio de 10 litros a 1000 ppb, la misma que con la ayuda de una bomba peristáltica regulamos los caudales de 7 mL/min y 15 mL/min que pasará por la torre de destilación, finalmente recogemos muestras en los tiempos indicados y procedemos a realizar la lectura de las concentraciones de las muestras tomadas en diferentes tiempos.

CAPÍTULO I

1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1 Planteamiento del problema

En la actualidad el gran problema de contaminación ambiental es de gran relevancia y por aquello buscar soluciones a esto se ha vuelto de gran interés. La contaminación de las aguas por mercurio (II), generadas por la naturaleza o por procesos industriales, al día de hoy es un problema ambiental muy preocupante debido a su alta toxicidad, además, la Organización Mundial de la Salud (OMS) considera al mercurio como un contaminante muy peligroso que al contacto con el agua, puede conllevar a serios problemas a la dinámica poblacional de las especies acuáticas, alterando de forma irreversible la función correcta que debe seguir un ecosistema (Posada y Arroyave, 2006, p.58).

A nivel mundial, el mercurio, es un contaminante ambiental muy tóxico, siendo las principales fuentes de contaminación de este elemento las actividades humanas como la minería. Al ser el mercurio liberado en el medio, este puede evaporarse y desplazarse por corrientes de aire para volver a caer al suelo, así también, al entrar en contacto con el agua, los microorganismos que allí habitan lo transforman en metilmercurio, un compuesto tóxico a dosis más bajas que las del mercurio elemental. Cuando el metilmercurio empieza a formar parte de las cadenas alimenticias de cada uno de los ambientes, este se magnifica, es decir que asciende dentro de la cadena. Si el mercurio entra en contacto con el agua, no solamente se dan procesos de contaminación en pequeños organismos, sino también en los peces de que ellos se alimentan, de igual forma ocurre con aves y mamíferos que se alimentan de los peces ya contaminados. El ser humano por ingerir a animales infectados, estos pueden sufrir afecciones de salud y, en el caso de mujeres embarazadas podría incluso traspasar al feto en desarrollo (Weinberg, 2010, p.9).

Se sabe que la exposición al mercurio se ha aumentado en los últimos años, es por ello que los gobiernos han buscado implementar medidas preventivas con respecto a las actividades industriales y actividades humanas que liberan el elemento al medio, razón por la cual, en el año 2009, se acordó iniciar negociaciones intergubernamentales con el fin de preparar un convenio mundial, donde se vincularía de forma jurídica el control de emisión de mercurio (Weinberg, 2010, p.9).

Ecuador es uno de los principales países que se encuentran en la lista de los países afectados por la minería ilegal, debido a que, al pertenecer a la región sudamericana, Ecuador es un país propenso a padecer de minería artesanal por su zona geográfica rica en una gran variedad de metales, en donde se destacan las minas de oro, en las cuales el mercurio es uno de los reactivos químicos más utilizados para la extracción de este metal y cuyo impacto ambiental es muy grave, además de producir efectos dañinos en la salud del personal de minería y extracción (Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica., 2022, p.1). El mercurio puede viajar largas distancia por medio de los ríos e incluso ser consumida por personas aledañas a las minas de extracción, lo que genera efectos devastadores en la salud de los mismos, cabe recalcar que en Ecuador la minería ilegal puede generar emisiones de mercurio de aproximadamente 29 toneladas al año, la zonas más afectadas son la provincia del Oro, Zamora, Napo donde la minería artesanal no controlada está contaminando nuestro ecosistema (Instituto de Investigación Geológico y Energético, 2022, p.1).

1.2. Limitaciones y delimitaciones

Para nuestro proyecto de investigación se presentan muchos factores externos e internos que afectaron el rumbo de la investigación e incluso los resultados obtenidos, por lo tanto, es importante mencionar cuáles son estos factores por medio de la siguiente tabla:

Tabla 1-1: Limitaciones y delimitaciones presentes en el Proyecto de Investigación

Limitaciones	Delimitaciones
El uso de los reactivos, como el ácido clorhídrico o ácido nítrico, es un factor limitante muy importante, debido a que al ser un reactivo controlado no se puede tener fácil acceso al mismo, lo que retrasa la investigación hasta poder conseguirlo.	Para nuestro estudio se requerían cantidades altas de ácido clorhídrico, por lo cual se optó por conseguir una cantidad mínima con la cual poder trabajar y también se optó por la reutilización del mismo en el proceso de funcionalización del material adsorbente.
Para el estudio del análisis SEM no se utilizó el equipo disponible en la Facultad de Mecánica de la ESPOCH, debido a que estaba en mantenimiento y no había operadores a cargo de este, lo que retraso el cronograma propuesto para la realización del proyecto.	Para el análisis SEM se procedió a escoger la opción de encontrar otra universidad que posea el equipo para poder optar por dicho servicio, siendo la UTA el lugar donde se pudo realizar las pruebas o análisis SEM.
De igual manera, el uso del reactivo hidróxido de sodio, debido a que se presentó una escasez de este reactivo en toda la Facultad de Ciencias, por lo que se perdió más tiempo para llevar a cabo las pruebas de adsorción de mercurio.	Para poder hacer las pruebas que requerían el uso del hidróxido de sodio, se optó por buscar el reactivo en todos los laboratorios de la Facultad de Ciencias o por el resto de las facultades de la ESPOCH.

<p>El uso de los estándares de mercurio, al ser el principal reactivo en el que se basaba la investigación, se requerían cantidades considerables para las pruebas estacionarias y dinámicas.</p>	<p>Para esto se decidió que si se necesitaban cantidades grandes de mercurio se realizaría una reducción de concentraciones para poder trabajar con el estándar de mercurio o incluso buscar el uso de un sustituto como el óxido de mercurio.</p>
<p>Para el análisis de las cantidades de mercurio que tenían las muestras se utilizaba el generador de hidruros, sin embargo, al ser un equipo de la Facultad de Ciencias, muchas personas lo utilizaban para investigaciones y tesis, lo que a veces provocaba fallas en el equipo por obstrucciones de mangueras o rupturas de estas, lo que afectaba al cronograma de actividades retrasando nuestras pruebas.</p>	<p>Para poder realizar estas pruebas se coordinaba con el técnico docente encargado del laboratorio para utilizar el equipo correspondiente, designando que días utilizar para que no haya choque en los horarios de uso del equipo.</p>

Realizado por: Chuto K., Guamán B., 2023.

1.3. Problema general de investigación

¿Cómo se adsorbe el mercurio (II) sobre el carbón activo funcionalizado en condiciones estacionarias y dinámicas?

1.4. Problemas específicos de investigación

- ¿Cómo se funcionaliza el carbón activo mediante procesos químicos?
- ¿Qué métodos se emplea para adsorber el mercurio (II) de acuíferos contaminados?
- ¿Cuál es la capacidad de adsorción del material adsorbente en condiciones estacionarias?
- ¿Cuáles son los parámetros dinámicos de adsorción de mercurio (II) sobre carbón activo funcionalizado?

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo general

Adsorber mercurio (II) sobre carbón activo funcionalizado en condiciones estacionarias y dinámicas.

1.5.2. Objetivos específicos

- Funcionalizar el carbón activo mediante procesos químicos.

- Caracterizar el material funcionalizado a través de métodos espectroscópicos.
- Determinar la capacidad de adsorción del material adsorbente en condiciones estacionarias.
- Establecer los parámetros dinámicos de adsorción de mercurio (II) sobre carbón activo funcionalizado.

1.6. Justificación

1.6.1. Justificación teórica

Ante la problemática de la contaminación de aguas con mercurio (II), así como las consecuencias perjudiciales e irreparables hacia el ecosistema, podemos relacionar que el tema propuesto es una forma viable de remediar el problema. El presente proyecto surge de la necesidad de reducir la presencia de mercurio en el agua haciendo énfasis al acuerdo de 140 países en el mismo que Ecuador también se propone de disminuir las emisiones de mercurio para la cual para su regulación es asignado al Ministerio del Ambiente (MAE), mediante adsorción en condiciones estáticas y dinámicas empleando carbón activo funcionalizado, este material es importante para este proceso, ya que tiene un bajo costo y también porque se lo estudia con respecto a la eficacia del mismo, debido a su elevada superficie específica, propia de sus microporos y mesoporos. La adsorción con esta nanopartícula pertenece a un método fisicoquímico que nos ayuda a eliminar contaminantes como el mercurio esencialmente del agua (Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica., 2022, p.1).

El proyecto es importante ya que muestra un método de eliminación de mercurio amigable con el medio ambiente, con el cual se quiere aportar con una solución viable para disminuir la contaminación producida por el mercurio (II) que afecta a la salud de las personas que lo manipulan sin ningún tipo de protección, así también se busca determinar la eficiencia de adsorción del mercurio empleando un adsorbente ecológico como el carbón activo funcionalizado, el mismo que será de gran ayuda para determinar la eficiencia en el proceso de adsorción del metal pesado (Ministerio del Ambiente, 2016, p.26; Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica., 2022, p.1).

1.6.2. Justificación metodológica

La metodología empleada para la realización de este trabajo investigativo está basada fundamentalmente en el método de adsorción dinámico y estacionario, tomando en cuenta estas dos condiciones se procederá a realizar las distintas pruebas de adsorción mediante carbón

activado funcionalizado con grupos cloruro para garantizar el mejoramiento de la eficiencia de la reacción.

1.6.3. Justificación práctica

La presente investigación tiene mayor relevancia en la disminución de contaminantes, en este caso es eliminar el mercurio (II) de las aguas que son contaminadas alrededor del mundo, mediante este método de adsorción dinámica y estacionaria, se pretende mejorar la calidad del agua mediante los métodos de adsorción, disminuyendo el contaminante que se presente en ellas, trayendo consigo un beneficio hacia el medio ambiente, ya que estos contaminantes pueden afectar al bienestar de cualquier ser vivo que entre en contacto directo con las aguas contaminadas por mercurio (II) (Weinberg, 2010, p.9).

Además, el Ministerio de Medio Ambiente en Ecuador junto con 140 países se han propuesto en realizar proyectos que busquen disminuir la cantidad de contaminantes por mercurio (II) en aguas que hayan resultado afectadas (Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica., 2022, p.1).

1.7. Hipótesis

El carbón activado funcionalizado por métodos químicos mejora las condiciones de adsorción de mercurio (II) en soluciones acuosas.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de investigación

La alta toxicidad del mercurio ya fue conocida desde la época romana y la del antiguo oriente, sin embargo, en los siglos XVIII y XIX fue donde se empezaron a evidenciar los primeros casos de intoxicación por este metal nocivo. Debido a esto el uso del mercurio se empezó a restringir y controlar de una manera más rigurosa, pero el uso de este metal y sus derivados se siguen utilizando hasta la actualidad en muchos objetos cotidianos como termómetros, productos dentales, lámparas fluorescentes y ultravioletas, productos farmacéuticos, aguas de procesos industriales, entre otras (Carro de Diego, 2012, pp.17–18).

Entre los episodios más terribles por la contaminación de mercurio se presenta en la bahía de Minamata en Japón, en donde entre los años de 1953 a 1960 se registraron 11 casos por envenenamiento por este metal, teniendo como consecuencia el fallecimiento de 43 personas por el consumo de pescado que se obtuvieron en la bahía. La contaminación se desato por fluidos vertidos en la bahía por parte de una planta química, la contaminación llego a tal punto en el que mujeres en estado gestación salieron afectadas por consumir esos pescados y como resultados sus bebes también sufrieron las consecuencias del envenenamiento. Otro lamentable caso de contaminación por mercurio sucedió en Iraq en el año 1972, en donde las personas consumieron granos envenados con mercurio orgánico, debido a que para cuidar el grano se le aplicaron fungicidas que tenían mercurio orgánico (Carro de Diego, 2012, p.19).

El mercurio es uno de los elementos más peligroso y debido a su concentración en el ambiente, se convertido en la causa de que muchos seres vivos sean intoxicados, además de generar efectos negativos como degradar al ADN, también es el encargado de afectar el sistema nervioso central, generando así muchas deficiencias en este sistema fundamental de seres vivos. Sin embargo, una de las principales causas de contaminación de acuíferos por medio de mercurio, se debe a la utilización de minería a cielo abierto y subterráneo, debido a que esta industria genera drenajes de forma natural en el suelo, sin embargo, la minería ha contribuido a que estos posean pH bajos, además de altas cantidades de sulfatos y metales pesados, cuya composición dependerá mucho de los depósitos minerales que se hayan originado al transcurrir de los años (Rojas et al., 2012, p.22).

El mercurio en medios acuáticos puede presentarse de tres formas: la primera es en forma de mercurio elemental, la segunda forma es en mercurio inorgánico y la última forma en que se presenta es como ion divalente, además que este puede estar hidratado o formando un compuesto complejo junto a cloruros, sulfuros, hidróxidos o con material orgánico disuelto, también se puede presentar como mercurio orgánico el cual va a estar compuesto principalmente como monometil mercurio la cual se conoce por ser la especie más nociva para la salud de las personas, su alta toxicidad se relaciona con una elevada biomagnificación por medio de una cadena alimentaria y por su gran liposolubilidad (Carro de Diego, 2012, p.10).

La adsorción de mercurio metálico por medio de la ingestión es terrible, en las personas al ingerir este metal accidentalmente, como consecuencia los niveles de mercurio en la sangre se van a elevar, pero en ciertos casos estas dosis son capaces de causar enfermedades clínicas. En síntesis, las sales de mercurio (II) son adsorbidas poco en el organismo, en cambio las sales de mercurio (I) son adsorbidas muy poco en comparación con las sales de mercurio (II), en cambio el mercurio de origen orgánico se adsorbe rápidamente por nuestro organismo llegando a tener 95% de adsorción (Carro de Diego, 2012, p.18).

2.1.1. Mercurio

Se conoce que es un elemento de origen natural que se encuentra distribuido por la corteza terrestre o podemos hallarlo unido a depósitos de carbón natural. Este metal en la tabla periódica está representado por el símbolo “Hg”, este metal existe en diversas formas en la naturaleza:

Tabla 1-2: Formas en las que se encuentra el mercurio (II) en la naturaleza

Forma	Descripción
Metilmercurio y otros compuestos orgánicos	Se forman de la combinación del mercurio y el carbón, los microorganismos son los encargados de convertir el mercurio en metilmercurio.
Mercurio elemental o metálico	Se sabe que es un metal de color plateado y brillante, es de forma líquida a temperatura ambiente, se utiliza para la fabricación de termómetros, focos e interruptores eléctricos, Si el mercurio se cae, se divide en gotas pequeñas que se pueden filtrar por las grietas o adherirse fuertemente a otros materiales. Genera vapores tóxicos al evaporarse a temperatura ambiente, siendo estos invisibles

	e inodoros, en cambio, si se lo calienta se transforma es un gas incoloro y sin olor.
Compuestos de mercurio inorgánico	Estos forman sales de mercurio en forma de cristales o un polvo de color blanco, sin embargo, una excepción es el sulfuro de mercurio o cinabrio que es de color rojo.

Fuente: Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos, 2022, p.1.

Realizado por: Chuto K., Guamán B., 2023.

El mercurio y sus compuestos son altamente tóxicos, además este material puede formar amalgamas con diferentes metales como: El oro, la plata, platino, el uranio, el cobre, el plomo, el sodio y el potasio (Lenntech, 2022, p.1).



Ilustración 1-2: Mercurio

Fuente: (CC BY, 2023).

2.1.2. Propiedades químicas del mercurio

Este metal posee una baja reactividad, gracias a esto reacciona muy poco con los ácidos, sin embargo, si puede haberlo con aquellos que son altamente oxidantes como por ejemplo el ácido sulfúrico concentrado, el agua regia y el ácido nítrico, que lo pueden disolver para generar sulfatos, nitratos y cloruros. Para poder contener el mercurio que se ha derramado se puede utilizar el ácido sulfhídrico atmosférico, el carbón activado o incluso el zinc en polvo, cabe recalcar que si reacciona con el aluminio generará una reacción corrosiva (Equipo editorial Etecé, 2023, p.1).

Tabla 2-2: Propiedades químicas del mercurio (II)

Propiedades físicas	
Estado	Líquido
Punto de ebullición	357 °C
Punto de fusión	-38.4 °C
Densidad	16.6 g/mL
Masa atómica	200.59 g/mol
Primer potencial de ionización	10.51 eV
Propiedades químicas	
Radio atómico	1.57 Å
Radio covalente	1.49 Å
Radio iónico	1.10 Å
Electronegatividad	1.9
Estado de oxidación	+2
Valencia	1, 2

Fuente: Lenntech, 2022, p.1.

Realizado por: Chuto K., Guamán B., 2023.

2.1.3. Usos del mercurio

El mercurio gracias a sus propiedades posee una gran cantidad de aplicaciones para los seres humanos, sin embargo, cabe mencionar que muchos de estos usos provocan una gran contaminación:

Tabla 3-2: Aplicaciones del mercurio (II)

Industria	Descripción
Minera	Gracias a su reactividad con el oro y metales preciosos, sirve para la extracción de estos.
Manufacturera	Se elaboran termómetros, barómetros e instrumentos que aprovechan su dilatación ante el calor. Además de la fabricación de lámparas de vapor de mercurio e interruptores líquidos y electrodos.
Química	Se utiliza en la fabricación de pesticidas, catalizadores de baterías, detonador de explosivos, pigmentos de pinturas, también se utiliza para producir cloro y sosa cáustica.
Medicina	Se utilizaba para hacer amalgamas dentales, además, de ser usado en antisépticos, laxantes, pomadas y otros medicamentos.

Fuente: Equipo editorial Etecé, 2023, p.1.

Realizado por: Chuto K., Guamán B., 2023.

2.1.4. Emisiones de mercurio en la atmósfera

En la actualidad el mercurio se está transformando en un gran problema para el ambiente, este se debe a que, si este se libera de las rocas en la que está contenido, ya sea de forma natural o por causas humanas, su destino será la atmósfera e incluso el agua, un caso muy particular de este

suceso son las erupciones volcánicas o incendio que liberan grandes cantidades de mercurio en el aire (Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos, 2022, p.1).

Como se mencionó estos efectos negativos también pueden producirse por causa de los seres humanos, debido a que, por quemar carbón, el petróleo, madera y combustibles fósiles provocaran que el mercurio se suspenda en el aire. Al estar este metal en suspensión en el aire, este puede volver a caer en forma de lluvia o polvo hacia la tierra, es decir, que se producirá la contaminación antes mencionada (Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos, 2022, p.1).

Tabla 4-2: Causas de la contaminación producida por mercurio liberado a la atmósfera.

Causas
Por quemar petróleos con componentes de mercurio.
Por quemar madera que contiene mercurio.
Por la quema de residuos que poseen mercurio, por ejemplo: desperdicios de una fábrica de cemento o por productos que se fabricaron con mercurio.
El uso de tecnología para fabricar cloro.
Por la ruptura de productos que contienen mercurio.
Por la calcinación de hierro en hornos eléctricos para producir acero.
Por el uso de calderas de carbón en industrias como fuente de calor térmico en forma de vapor.

Fuente: Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos, 2022, p.1.

Realizado por: Chuto K., Guamán B., 2023.

2.1.5. Efectos del mercurio sobre el medio ambiente

Uno de los efectos más negativos que tiene el mercurio para el suelo es que al utilizar fertilizantes para la agricultura y por las aguas residuales de las industrias, su destino siempre serán fuentes de agua superficial o subterránea. Otro efecto negativo del mercurio en el suelo es que este puede terminar acumulándose en los hongos o champiñones que puede ser consumidos por las personas (Lenntech, 2022, p.1).

Un gran problema que posee las aguas que contienen mercurio es que al seguir su rumbo estas pueden seguir incrementando su concentración de mercurio, por tal razón se podrá producir metilmercurio, una sustancia tan dañina que afecta directamente al sistema nervioso de los seres vivos. Dentro de los animales más afectados están los peces, los cuales adsorben rápidamente el mercurio del agua, pudiendo generar una intoxicación por mercurio y puede llegar a afectar a los

que puedan llegar a consumirlos como por ejemplo otros animales o incluso el ser humano (Lenntech, 2022, p.1).

2.1.6. Efectos del mercurio en la salud de los seres humanos

En nuestros hogares tenemos muchos artículos que son hechos a base de mercurio, sin embargo, estos no significan que sean problemas para nuestra salud. Pero si por ejemplo se rompe un termómetro y el mercurio cae en el suelo, estos provocarán una alta exposición al mercurio por medio de la respiración hasta que este se evapore completamente, lo que provocaría efectos dañinos hacia nuestros nervios, cerebro, riñones, produciría también una irritación en los pulmones, en los ojos, reacciones en nuestra piel, vómitos y diarreas, entre otros (Lenntech, 2022, p.1).

Cabe mencionar que el mercurio no se encuentra comúnmente en los alimentos, sin embargo existen varias excepciones, como por ejemplo al consumir peces que puede poseer altos niveles de mercurio dependiendo de la contaminación de los sistemas de agua en los que se los obtuvieron, en los cultivos no se hay muchos alimentos que tengan mercurio, pero si para cultivar estos se utilizaron fertilizantes con mercurio, estos adsorben el mismo y consigo traerán efectos negativos al organismo de los seres vivos (Lenntech, 2022, p.1).

Tabla 5-2: Efectos negativos para la salud de las personas al exponerse a vapores de mercurio

Efectos por la exposición prolongada a los vapores de mercurio	Efectos por la exposición a concentraciones altas de mercurio por un período breve
Angustia	Tos e irritación de la garganta
Timidez excesiva	Dificultad para respirar
Anorexia	Dolor en el pecho
Problemas de apetito	Náuseas, vómitos y diarrea
Insomnio	Aumento de la tensión arterial o en la frecuencia cardíaca
Irritabilidad	
Fatiga	Irritación de los ojos y problemas de visión
Mala memoria	
Temblores	Sabor metálico en la boca
Problemas para ver	
Problemas para oír	Dolor de cabeza

Fuente: Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 2012, p.2.

Realizado por: Chuto K., Guamán B., 2023.

Los daños producidos por el mercurio en nuestro cuerpo traen consecuencias muy graves como: daño en las funciones del cerebro, cambios en la personalidad, afectaciones a la visión, sordera,

incoordinación de nuestros músculos y pérdida de memoria (Lenntech, 2022, p.1). Otros efectos negativos producidos por sobrepasar los límites permitidos de mercurio en las aguas de consumo humano son:

Tabla 6-2: Enfermedades producidas por intoxicación de mercurio

Metal	Enfermedades que afectan a las personas
Mercurio	Artritis reumatoide
	Enfermedades renales
	Enfermedades vasculares
	Enfermedades neuronales

Fuente: Tubón Rengel, 2020, p.31.

Realizado por: Chuto K., Guamán B., 2023.

2.1.7. Mercurio en el Ecuador

Ecuador es un país rico en minerales, los cuales por medio de la minería artesanal son extraídos de sus reservas naturales, sin embargo, esto abarca un gran problema para el medio ambiente, debido a que los métodos de explotación que son utilizados dejan como consecuencia una gran contaminación de zonas aledañas al lugar de explotación, donde se ven principalmente la contaminación de aguas por la mercuración utilizada para extraer oro, entre otros efectos negativos. Ecuador al ser un país cuya economía de sus habitantes dependen de la minería artesanal, es importante mencionar que, al no tener conocimientos en procesos tanto de extracción como tratamiento de minerales o tratamientos de aguas residuales, provoca un efecto negativo en la economía, principalmente el uso de procesos ineficientes que generan pérdidas.

Según la Cámara de Minería del Ecuador, la actividad minera presente en nuestro país posee un gran potencial minero que, aplicando los métodos correctos, podrán ser rentables para las personas y para el medio ambiente (Tubón Rengel, 2021, p.28). A continuación, se muestra la producción que genera Ecuador en la actualidad:

Tabla 7-2: Producción minera en el Ecuador

Metales	Producción
Oro	39 millones de onzas
Plata	88 millones de onzas
Cobre	8 millones de toneladas métricas
Plomo	28 mil toneladas métricas
Zinc	209 mil toneladas métricas

Fuente: Tubón Rengel, 2020, p.28.

Realizado por: Chuto K., Guamán B., 2023.

Además, nos dice que las provincias del sur del país son el eje principal en la actividad minera, donde en la provincia de El Oro, es uno de los principales lugares donde la actividad minera causa muchos estragos en la vida cotidiana de sus habitantes. Donde se puede mencionar que en Zaruma y Portovelo sus habitantes son afectados por el consumo de agua y alimentos contaminados por mercurio provenientes de la minería artesanal (Tubón Rengel, 2021, p.29). En la siguiente tabla se muestra la actividad minera que presentan las provincias del Ecuador:

Tabla 8-2: Actividad minera de las provincias del Ecuador

Provincia	Porcentaje de concesiones mineras
Azuay	14
Guayas	12
Zamora Chinchipe	12
El Oro	11
Pichincha	11
Loja	10
Tungurahua	4
Chimborazo	4
Cañar	3
Cotopaxi	3
Esmeraldas	3
Imbabura	2
Morona Santiago	2
Manabí	2
Pastaza	2
Napo	1
Sucumbíos	1
Bolívar	1
Orellana	1

Fuente: Tubón Rengel, 2020, p.29.

Realizado por: Chuto K., Guamán B., 2023.

Los efectos ambientales que se presentan por el uso de métodos artesanales provocan que muchas personas se vean afectadas de muchas maneras, por lo que en Ecuador se están buscando formas para hacer que la minería artesanal tenga un control mayor, con el fin de reducir la contaminación ambiental. Además de que las autoridades puedan establecer límites para estos procesos de acuerdo con las disposiciones de la ley como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 9-2: Límites permitidos de acuerdo con la ley ecuatoriana y la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos

Metales	EPA (mg/l)	Ecuador (mg/l)
Mercurio	0.00003	0.001
Cadmio	0.01	0.01
Plomo	0.006	0.05
Manganeso	0.20	1.00

Fuente: Tubón Rengel, 2020, p.31.

Realizado por: Chuto K., Guamán B., 2023.

2.1.8. Carbón activo

Se conoce como carbón activado a un elemento con características porosas encargado de atrapar compuestos, en su mayoría de origen orgánico, que puede estar presentes en gases o líquidos, gracias a sus cualidades purificantes es el más utilizado por los seres humanos. Es un elemento que se usa en su mayoría de veces como parte del proceso de filtración con el objetivo de retener los sólidos que se encuentre presentes en diferentes fluidos (Carbotecnia, 2022, p.1).

El carbón activo posee una forma porosa que puede elaborarse a partir de materias primas carbonosas, en la mayoría de las industrias para la obtención de carbón activado se lo ha obtenido de carbón mineral, cascaras de coco, turba y madera; su proceso de activación consiste en tratar la materia prima con vapor o compuestos químicos, con el afán de obtener la estructura porosa (EUROCARB, 2022, p.1).



Ilustración 2-2: Carbón activado

Fuente: (EUROCARB, 2022, p.1)

También un carbón activado se lo puede tratar con dióxido de carbono o vapor sobrecalentado a muy altas temperaturas, lo que generara una matriz con poros diminutos en la estructura del carbón, lo que aumenta su superficie y además de producir lugares en donde las moléculas se

quedaran atrapadas, lo que hace que el carbón activado sea considerado como un medio de filtración muy eficaz, siendo los filtros de carbón activado un gran material capaz de someterse a procesos químicos con el objetivo de aumentar la capacidad de atrapar contaminantes específicos, por ejemplo la funcionalización del carbón activado (Camfil, 2022, p.1).

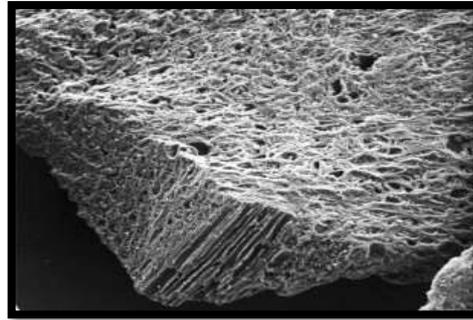


Ilustración 3-2: Microporos del carbón activo

Fuente: (EUROCARB, 2022, p.1)

2.1.9. Estructura del carbón activado

El carbón activado posee una estructura química que se denomina forma bruta del grafito, cuya estructura es de forma amorfa aleatoria muy porosa, donde el carbón activado es activado por altas temperaturas y la atmosfera, donde se crea una porosidad con diferentes poros cuyas dimensiones varían mucho ya sean las cavidades, huecos visibles o incluso dimensiones a nivel molecular (Tubón Rengel, 2021, p.38).

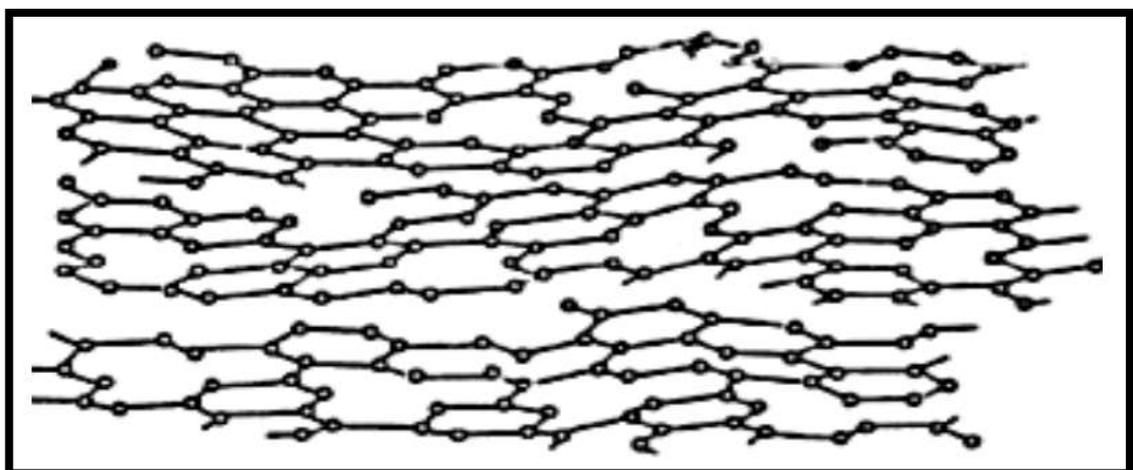


Ilustración 4-2: Estructura arreglada de las capas de carbón activado

Fuente: (Tubón Rengel, 2020, p.38.)

En la estructura del carbón activado se encuentran millones de poros de tamaño microscópico en donde los gases que entran y se condensan como líquido en la superficie del carbón. Se sabe que medio kilogramo de carbón posee más de 600 mil metros cuadrados de superficie, lo que significa que el carbón mantendrá su eficiencia, lo que garantiza que, al capturar un gas, este podrá retenerlo por un largo tiempo, llegando hasta un periodo de 4 años en aplicaciones de HVAC (Camfil, 2022, p.1).

2.1.10. Forma física del carbón activado

Una forma de producirse el carbón activado es en polvo, también puede hacerse en forma de gránulos o de pelets cilíndricos (Carbotecnia, 2022, p.1).

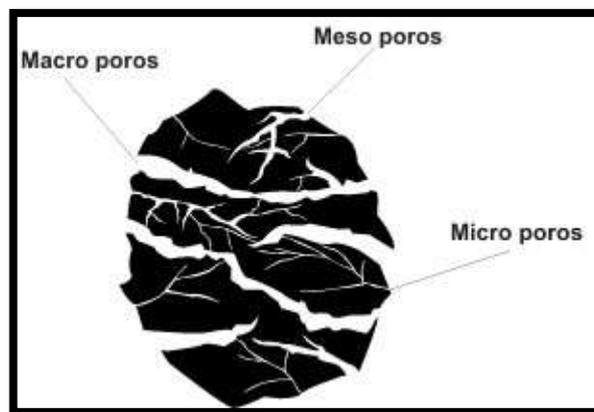


Ilustración 5-2: Forma física del carbón activado

Fuente: (Carbotecnia, 2022, p.1)

Estas formas del carbón activado se describen en la siguiente tabla:

Tabla 10-2: Formas de producir el carbón activado

Forma	Descripción
Polvo	Se utiliza en la purificación de líquidos, donde el carbón se dosifica en un tanque de agitación y luego se procede a separar el líquido por medio de un filtro adecuado para retener partículas pequeñas.
Carbón granular	Se producen en diferentes rangos de partículas que se especifican según la granulometría o el número de malla.
Pelets	Se aplican para el tratamiento de gases, ya que gracias a su forma cilíndrica se produce una menor caída de presión.

Fuente: Carbotecnia, 2022, p.1.

Realizado por: Chuto K., Guamán B., 2023.

Cuando se desea un carbón de forma granular o pelet, si se ve que la materia prima no es lo suficientemente dura, se puede proceder a reaglomerar con un agente ligante para que adquiera dureza, con el fin de evitar que se rompa cuando pase el fluido (Carbotecnia, 2022, p.1).

2.1.11. Características del carbón activado

El carbón activado puede poseer un área superficial mayor a un rango de 500 m²/g, donde puede alcanzar hasta valores de 1000 m²/g, incluso algunos carbones activados pueden alcanzar valores que sobrepasan los 2500 m²/g. Por medio de un microscopio electrónico, se observa una estructura del carbón activado con una gran cantidad de grietas, a niveles más bajos se puede observar zonas con pequeñas superficies planas como la estructura del grafito, separadas solamente por nanómetros y las cuales generan los microporos (Equipo y Laboratorios de Colombia, 2022, p.1).

Estos microporos nos brindan las condiciones para que se produzca el proceso de adsorción, después para evaluar la adsorción se lo realiza con el nitrógeno gaseoso a 77 K en condiciones de alto vacío. En cambio, el carbón activo saturado lo podemos obtener al aplicarle calor; los aerogeles de carbón tiene un alto costo, sin embargo, poseen superficies muy efectivas y tiene un uso similar al carbón activado en aplicaciones especiales (Equipo y Laboratorios de Colombia, 2022, p.1).

También se puede caracterizar al carbón activado por su vasto sistema de poros de tamaño molecular que se encuentran dentro de las partículas de carbón, dando como resultado la formación de un material que posee una extensa superficie interna; por esta razón con respecto al mercado los carbones activados que se encuentran disponibles tienen una superficie de entre 400 m²/g pudiendo llegar hasta superar los 2000 m²/g (EUROCARB, 2022, p.1).



Ilustración 6-2: Tipos de carbón activado en el mercado

Fuente: (EUROCARB, 2022, p.1).

2.1.12. *Funcionamiento del carbón activado*

Se conoce que los átomos de carbono que conforman la gran superficie interna del carbón activado poseen fuerzas atractivas denominadas fuerzas de Van der Waals que se encargan de atraer a las moléculas de los gases o líquidos circundantes. La combinación de estas fuerzas atractivas y esas moléculas en el medio circundante produce una adsorción de moléculas en la superficie del carbón activado, gracias a que algunas de estas moléculas tienen estructuras que permiten adsorberse más rápido que otras, favorece la separación molecular (EUROCARB, 2022, p.1).

Se conoce que el carbón activado es un adsorbente, cuya capacidad de adsorción es una gran ayuda para las personas, debido a que ayuda en la eliminación de malos olores de refrigeradores o incluso al ponerlo en un balde de agua, este adsorberá todos los malos olores y contaminantes, puede eliminar olores, colores y sabores (Carbotecnia, 2022, p.1).

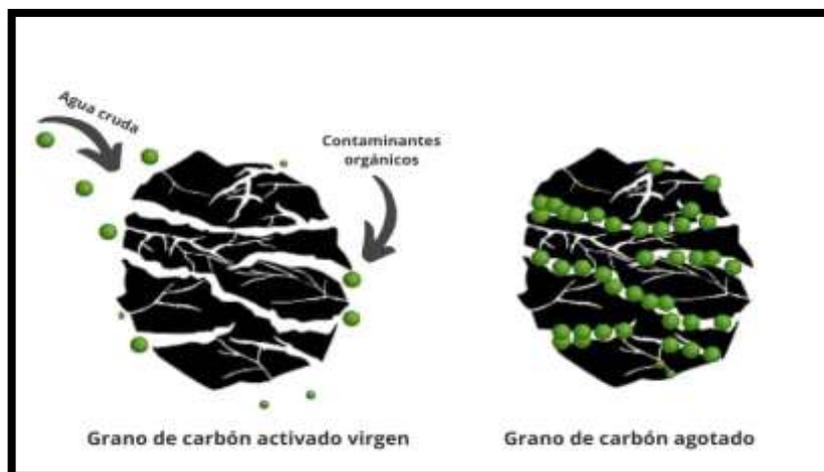


Ilustración 7-2: Funcionamiento del carbón activado

Fuente: (Carbotecnia, 2022, p.1)

2.1.13. *Materias primas para obtener el carbón activado*

Según la teoría, se puede activar cualquier partícula de carbón, sin embargo, si el carbón presenta una estructura muy ordenada como el diamante o el grafito, es muy difícil que algunos de los átomos de carbono puedan generar poros. Para poder clasificar los carbones se puede tomar en cuenta el grado de coquización u ordenamiento de sus átomos de carbono, lo que nos dice que mientras menos estén ordenados el carbón será menos duro y podrá activarse de mejor manera y con mucha facilidad (Carbotecnia, 2022, p.1). En la siguiente tabla se representa las materias primas más comunes para obtener carbón activado:

Tabla 11-2: Materiales para obtener carbón activado

Materiales	Descripción
Carbones de maderas	Las materias primas más utilizadas para poder fabricar carbón activado son maderas poco duras como el pino. Además, estos carbones forman poro de grandes diámetros y son muy especiales, ya que se aplican para decolorar líquidos.
Carbones minerales	Utiliza materias primas como lignítics, bituminosos y de antracita. Estos carbones tienden a formar una amplia gama de poros, por lo cual se los usa en los compuestos que requieren retenerse y son de distintos tamaños moleculares.
Carbones vegetales de cáscara de coco o huesos de vegetales	Usan principalmente materias como concha de coco, hueso de aceitunas o de durazno y cáscaras de nuez. Se encargan de formar poros pequeños y se aplican para el tratamiento de gases o para potabilizar el agua que proviene de pozos.

Fuente: Carbotecnia, 2022, p.1.

Realizado por: Chuto K., Guamán B., 2023.



Ilustración 8-2: Cáscara de coco para fabricar carbones vegetales

Fuente: (Carbotecnia, 2022, p.1)

2.1.14. Aplicaciones del carbón activado

Dentro de las aplicaciones que tiene el carbón activado podemos encontrar sus usos en la siguiente tabla:

Tabla 12-2: Usos del carbón activado en la vida cotidiana

Aplicación	Descripción
Potabilización de agua	En el agua de consumo humano, los contaminantes que más se encuentran en pozos de agua son aquellos que poseen bajo peso molecular, en donde se opta por utilizar un material adsorbente que en este caso es un carbón activado que tiene una alta microporosidad. Dentro de los carbones que cumplen estos requisitos tenemos al proveniente de concha de coco como primera opción, otro de los carbones recomendados son los que provienen de minerales bituminosos. El carbón activado se encarga de retener plaguicidas, grasas, aceites, detergentes, subproductos de desinfección, toxinas, colorantes, compuestos que se originan de la descomposición de algas y vegetales o por el metabolismo de animales.
Deodorización y purificación de aire	Las propiedades del carbón activado son muy útiles para la eliminación de contaminantes presentes en el aire o flujos de agua que desechan los procesos industriales; en los que se puede mencionar la limpieza de vertidos, la recuperación de aguas superficiales, tratamiento de agua potables, purificación de aire y la recolecta de compuestos volátiles (Equipo y Laboratorios de Colombia, 2022, p.1). Se utiliza en respiradores de cartucho, en sistemas de recirculación de aire para espacios públicos, venteos de drenajes y plantas de tratamiento de agua, casetas de aplicación de pinturas y espacios que almacenan o aplican solventes orgánicos.
Tratamiento para personas con intoxicación aguda	Dentro del uso médico el carbón activado se utiliza para tratar envenenamientos y sobredosis por ingesta oral, previene la adsorción de veneno por el estómago, para su utilización se lo mezcla con un jugo o líquido para evitar que el paciente lo vomite; sin embargo, el uso incorrecto puede producir broncoaspiración, si no se controla producirá la muerte (Equipo y Laboratorios de Colombia, 2022, p.1). El carbón activado es considerando el antídoto universal, por lo cual se aplica en salas de urgencias y hospitales.
Refinación de azúcar	El carbón se encarga de retener las proteínas que dan color al jugo de caña, esto con el fin evitar la fermentación del azúcar y se eche a perder.
Decoloración de aceites vegetales	Se aplica en alimentos como la glucosa de maíz y otros líquidos destinados para la alimentación.

Decoloración y desodorización de bebidas alcohólicas	Se aplica a vinos de uva y otros destilados de cualquier origen.
Recuperación de oro	Debido a que el oro no se puede separar de los minerales por procesos de flotación, por lo que se disuelve en cianuro de sodio y finalmente se adsorbe en el carbón activado.

Fuente: Carbotecnia, 2022, p.1.

Realizado por: Chuto K., Guamán B., 2023.

2.1.15. Capacidad de adsorción del carbón activado

El carbón activado posee una capacidad para retener sustancias determinadas, no solo tomando en cuenta su área superficial, sino que toma en cuenta la proporción que tiene sus poros cuyo tamaño debería ser el adecuado, en otras palabras, si se dice que es un poco adecuado este tendría un diámetro de entre 1 y 5 veces la molécula que adsorbe. Si esta condición se cumple, podemos decir que su capacidad de adsorción es de entre 20 y 50% de su propio peso (Carbotecnia, 2022, p.1).

2.1.16. Activación del carbón activado

El carbón se puede activar por tratamientos químicos o térmicos, en donde los procesos térmicos se encargan de provocar una oxidación parcial del carbón, logrando formar los microporos, teniendo en cuenta que se debe evitar la gasificación para que no se pierda materia prima de carbón innecesariamente, este proceso se produce a temperatura de entre 600 y 1100 °C, en necesario que el proceso suceda en una atmosfera controlada la cual se la consigue al tener ingresar una cantidad adecuada de vapor de agua o nitrógeno (Carbotecnia, 2022, p.1).

En cambio, los procesos químicos utilizan la materia prima antes de que se carbonicen, en donde se utiliza reactivos que son agentes deshidratantes, como por ejemplo el ácido fosfórico, el que se encarga de romper las uniones de las cadenas de celulosa, luego de terminada esa etapa, se procede a carbonizar el material a una baja temperatura de 550 °C, finalmente se lava el material resultante con el fin de eliminar el resto de reactivo y otros subproductos (Carbotecnia, 2022, p.1).

Para estos tratamientos de activación de carbón, ya sean térmicos o químicos, se utilizan hornos para carbonizar el carbón, estos pueden ser hornos rotatorios u hornos verticales (Carbotecnia, 2022, p.1).

2.1.16.1. Activación física

También conocida como la activación de vapor, en este método el material carbonizado se trata con una mezcla de gases de combustión y vapor de agua, adicionando una alta temperatura con el objetivo de que el material se active; para elaborar estos carbones se utilizan materiales de origen carbonoso como por ejemplo las cáscaras de nuez y de coco, además de otros tipos de madera (Equipo y Laboratorios de Colombia, 2022, p.1).

La activación térmica es un proceso que se lleva a cabo en dos etapas, la primera es la carbonización, que consiste en eliminar elementos como el hidrógeno y el oxígeno, con el objetivo de formar una estructura porosa rudimentaria, y la segunda etapa es la de gasificación del carbonizado que al exponerse a una atmósfera oxidante que eliminara los productos volátiles y átomos de carbono, provocando que el volumen de los poros y la superficie específica aumenten; esto se lo puede conseguir al emplear distintos tipos de hornos con temperaturas cercanas a los 1000 °C (Equipo y Laboratorios de Colombia, 2022, p.1).

2.1.16.2. Activación química

Este tipo de activación utiliza principalmente una sustancia deshidratante, que generalmente es un ácido, después se lo mezcla con nuestra materia prima, además de someterla a tratamientos con temperaturas moderadas. Sin embargo, este método presenta un problema, debido a que al usar reactivos como agentes deshidratantes como el cloruro de cinc, el cinc puede quedarse en el producto final, aun cuando se lo haya lavado con el fin de eliminar residuos (Equipo y Laboratorios de Colombia, 2022, p.1).

También se conoce que en este proceso el material se impregna con un agente químico que por lo general se usa el ácido fosfórico o el hidróxido de potasio, se lo calienta en un horno a una temperatura de entre 500 y 700 °C. estos agentes químicos se encargan de reducir la formación de material volátil y alquitranes, lo que aumenta el rendimiento del carbón y finalmente se procede a lavarse el carbón con el afán de eliminar los residuos del ácido utilizado (Equipo y Laboratorios de Colombia, 2022, p.1).

2.1.17. Clasificación de los poros de carbón activado

De acuerdo con lo estipulado por la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (IUPAC), el carbón activado posee una gran cantidad de poros, los que se puede clasificar de acuerdo con su diámetro:

Tabla 13-2: Clasificación de los poros presentes en el carbón activado

Nombre	Dimensión del poro
Ultramicroporos	Menores a 0.7 nm
Supermicroporos	Mayores a 0.7 nm
Microporos	Menores a 2 nm
Mesoporos	Entre 2 y 50 nm
Macroporos	Entre 50 y 100000 nm
Grietas	Mayores a 100000 nm

Fuente: Tubón Rengel, 2020, p.39.

Realizado por: Chuto K., Guamán B., 2023.

Los microporos presentes en el carbón activado poseen el tamaño adecuado para poder retener a pequeñas moléculas como pueden ser olores, sabores y solventes. En cambio, los macroporos son los que ayuda a llegar a los adsorbatos a los microporos, finalmente los mesoporos pueden retener a partículas de un tamaño intermedio. La naturaleza química del carbón activado también es muy útil, gracias a esta estructura posee heteroátomos como hidrógeno, oxígeno y nitrógeno para poder retener más sustancias (Tubón Rengel, 2021, p.40).

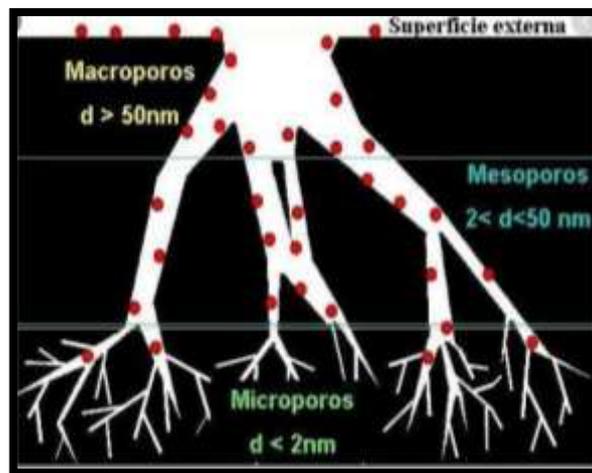


Ilustración 9-2: Tipos de microporos del carbón activado

Fuente: (Tubón Rengel, 2021, p.40).

2.1.18. Tratamiento de aguas con carbón activado

El carbón activado tiene dos propiedades que son favorables para el tratamiento de agua de consumo humano, en donde la primera sirve para contener la mayoría de los contaminantes presentes en el agua y adherirlas a sus paredes por medio de sus poros y gracias a estos genera una gran eficiencia para la eliminación de todos los elementos contaminantes del agua, es decir que deja al líquido libre de estos contaminantes (Tubón Rengel, 2021, p.42).

En cambio, la segunda propiedad no sirve también para poder desinfectar el agua, eliminando el cloro residual libre que se quedó sin reaccionar. En actualidad, el carbón activado sigue siendo considerado como una solución rentable para las industrias que utilizan procesos de purificación de agua y gracias a este esos procesos son más fáciles de llevar a cabo (Tubón Rengel, 2021, p.42).

2.1.19. Carbón activado en Ecuador

Gracias a las características y aplicaciones del carbón activado es un material muy requerido para todo tipo de industria, sobre todo para la potabilización de agua, uso médico, uso farmacéutico, entre otros. Actualmente, en Ecuador tiene una gran acogida, debido a que en Quito existen empresas que se encargan de elaborar este producto, además de su venta y distribución por todo el país, dentro de las cuales se puede mencionar a Ecuacarbones Cia. Ltda. y Erafi S.A., siendo de las cuales se encarga de proveer de este material a nuestro país (Tubón Rengel, 2021, p.43). Para la fabricación de este producto se deben tomar en cuenta ciertas características para su comercialización y las cuales se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 14-2: Parámetros del carbón activado comercial

Parámetro	Unidad de medida	Rango de valores	Normativa
Densidad aparente	g/cm ³	0.25 – 0.65	ASTM D-2854
Radio medio de poro	Nm	0.7 – 500	ASTM C-699
Volumen total de poro	cm ³	0.2 – 1	ASTM C-699
Área superficial	m ² /g	500 – 1200	ASTM D-3037 BET
Número de yodo	mg/g de carbón	500 – 1200	ASTM D-4607
Rango de tamaño de partícula	Malla estándar	4 x 8 – 20 x 50	ANSI/AWWA B604-90
Dureza	Adimensional	30 – 99	ASTM D-3802
Coefficiente de uniformidad	Adimensional	< 2.1	ANSI/AWWA B604-90
Tamaño efectivo de partícula	Nm	0.4 – 3.3	ANSI/AWWA B604-90

pH del extracto acuoso	pH	2 – 11	ASTM D-3838
Contenido de cenizas totales	% base seca	3 – 15	ASTM D-2866
Humedad	%	2 – 15	ASTM D-2867
Solubles en agua	% base seca	0.5 – 7	ASTM D-5029

Fuente: Tubón Rengel, 2020, p.44.

Realizado por: Chuto K., Guamán B., 2023.

2.1.20. Técnicas de caracterización óptica de carbón activado.

2.1.20.1. Espectroscopia infrarroja (IR)

La espectroscopia infrarroja es una técnica que consiste en que los enlaces de una molécula absorben radiación infrarroja, con el objetivo de que pasen a niveles vibracionales superiores, la radiación va a absorberse a una frecuencia diferente, dependiendo del tipo de enlace que exista, lo que nos permite identificar los grupos funcionales que posee la molécula que se estudia. Para poder a cabo esta técnica de caracterización se deben cumplir con dos condiciones: la primera es que la frecuencia de radiación debe ser tal que nos permita la transición entre los estados vibracionales y la segunda condición es que el momento dipolar de la molécula analizada debe interactuar con el campo eléctrico de la onda con el fin de que pueda absorber la radiación infrarroja (Macías Erazo, 2022, p.29).

Se sabe que un espectrómetro infrarrojo típico tiene una fuente, una celda de muestra, un detector, un amplificador, un convertidor A/D y una computadora. Primero la radiación de las fuentes llega al detector luego de pasar a través del interferómetro. La señal es amplificada y además convertida en una señal digital por el convertidor A/D y el amplificador, luego la señal se transfiere a la computadora, en donde será realizada la transformada de Fourier (Macías Erazo, 2022, p.29).

La radiación infrarroja es de aproximadamente de $10000 - 100 \text{ cm}^{-1}$, la que se envía a través de una muestra con parte de la radiación absorbida, además la radiación que se absorbe de la muestra es convertida en energía vibratoria o rotacional. Después se obtiene una solución resultan en el detector, que en lo general es un espectro de $4000 \text{ a } 400 \text{ cm}^{-1}$ que representa una huella molecular de las muestras. Cada molécula posee una única huella digital, por tal razón la técnica de espectroscopia infrarroja es una herramienta invaluable para poder identificar aspectos químicos de los materiales (Macías Erazo, 2022, p.29).

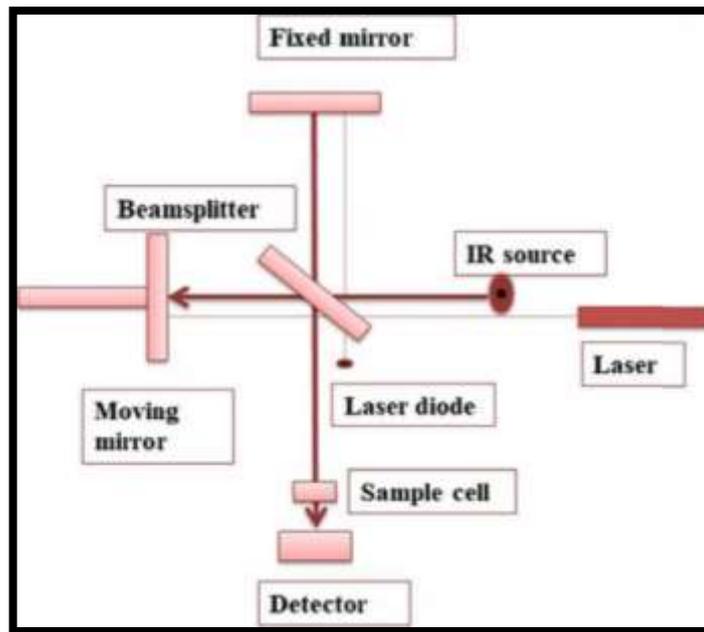


Ilustración 10-2: Diagrama esquemático del IR

Fuente: (Macías Erazo, 2022, p.30)

2.1.20.2. Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)

En esta técnica se utiliza un microscopio electrónico, el cual nos permite obtener imágenes por detección, el procesamiento y la visualización de señales que se adquieren mediante las interacciones entre un haz de electrones de alta energía y la materia, lo que nos proporciona información topográfica, de composición y de estructura cristalográfica. Todos los microscopios electrónicos de barrido poseen un canon electrónico en una columna de alto vacío, por donde se generará un haz de electrones de alta energía, donde uno de los factores que inciden en la resolución final de la imagen es determinada por el diámetro de este haz de electrones (Macías Erazo, 2022, p.30).

Luego este haz de electrones es colimado por lentes electrónicas y se focaliza sobre la muestra de análisis, después un sistema de bobinas desvía el haz de forma que una zona de la superficie de la muestra es explorada continuamente y cuyas señales restantes se van registrando por medio de los detectores, estas se procesan y se visualizan por el sistema final de observación, es decir por la pantalla de la computadora. Cabe recalcar que la parte final del microscopio electrónico es una cámara de vacío que tiene una platina en donde se coloca la muestra para poder analizarla. Los controles externos nos permiten desplazar la platina en los tres ejes y además de poder variar la orientación para finalmente poder proceder con la observación (Macías Erazo, 2022, p.29).

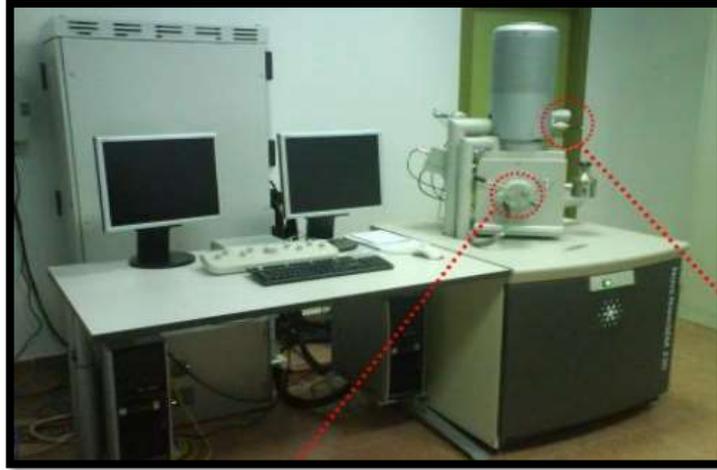


Ilustración 11-2: Microscopio Electrónico de Barrido

Fuente: (Angamarca Quinde, 2020, p.26).

2.1.21. Adsorción

La adsorción se sabe que es un proceso que consiste en la separación de componentes de la fase líquida y se trasladan a un sólido, es decir, que se enlaza de forma física o química a la superficie del material sólido o conocido como adsorbente. El carbón activado es un material muy utilizado en los procesos de adsorción gracias a su región superficial, además de poseer una alta capacidad de adsorción y esto se debe a su estructura permeable, generando así una buena eficacia (Rojas et al., 2012, p.22).

El carbón activado se lo puede obtener por procesos físicos y químicos, con base a muchos precursores en estado sólido. Es uno de los materiales más usados para sistemas de lecho fijo, cuyo proceso se lo realiza en una columna donde el material adsorbente se lo coloca en la parte interior de la columna, es decir, como un lecho y el líquido procederá atravesar la columna en manera ascendente, de forma horizontal o incluso de forma descendente. Para los procesos de tratamiento de aguas residuales se deja que el líquido fluya y por ende los contaminantes procederán a separarse de forma gradual (Rojas et al., 2012, p.22).

Por medio del movimiento progresivo en la zona de adsorción se generarán las “curvas de ruptura” lo que nos permitirá encontrar los parámetros del tamaño del sistema, su tiempo de contacto, su velocidad de flujo; esta operación procederá a detenerse una vez que la concentración del adsorbible alcanza un 10% de la concentración inicial, es decir que alcanza un valor típico; así también se obtendrá un denominado “punto de ruptura” (Rojas et al., 2012, p.22).

2.1.22. *Isotermas de adsorción*

Una isoterma de adsorción se utiliza para el estudio de moléculas de adsorción, es decir, que no ayuda a saber cómo se distribuyen estas entre la fase líquida y fase sólida, cuando el proceso de adsorción ha alcanzado el estado de equilibrio. En la adsorción se han usado varios modelos matemáticos para poder describir los estudios de equilibrio para la eliminación de contaminantes mediante este proceso. Para seleccionar un modelo de isoterma, se considera su naturaleza y el tipo de sistema, sin embargo, el modelo de Langmuir y el de Freundlich son los más utilizados para el estudio del equilibrio de adsorción (Angamarca Quinde, 2020, p.26).

2.1.22.1. *Isoterma de Langmuir*

El método desarrollado por Langmuir inicialmente estaba diseñado para la adsorción de un sistema gas-sólido, sin embargo, se lo ha aplicado en estudio de adsorción de un soluto en fase líquida, cabe recalcar que este modelo presenta un isoterma particular de un proceso de quimisorción (Lagua López, 2021, p.29).

En este modelo la adsorción se desarrolla en monocapa, debido a que la atracción de las moléculas y la superficie del adsorbente se basa en fuerzas físicas, lo que provoca que la adsorción ocurra en una cantidad finita y definida en sitios localizados idénticos y equivalentes (Lagua López, 2021, p.29). El modelo de la isoterma de Langmuir se representa por la siguiente ecuación:

$$q = \left(\frac{q_{max} * bC_e}{1 + bC_e} \right) \quad (1-2)$$

Donde:

q : Representa la cantidad de adsorbato retenido en el adsorbente (mg/g).

q_{max} : Es la capacidad máxima de adsorción.

b : Es la constante de Langmuir (L/mg).

C_e : Es la concentración del adsorbato presente en la solución en equilibrio (mg/L) (Lagua López, 2021, p.29).

También se puede representar la isoterma de Langmuir, en forma línea mediante la siguiente expresión:

$$\frac{C_e}{q} = \frac{1}{bq_{max}} + \frac{C_e}{q_{max}} \quad (2-2)$$

2.1.22.2. *Isoterma de Freundlich*

En el modelo de la isoterma de Freundlich se adapta una adsorción en multicapas, debido a que no hay un límite ni se propone la adsorción monomolecular. Freundlich presentó una relación de tipo exponencial entre la cantidad de soluto adsorbido y su concentración en equilibrio (Lagua López, 2021, p.30). La siguiente fórmula representa el modelo de la isoterma de Freundlich:

$$q = kC_e^{\frac{1}{n}} \quad (3-2)$$

Donde:

q : Representa la cantidad de soluto removido por unidad de masa adsorbente (mg/g).

k : Es el parámetro de capacidad de adsorción del material.

n : Es la constante relacionada con la afinidad entre el adsorbente y el soluto.

C_e : Es la concentración del soluto presente en el equilibrio (mg/L) (Lagua López, 2021, p.30).

La isoterma de Freundlich también se la puede representar mediante una ecuación linealizada con la siguiente expresión:

$$\ln q = \ln k + \frac{1}{n} \ln C_e \quad (4-2)$$

2.1.23. *Capacidad de adsorción*

La capacidad de la adsorción se puede calcular por medio de la siguiente ecuación:

$$q_e = \frac{V(C_0 - C_f)}{m} \quad (5-2)$$

Donde:

q_e : Representa la cantidad de adsorbato adsorbido en el equilibrio (mg/g).

C_0 y C_f : Son las concentraciones inicial y final, después del equilibrio (mg/L) de Hg en la solución.

V : Es el volumen de solución tomada (L).

m : Es la masa de adsorbente usado (g) (Llamuca Ñañañay, 2018, p.31).

2.1.24. Parámetros que influyen en la adsorción

2.1.24.1. Efecto de la temperatura

Es uno de los factores que influye en la velocidad de adsorción, debido a que la adsorción es una reacción exotérmica que se considera que mientras menor sea la temperatura, la capacidad de adsorción aumenta, en cambio, pequeños cambios de la temperatura no son relevantes en el proceso de adsorción, por lo que se puede señalar la dependencia de la temperatura con la velocidad de adsorción, se puede expresar con la energía de activación y a su vez la relación entre estas se describe mediante la ecuación de Arrhenius. Para determinar su efecto si varía la temperatura y se mantiene constante con otros parámetros fisicoquímicos como la concentración del colorante o adsorbato y el pH (Centeno Sánchez y Pomasqui Chacha, 2022, p.34).

2.1.24.2. pH

En las soluciones acuosas, se presenta un valor de pH el cual es uno de los factores que más predominan en el proceso de adsorción de cationes y aniones. Por lo tanto, para cationes el pH que favorece la adsorción se encuentre entre un rango mayor a los 4.5, en cambio para los aniones el pH que suele favorecer a la adsorción se encuentre entre un rango de 1.5 (Lagua López, 2021, p.26).

2.1.24.3. Tiempo de equilibrio

Los modelos de las isothermas de Langmuir y Freundlich han sido considerados como los mejores modelos que describen el equilibrio que ocurre en una adsorción, debido a que mediante el uso de las isothermas podemos evaluar la adsorción del metal pesado (Lagua López, 2021, p.26).

2.1.24.4. Cantidad de adsorbente

Es otro factor que influye en el proceso de adsorción, debido a que cuando se tiene mayor cantidad de adsorbente se obtendrán una mayor adsorción, sin embargo, se debe mencionar que es preciso llegar a obtener un equilibrio entre la cantidad de adsorbente utilizado y la concentración del metal que se desea adsorber (Lagua López, 2021, p.26).

2.1.25. Cinética de adsorción

La adsorción es un proceso que depende del tiempo, por lo tanto, es importante conocer su rapidez para el diseño y evaluación de adsorbentes. Para poder representar los modelos cinéticos de adsorción se pueden emplear dos criterios: la concentración de la solución y la cantidad del adsorbente. Además, para el análisis de los datos de adsorción es fundamental para el desarrollo de las ecuaciones de equilibrio y de cinética que pueden ser utilizadas para propósitos de diseño (Carrillo Mejía, 2021, p.27).

2.1.26. Modelos de cinética de adsorción

En un proceso de adsorción, existe una gran variedad de modelos cinéticos que se pueden utilizar para poder analizar los resultados experimentales que se obtienen por medio de la experimentación.

2.1.26.1. Modelo de Pseudo Primer Orden

Este modelo cinético nos sirve para indicar la variación que se produce en la tasa de adsorción, debido a que esta deberá ser proporcional a la primera potencia de concentración para una adsorción superficial (Landy Álvarez, 2022, p.23). El modelo lineal se lo puede expresar con la siguiente fórmula:

$$\log (Q_e - Q_t) = \log (Q_e) - \frac{k_1}{2.303} * t \quad (6-2)$$

Donde:

Q_e y Q_t : Representa la capacidad de adsorción en el equilibrio (mg/g).

t : Es el tiempo (min).

k_1 : Es la constante de adsorción (min^{-1}) (Landy Álvarez, 2022, p.23).

Si en este modelo no existe linealidad, a este se procede a aducirlo a la limitante de la difusión entre poros, a partir de la pendiente y el intercepto, aquí es donde podemos deducir los valores de k_1 y poder comprobar los datos experimentales de Q_e contra los datos teóricos (Landy Álvarez, 2022, p.23).

2.1.26.2. *Modelo de Pseudo Segundo Orden*

El modelo de pseudo segundo orden, es un modelo cinético que se encarga y relacionar la sorción química que existe entre el adsorbato y el adsorbente, por lo tanto, este depende de la capacidad de sorción del sólido (Landy Álvarez, 2022, p.24). Se expresa por la siguiente fórmula la ecuación lineal:

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} * t \quad (7-2)$$

Donde:

q_t : Representa la cantidad de metal adsorbido en un tiempo específico t (mg/g).

t : Es el tiempo (min).

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

k_2 : Es la constante de adsorción (g/mg-min) (Landy Álvarez, 2022, p.24).

Para poder deducir las constantes cinéticas de este modelo de pseudo segundo orden, se necesita graficar (t/q_t) vs (t). El resultado que se obtiene de esta gráfica nos dará una línea recta. Que parte de la pendiente y su intercepto, donde podemos deducir su concentración de equilibrio teórica, además de la constante de la ecuación. También se obtiene un valor de q_e teórico, el cual procedemos a comprar con el valor experimental de la medición, si este nos da resultados muy cercanos, sabemos que este modelo obedece al modelo de adsorción cinético de pseudo segundo orden (Landy Álvarez, 2022, p.24).

2.1.27. *Equilibrio de adsorción*

En el proceso de adsorción los detalles del equilibrio generalmente se los conoce como isothermas de adsorción, es decir, que describen el comportamiento de la interacción que existe entre el adsorbato y el adsorbente, además nos proveen información sobre la capacidad del adsorbente que se está estudiando. Dos de los modelos, el de Langmuir y el de Freundlich, cada uno de estos usan dos constantes características, también son estudiadas para este sistema de adsorción (Carrillo Mejía, 2021, pp.30-31).

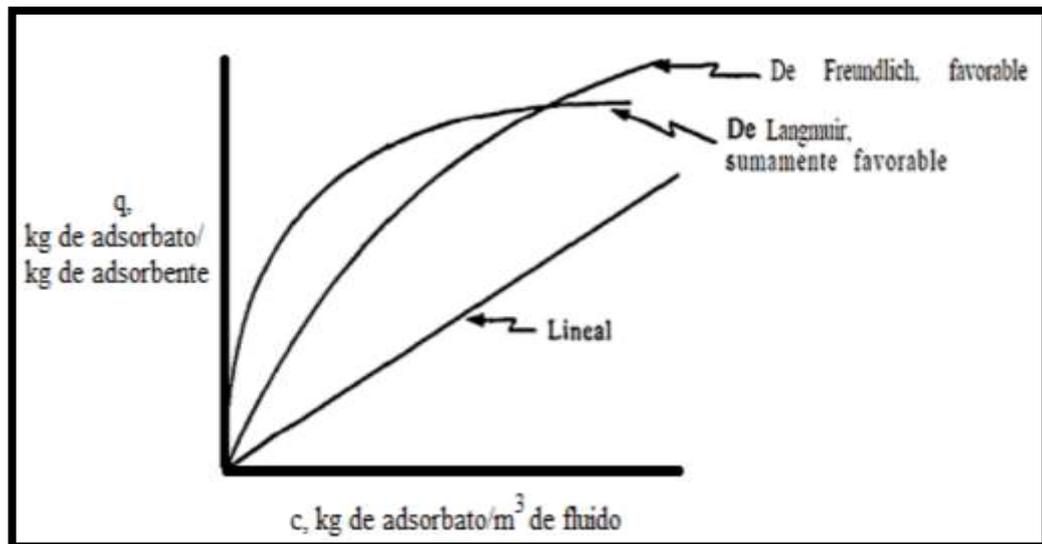


Ilustración 12-2: Isothermas de adsorción presentes en el equilibrio

Fuente: (Carrillo Mejía, 2021, p.27)

2.1.28. Termodinámica de adsorción

Con el fin de desarrollar un proceso que tenga un modelo eficaz y preciso para la eliminación de contaminantes en medio acuosos, los investigadores usan parámetros como: la cinética de adsorción, el equilibrio de adsorción y las ecuaciones termodinámicas, requisitos básicos esenciales. Por tal razón, la termodinámica de adsorción nos permite observar una compensación o descompensación de entalpía o entropía que se produce en una reacción química (Delgado Mendoza, 2021, p.30).

Para poder obtener información de los cambios de energía que se presenta en el proceso de adsorción de MB en nanoláminas rGO, se terminan los parámetros termodinámicos, es decir, la variación de la energía libre de Gibbs estándar (ΔG_0), el cambio de entalpía (ΔH_0) y el cambio de entropía (ΔS_0) (Arias et al., 2020, p.12). Por lo que se utiliza las siguientes ecuaciones:

$$k_d = \frac{q_e}{C_e} \quad (8-2)$$

$$\ln k_d = \frac{\Delta S_0}{R} - \frac{\Delta H_0}{RT} \quad (9-2)$$

Donde:

k_d : Es el coeficiente de distribución.

T : Es la temperatura.

R : Es la constante de los gases ($R = 8.314 \text{ J/mol-K}$).

ΔH_0 y ΔS_0 : Se calculan a partir de la pendiente y la intersección de Van't Hoff y la gráfica es de $\ln k_d$ como función de T_1 (Arias et al., 2020, p.12).

2.1.28.1. *Energía libre de Gibbs*

La energía libre de Gibbs (ΔG_0) nos indica la espontaneidad de una reacción química, se la puede determinar mediante la siguiente ecuación:

$$\Delta G_0 = -RT \ln (k) \quad (10-2)$$

Donde:

R : Es la constante universal de los gases.

k : Es la constante en equilibrio (Delgado Mendoza, 2021, p.30).

La energía libre de Gibbs tiene como resultados valores positivos y negativos, lo cual no ayuda a confirmar la espontaneidad o no espontaneidad del proceso de adsorción. El cambio de entalpía (ΔH_0) nos indica si existe una liberación de energía o existe una succión en la adsorción, lo que nos demuestra si es un proceso endotérmico o exotérmico. Otro parámetro para poder conocer la termodinámica de adsorción es el cambio de entropía (ΔS_0), lo que nos expresa si la aleatoriedad aumenta, es decir, tenemos valores positivos o al contrario estos disminuye, por lo tanto, muestra valores negativos, en el proceso de adsorción (Delgado Mendoza, 2021, p.30).

Los estudios termodinámicos de adsorción podemos calcular mediante ecuaciones, sin embargo, la mayoría de los estudios, los autores que investigan el proceso de adsorción mediante el uso de la termodinámica, toman como valor referencial al coeficiente de correlación R^2 . Para poder estimar el valor de la energía libre de Gibbs, se toma como dato k es decir, la variable constante en equilibrio. En cambio, si usamos ΔG_0 , podemos estimar que k_L como la constante en equilibrio, la cual es obtenida de la isoterma de Langmuir. El cálculo de ΔG_0 en la isoterma de Langmuir es factible para los adsorbatos o adsorbatos neutros que tienen una carga muy débil. Finalmente, se determina como resultado que la variable k , es mostrada de manera adimensional multiplicando este valor por el número de unidades de moles por litro de la solución (Delgado Mendoza, 2021, pp.30-31).

De tal manera que la energía libre de Gibbs, se puede calcular mediante la siguiente fórmula:

$$\Delta G_0 = -RT \ln \left[\frac{k_L}{y_e} * \left(\frac{\text{mol}}{L} \right) \right] \quad (11-2)$$

Donde:

y_e : Es el coeficiente de actividad.

k_L : Es la constante de equilibrio de la isoterma (Delgado Mendoza, 2021, p.31).

Los valores que se usan para los modelos de ecuaciones termodinámicas son C_e (mg/L) y Q_e (mg/g) que se sabe que son las concentraciones en fase líquida y la cantidad de soluto adsorbido en el equilibrio, respectivamente, b_L (L/mol) del modelo de la isoterma de Langmuir, Q_e/C_e es la proporción donde Q_e es adsorbido debido a la concentración (mg/L) y C_e es el residuo debido a la concentración en solución (mg/l), Q_m es calculado de las constantes de la isoterma de Langmuir y es la capacidad máxima de adsorción en mg/g y b_L esta en unidades de (L/mg), k_0 puede ser evaluado graficando $\ln(Q_e/C_e)$ vs q_e (Delgado Mendoza, 2021, p.31).

2.1.29. Estudios dinámicos de columna

2.1.29.1. Estudio continuo de adsorción en lecho fijo

En el mecanismo de adsorción y la curva de penetración de Cd (II) y Cu (II), nos dicen que procede a determinar mediante estudios continuos de adsorción en columnas de lecho fijo. En donde se realizaron estudios en una columna de vidrio acrílico que posee un diámetro interno de 1.1 y 50 cm de longitud. Además, colocaron una capa de lana de vidrio de 1 cm de espesor para la parte inferior de la columna, con el fin de evitar que el adsorbente se filtrara hacia el área de salida o de drenaje, así también colocaron en la parte superior de la columna para poder proporcionar un flujo uniforme de la solución que atravesará la columna (Aziz et al., 2014, p.3).

El POFA que usaron como materia prima, empaquetaron en la columna una cantidad específica para poder producir una profundidad de lecho necesaria de 1, 1.5 y 2 cm, que es equivalente a 0.5, 0.75 y 1 g de POFA. La concentración de las soluciones de Cd y Cu fue de 5, 10 y 20 mg/L, con un pH de 6.7 y 5.1, respectivamente, después procedieron a bombear de un modo de flujo descendente con una velocidad de flujo constante de 5 mL/min, mediante la utilización de una bomba peristáltica (*Maxterflex, Cole-Parmer Instrument Co., USA*) (Aziz et al., 2014, p.3).

Las muestras que se iban recogiendo a la salida de la columna, su recolecta fue realizada en intervalos de tiempo regulares y la columna se puso a funcionar hasta que la concentración de los efluentes metálicos superase el 99,5% de su concentración inicial. Las muestras se midieron

utilizando un espectrómetro de masas de plasmas acoplado inductivamente (*ICP-MS, ELAN DRC-e, PerkinElmer, USA*). Estos experimentos se llevaron a cabo a una temperatura ambiente constante (30 °C), sin embargo, no se optó por ajustar el pH y esté almacenado a 4 °C antes de realizar el análisis. Todos los métodos fueron adaptados del método estándar para el análisis de agua y aguas residuales (Aziz et al., 2014, p.3).

Los estudios de adsorción que se realizan en una columna de lecho fijo no funcionan bajo condiciones de equilibrio, esto se debe a que de forma continua ingresa a la columna una solución de alimentación, es decir, que se establece un proceso de transferencia de masa de forma permanente entre la fase móvil que por lo general contiene el adsorbible y una fase sólida del lecho adsorbente, debido a estas condiciones este tipo de estudios se aplican más para el tratamiento de aguas residuales (Valencia Ríos y Castellar Ortega, 2013, p.143).

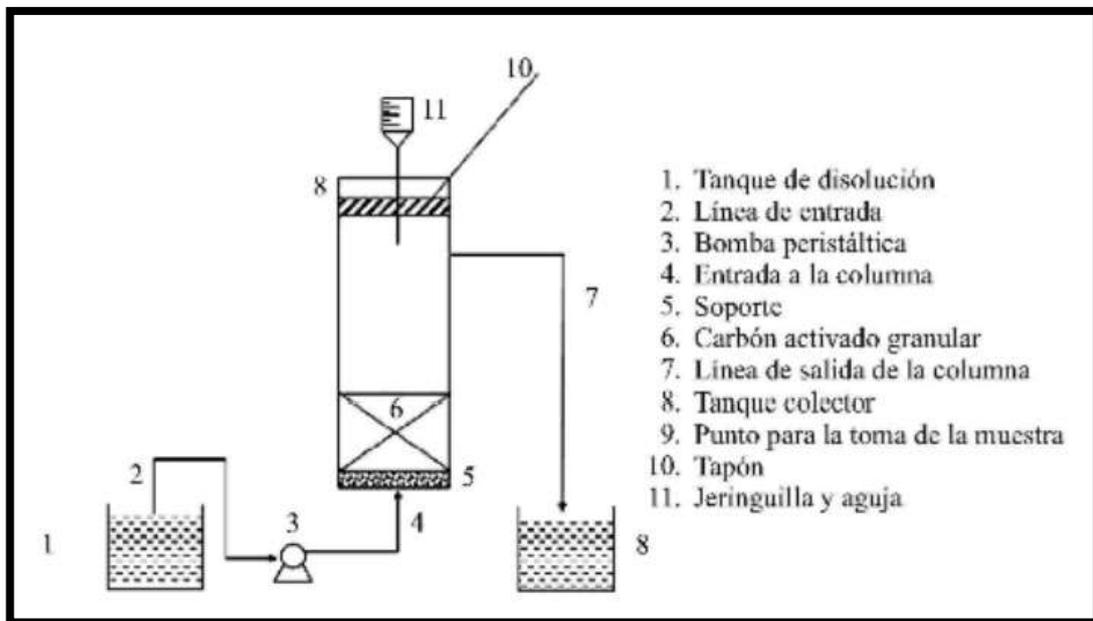


Ilustración 13-2: Esquema de la columna de lecho fijo

Fuente: (Valencia Ríos y Castellar Ortega, 2013, p.146).

2.1.29.2. Adsorción dinámica

La adsorción dinámica es aquella operación que se efectúa entre varias sustancias, ya sea en forma gaseosa o como disoluciones, por lo cual se han generado y también se han propuestos modelos que se han logrado obtener de manera empírica, un caso especial es el que se desarrolló con el propósito de poder interpretar la eliminación de cloro presente en corrientes de aire que usan cartuchos de carbón activado, este se lo conoce como Modelo de Bohart y Adams, el cual nos dice que se asume la velocidad de adsorción y la cual es proporcional a la capacidad de adsorción

del carbón activado granular (GAC) y a la concentración del adsorbible. En conclusión, este modelo nos presenta un acercamiento simple al funcionamiento y además poder evaluar los sistemas de remoción de un lecho fijo o de columnas (Rojas et al., 2012, pp.22–23). Este modelo Bohart y Adams se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$\ln \left[\left(\frac{C_0}{C_e} \right) - 1 \right] = \ln \left(e^{\frac{kN_0Z}{u}} - 1 \right) - kC_0t \quad (12-2)$$

Donde:

k : Es la constante de la velocidad de adsorción.

N_0 : Es la capacidad de adsorción.

Z : Es la altura del lecho fijo del adsorbible.

u : Es la velocidad del flujo lineal.

t : Es el tiempo de servicio de la columna.

C_0 y C : Son, respectivamente, la concentración del adsorbible a la entra del lecho fijo y a la salida de la columna, a un tiempo t (Rojas et al., 2012, pp.22–23).

2.2. Referencias Teóricas

- **Carbón activado:** Es un adsorbente de carácter variado, debido a que al variar sus condiciones de activación se puede controlar su tamaño, distribución de sus poros en la estructura carbonosa, además también se puede modificar sus propiedades en base al agente activante que se utilice con el fin de mejorar sus propiedades de adsorción (Vera Gaskell y Morocho Chuchuca, 2015, p.4).
- **Adsorción:** Es un fenómeno fisicoquímico donde átomos, moléculas y/o iones se adhieren a la pared externa del adsorbente, en nuestro caso del carbón activo funcionalizado (Tubert y Talanquer, 2018, p.186).
- **Adsorbato:** Es el átomo, molécula y/o iones las mismas que se van encontrar en la parte externa del adsorbente, en nuestro proyecto el adsorbato será el mercurio (II) y el adsorbente será el carbón activo funcionalizado (Sánchez y Cameselle, 2017, p.19).
- **Adsorbente:** Es un material sólido que es capaz de retener en su superficie átomos, moléculas y/o iones, en nuestro proyecto el adsorbente es el carbón activo funcionalizado ya que en su superficie se pretende retener mercurio (II) (Real Academia Española y ASALE, 2022a, p.1).
- **Adsorción dinámica:** Hace referencia al proceso de adsorción mediante carbón activado de fluidos en movimiento esto quiere decir que el Adsorbato se encontrará en movimiento con un determinado caudal (De Prada Díaz y Gómez Hernández, 2014, p.15).

- **Adsorción estacionaria:** Hace referencia al proceso de adsorción mediante carbón activado de fluidos que no se encuentran en movimiento (Corzo y Ledesma, 2019, p.18).
- **Isotermas de adsorción:** Hace referencia al equilibrio a la cual se adsorbe el mercurio (II) sobre carbón activo funcionalizado a una temperatura constante (Real Academia Española y ASALE, 2022b, p.1).
- **Funcionalización de carbón activado:** En este proyecto se refiere a la adición de grupos funcionales cloruro al nanomaterial activado (carbón activo) con el fin de obtener carbón activo con características eficiente en el proceso de adsorción de mercurio (II) (Santiago Barahona, 2016, pp.6–7).

CAPÍTULO III

3. MARCO METODOLÓGICO

3.1. Enfoque de investigación

La presente investigación está enfocada en reducir cuantitativamente la contaminación ambiental causada por mercurio (II) en aguas provenientes de la industria minera, para lo cual realizaremos pruebas de adsorción de mercurio (II) mediante carbón activo funcionalizado con el fin de crear una base de investigación que pueda ser aplicada como un método de reducción de contaminación a escalas mayores en cualquier tipo de contaminación por mercurio (II).

3.2. Nivel de investigación

El nivel de investigación de este proyecto es netamente de laboratorio ya que todas las pruebas encaminadas a la obtención de resultados positivos de adsorción se lo llevarán a cabo dentro de los laboratorios de la facultad de ciencia de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

3.3. Diseño de investigación

Para llevar a cabo la investigación tomaremos en cuenta las siguientes pruebas y que se detalla en las siguientes tablas.

3.3.1. Pruebas estacionarias

Tabla 1-3: Parámetros para la prueba estacionaria de tiempo de contacto

Tiempo de contacto	N° de temperaturas	Masa de carbón activado funcionalizado	N° de repeticiones	Tiempo (min)	Total
P	3	1 gramo	1	Inicial	45 muestras
				2	
				5	
				7	
				8	
				10	
				15	
				20	
				25	
				30	

				45	
				60	
				120	
				180	
				240	

Realizado por: Chuto K., Guamán B., 2023.

Tabla 2-3: Parámetros para la prueba estacionaria de isotermas

Isotermas	N° de temperaturas	Masa de carbón activado funcionalizado	N° de repeticiones	Concentración (mg/L)	Total
P	3	1 gramo	1	Inicial	27 muestras
				1	
				5	
				10	
				15	
				20	
				25	
				30	
				50	

Realizado por: Chuto K., Guamán B., 2023.

Tabla 3-3: Parámetros para la prueba estacionaria de pH

Prueba estacionaria pH	Masa de carbón activado funcionalizado	N° de repeticiones	pH	Total
P	1 gramo	1	Inicial	9 muestras
			2	
			3	
			4	
			5	
			6	
			7	
			8	
			10	

Realizado por: Chuto K., Guamán B., 2023.

Tabla 4-3: Parámetros para la prueba estacionaria de masa adsorbente

Masa adsorbente	Concentración	N° de repeticiones	Masa (g)	Total
P	2 ppm	1	0.3	5 muestras
			0.5	
			0.8	
			1	
			1.25	

Realizado por: Chuto K., Guamán B., 2023.

Tabla 5-3: Parámetros para la prueba estacionaria de punto isoeléctrico

Prueba estacionaria punto isoeléctrico	Concentración	Repeticiones	Masa (g)	Total
P	10 ppm	1	1	1 muestra

Realizado por: Chuto K., Guamán B., 2023.

3.3.2. Prueba dinámica

Tabla 6-3: Parámetros para la prueba dinámica

Prueba dinámica	Masa (kg)	Caudal	Repeticiones	Concentración (mg/L)	Tiempo (horas)	Total, muestras
P	1	2	1	10 ppm	Inicial	34 muestras
					0.30	
					0.60	
					0.90	
					1	
					2	
					3	
					4	
					5	
					6	
					7	
					8	
					10	
					12	
					15	
18						
24						

Realizado por: Chuto K., Guamán B., 2023.

3.3.3. Según la manipulación o no de la variable independiente

Según el manejo de las variables como son: masa, tiempo y temperatura nuestro proyecto será experimental, ya que mediante cada una de las variables que manipulemos recopilaremos distintos datos para saber las condiciones en las que la adsorción es más favorable.

Tabla 7-3: Variables de la investigación

Variable independiente	Variable dependiente
Concentración de Hg (II) en los estándares preparados.	Capacidad de adsorción de Hg (II) del carbón activado funcionalizado.

Cantidad de carbón activado funcionalizado usado para la adsorción.	Concentración final de Hg (II) en las aguas tratadas.
Tiempo de contacto en la adsorción.	Presencia de grupos funcionales en el carbón activado funcionalizado.
Tamaño de las partículas de carbón activado funcionalizado.	Eficiencia del carbón activado funcionalizado.
pH.	Rendimiento de la adsorción.
Temperatura.	

Realizado por: Chuto K., Guamán B., 2023.

3.3.4. Según las intervenciones en el trabajo de campo

Este trabajo de investigación es longitudinal ya que se realizarán pruebas con distintos tipos de variables mientras se realice las prácticas con el fin de recopilar datos en el periodo que dure la investigación.

3.4. Tipo de estudio

La investigación es experimental ya que se llevará a cabo todos los procesos de funcionalización de carbón activo y adsorción en los laboratorios de la Facultad de Ciencias, donde se realizará pruebas en estado estacionario y dinámico de adsorción de mercurio (II).

3.5. Población y planificación, selección y cálculo del tamaño de la muestra

La investigación que se realizará con muestras fortificadas con mercurio (II) a las mismas que someteremos a un proceso de adsorción en condiciones estacionarias y dinámicas. Y se corroborará los datos con una matriz proveniente de la industria minera.

3.6. Métodos, técnicas e instrumentos de investigación

La investigación de tipo experimental se realizó en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, que está situada en la ciudad de Riobamba, cabe recalcar que las pruebas de carácter estacionario y dinámico se realizaron en los siguientes laboratorios:

Tabla 8-3: Laboratorios de la ESPOCH

Laboratorio de Instrumental
Laboratorio de Investigación

Realizado por: Chuto K., Guamán B., 2023.

3.6.1. Prueba de contenido de mercurio

Para iniciar la investigación se procedió a realizar una prueba de contenido de mercurio de las muestras de carbón activo funcionalizado y no funcionalizado, en donde se utilizó 1 gramo de CA y 1 gramo CAF, posterior a esto se colocaron 250 mL de agua purificada en vasos de precipitación a la par se las colocó en continua agitación durante 3 horas a temperatura ambiente, al finalizar la agitación se tomaron alícuotas filtradas de 1 mL en tubos falcon aforadas con agua purificada, finalmente se procedía a leer el contenido de mercurio en el generador de hidruros.

3.6.2. Prueba piloto del proceso de funcionalización

Para iniciar con la investigación se realizó una prueba piloto del proceso de funcionalización, donde se usó 10 gramos de materia prima de carbón activo comercial, después se homogeniza con una solución de 50 mL de ácido clorhídrico (37%) durante 48 horas, una vez transcurrido el tiempo se procedió a filtrar con el uso de una bomba de vacío, realizando varios lavados con agua destilada con el fin de neutralizar el pH ácido de la muestra, posteriormente se procedió a colocar la muestra de carbón activo en una solución de cloruro de cobre al 12 % (m/V) aproximadamente por 6 horas a una temperatura de entre 65-70 °C, terminado el tiempo de funcionalización se filtra una vez más con la bomba de vacío, luego se separó la muestra de carbón activo funcionalizado y colocamos en un crisol a secar en una estufa a 105 °C durante 24 horas.

3.6.3. Prueba de remoción de mercurio de la muestra piloto de funcionalización

A las muestras funcionalizadas se procedió a realizar una prueba piloto de adsorción de Hg^{+2} utilizando el instrumento de Absorción Atómica *Thermo Fisher iC300 Series* con generador de hidruros VP100 mediante la técnica de vapor frío 3500-Hg *Estandar Methods*, para lo cual se prepararon tres estándares de Hg^{+2} en un rango de concentración de 100, 500 y 1000 ppb a partir de una solución madre de 1000 ppm como agentes reductores se utilizó Borohidruro de sodio al 0.5% (m/V) y ácido clorhídrico 10% (V/V); se tomó 50 mL de estas soluciones estándares colocándoles separadamente en 6 tubos falcon añadiendo 0.1 gramos de carbón activado comercial en los tres primeros tubos y 0.1 gramos de carbón activado funcionalizado en el resto, posteriormente se colocaron en agitación durante 4 horas, una vez concluido el tiempo se procedió a filtrar las muestras para eliminar sólidos residuales y determinar la concentración de mercurio.

3.6.4. Preparación y caracterización del carbón activo impregnado con cloruro

Una vez concluida la prueba piloto de funcionalización y remoción, se preparó la materia prima que se utilizará en la investigación, en donde para incrementar la selectividad del carbón activado (CA) hacia el mercurio, este se impregnó con grupos funcionales cloruro, mediante el contacto del carbón activo con una solución 12% (m/V) de cloruro de cobre, cabe recalcar que previamente la materia prima se homogenizó con ácido clorhídrico concentrado al 37%, por lo cual se utilizó para este proceso 1 kilogramo de CA y 5 litros de ácido clorhídrico concentrado, una vez concluido el tiempo se filtró con bomba de vacío, además, de realizar lavados con agua destilada para eliminar residuos contaminantes del CA, después se hizo reaccionar con 1.2 kilogramos de cloruro de cobre en una solución de 10 L de agua destilada a 65 °C durante 6 horas, luego procediendo nuevamente a filtrar, finalmente se secó la muestra obtenida a 105 °C en la estufa durante 24 horas.

La caracterización del carbón activo se procedió a realizar por medio de métodos espectroscópicos como la Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier (*JASCO FT / IR-4100*) y el análisis por Microscopia Electrónica de Barrido (SEM), tanto para el carbón activo funcionalizado y no funcionalizado con el objetivo de observar las características de superficie y estructura.

3.6.4.1. Espectrofotometría de infrarrojo (IR)

Se procede a limpiar el equipo con el fin de eliminar cualquier contaminante se requiere de 60 minutos para su calibración, mediante el software multiplataforma *Spectra Manager™* se procede a realizar el análisis de cada material colocando en el porta muestras del instrumento aproximadamente 0.3 g de CAF y se procede a su análisis el mismo procedimiento se lo realiza con la CA, obtenidos los espectros moleculares de infrarrojo de las muestras en estudio se analiza los picos del espectro con su respectivo número de onda para la identificación de los grupos funcionales en la materia.

3.6.4.2. Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)

Para el análisis SEM o microscopía electrónica de barrido, se acondiciona al instrumento siguiendo el manual de operaciones dadas por el técnico de laboratorio de la universidad Técnica de Ambato, después se tomó una alícuota de las tres muestras de CA, CAF y CAF más mercurio adsorbido las muestras fueron colocadas en una cinta doble faz de carbono, en el análisis se

observó el tamaño de partícula principalmente en el tamaño de los poros del material, los resultados se procesaron mediante imágenes con ampliaciones en un rango de 20 μm – 200 μm .

3.6.5. Pruebas estacionarias

Una vez ya obtenida la materia prima, se realizó todas las pruebas estacionarias, de acuerdo a cada uno de los parámetros especificados anteriormente, cabe mencionar que para todas las pruebas estacionarias se utilizó 50 gramos de carbón activado funcionalizado en total, de acuerdo a los tiempos establecidos. Finalmente, procediendo a registrar los datos obtenidos, además, de proseguir con la lectura de cada una de las muestras en el generador de hidruros, con el objetivo de conocer la concentración final de mercurio.

3.6.5.1. Proceso experimental de la prueba de tiempo de contacto

Procedimiento:

- Se pesa 1 gramo de carbón activado funcionalizado, dependiendo de cada una de las temperaturas que se vaya a analizar.
- Se prepara el estándar de mercurio con una concentración teórica de 500 ppb en una solución de 250 mL (el número de recipientes dependerá de las temperaturas a analizar).
- Preparar el *Shaker* a una temperatura de 25, 30 y 35 °C, respectivamente.
- Adicionar el carbón activado funcionalizado en el estándar de mercurio anteriormente preparado.
- La solución homogeneizada colocar en el *Shaker* con una agitación de 150 r.p.m., tomar el tiempo a partir de iniciada la agitación.
- Tomar alícuotas de 2 mL de la solución con una micropipeta en los tiempos establecidos para el análisis, luego filtrar estas mediante el uso de filtros de jeringa de 0.45 μm , para eliminar sólidos residuales.
- Colocar alícuotas filtradas de 1 mL en tubos falcon de 15 mL y aforar con agua purificada hasta 10 mL.
- Preparar los estándares de mercurio que se utilizarán como reactivos para generar la curva de calibración del generador de hidruros.
- Finalmente, leer las muestras en el generador de hidruros.

3.6.5.2. *Proceso experimental de la prueba de isotermas de adsorción*

Procedimiento:

- Se pesa 0.2 gramos de carbón activado funcionalizado, dependiendo de cada una de las temperaturas que se vaya a analizar.
- Se prepara los estándares de mercurio de 40 mL en tubos falcon de 50 mL, a las concentraciones teóricas de ((0.1, 0.25, 0.5, 0.75, 1, 1.5 y 2) ppm), el número de muestras será acorde a cada temperatura de análisis.
- Preparar el *Shaker* a una temperatura de 25, 30 y 35 °C, respectivamente.
- Adicionar el carbón activado funcionalizado en los estándares de mercurio anteriormente preparados.
- A las muestras homogeneizadas colocar en el *Shaker* con una agitación de 150 r.p.m. durante un periodo de 4 horas.
- Tomar alícuotas de 2 mL de cada muestra con una micropipeta al finalizar el tiempo de agitación, después filtrar estas mediante el uso de filtros de jeringa de 0.45 µm, para eliminar sólidos residuales.
- Colocar alícuotas filtradas de 1 mL en tubos falcon de 15 mL y aforar con agua purificada hasta 10 mL.
- Preparar los estándares de mercurio que se utilizarán como reactivos para generar la curva de calibración del generador de hidruros.
- Finalmente, leer las muestras en el generador de hidruros.

3.6.5.3. *Proceso experimental de la prueba del efecto del pH sobre la capacidad de adsorción del carbón activo funcionalizado*

Procedimiento:

- Se pesa 0.2 gramos de carbón activado funcionalizado por cada una de las muestras que se vaya a analizar.
- Se prepara los estándares de mercurio de 10 mL en tubos falcon de 15 mL, a la concentración teórica de 1 ppm, el número de muestras será acorde a cada rango de pH requerido para el análisis.
- Preparar el Agitador Orbital *Shaker*.
- Medir el pH inicial de los estándares de mercurio.

- Adicionar el carbón activado funcionalizado en los estándares de mercurio anteriormente preparados.
- Volver a medir el pH de las muestras homogeneizadas.
- Ajustar el pH de las muestras, añadir gotas de ácido clorhídrico 0.1 M, si se necesita un pH ácido, en cambio, si se necesita un pH básico colocar gotas de hidróxido de sodio 0.1 N.
- A las muestras homogeneizadas, colocar en el Agitador Orbital *Shaker* con una agitación de 150 r.p.m. durante un periodo de 4 horas.
- Finalizado el periodo de agitación, medir el pH final de las muestras.
- Tomar alícuotas de 2 mL de cada muestra con una micropipeta, después filtrar estas mediante el uso de filtros de jeringa de 0.45 μm , para eliminar sólidos residuales.
- Colocar alícuotas filtradas de 1 mL en tubos falcon de 15 mL y aforar con agua purificada hasta 10 mL.
- Preparar los estándares de mercurio que se utilizarán como reactivos para generar la curva de calibración del generador de hidruros.
- Finalmente, leer las muestras en el generador de hidruros.

3.6.5.4. *Proceso experimental de la prueba de masa adsorbente*

Procedimiento:

- Se pesa ((0.3, 0.5, 0.8, 1 y 1.25) g) de carbón activado funcionalizado.
- Se prepara los estándares de mercurio de 40 mL en tubos falcon de 50 mL con una concentración teórica de 500 ppb.
- Preparar el *Shaker* a una temperatura de 25 °C.
- Adicionar las masas de carbón activado funcionalizado en los estándares de mercurio anteriormente preparado.
- Las muestras homogeneizadas, colocar en el *Shaker* con una agitación de 150 r.p.m. en un periodo de 4 horas.
- Finalizado el tiempo de agitación, tomar alícuotas de 2 mL de la solución con una micropipeta, luego filtrar estas mediante el uso de filtros de jeringa de 0.45 μm , para eliminar sólidos residuales.
- Colocar alícuotas filtradas de 1 mL en tubos falcon de 15 mL y aforar con agua purificada hasta 10 mL.
- Preparar los estándares de mercurio que se utilizarán como reactivos para generar la curva de calibración del generador de hidruros.
- Finalmente, leer las muestras en el generador de hidruros.

3.6.5.5. *Proceso experimental de la prueba de punto isoeléctrico*

Procedimiento:

- Se pesa 0.5 gramos de carbón activado funcionalizado, dependiendo cada una de las muestras que se vaya a analizar.
- Se prepara una solución de 50 mL de agua purificada en un matraz Erlenmeyer.
- Preparar el Agitador Orbital *Shaker*.
- Adicionar el carbón activado funcionalizado en la solución anteriormente preparada.
- Colocar en agitación de 150 r.p.m. durante un periodo de 2 horas en el Agitador Orbital *Shaker*.
- Finalizado el periodo de agitación, ajustar el pH de la muestra.
- Añadir gotas de ácido clorhídrico 0.1 M, si se necesita un pH ácido, en cambio, sí se necesita un pH básico, colocar gotas de hidróxido de sodio 0.1 N, a la muestra.
- A la par, medir el pH y el electrodo de potencial eléctrico cada vez que se añada el ácido y la base, comenzando desde un rango de pH de 2 a 11.

3.6.6. *Prueba dinámica*

Primero se procedió a limpiar muy bien la columna de lecho fijo, una vez seco el equipo, se procedió a preparar una solución de 1 ppm en un recipiente de 10 L, previamente se usó agua purificada con el fin de calcular el volumen y tiempo necesario para llenar el equipo. El llenado de la columna de lecho fijo se realizó dividiéndola en tres secciones: la primera se introdujo pequeñas esferas de vidrio hasta alcanzar un espesor de 3 cm en la columna, la segunda sección de colocó 100 g de CAF obteniendo 2 cm de espesor en la columna y en la tercera sección se añadió nuevamente las esferas de vidrio alcanzando un espesor de 3 cm, se procedió a confirmar que no existieran filtraciones, por tal razón se sellaba todas las salidas posibles por donde se pudiera producir fugas en el equipo, después se procedió a colocar la solución de alimentación, la cual era impulsada por una bomba peristáltica a un caudal de 7 mL/min para la primera prueba y un caudal de 15 mL/min para la segunda prueba los ensayos duraron 24 y 10 horas respectivamente. La toma de muestras se realizó a diferentes tiempos de acuerdo a lo especificado en la **Tabla 6-3**, una vez finalizado todo el proceso, se procedió a filtrar las muestras y colocando una alícuota de 1 mL en tubos falcon de 15 mL, para posteriormente leer las muestras en el generador de hidruros.

CAPÍTULO IV

4. MARCO DE ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

4.1. Prueba de contenido de mercurio (II) en el carbón activado funcionalizado

Como se puede observar en las siguientes tablas, se nos indica que la muestra de carbón activado comercial contiene una cantidad muy pequeña de mercurio, el cual se rige de acuerdo a los parámetros de fabricación del mismo, en cambio, la muestra de carbón activado funcionalizado no muestra ningún contenido de mercurio, el metal se elimina gracias a los continuos lavados realizados con agua ultra pura, lo cual nos indica que no afectará a la lectura de muestras que se analicen en el generador de hidruros.

Tabla 1-4: Resultados de la prueba de contenido de mercurio (II) del CA comercial

Muestra	Sustancia	Masa de carbón activado (g)	Resultado obtenido (ppm)
1	Agua	0	<0.002
2	Agua + carbón activado	0.2	0.002

Realizado por: Chuto K., Guamán B., 2023.

Tabla 2-4: Resultados de la prueba de contenido de mercurio (II) del CAF

Muestra	Sustancia	Masa de carbón activado funcionalizado (g)	Resultado obtenido (ppb)
1	Agua	0	<0.002
2	Agua + carbón activado funcionalizado	0.2	<0.002

Realizado por: Chuto K., Guamán B., 2023.

4.2. Obtención del material adsorbente para la investigación

Para esta investigación se necesitó una cantidad considerable de material adsorbente, en este caso es el carbón activado que se funcionalizó con la impregnación de cloruros, también cabe recalcar que se necesitó una cantidad grande de reactivos, los cuales se detalla en la **Tabla 3-4**, en donde se describen las cantidades de material obtenido después de la prueba piloto y el proceso de funcionalización:

Tabla 3-4: Resultados de la obtención de material adsorbente

Prueba piloto del proceso de funcionalización						
Material	Cantidad (g)	Reactivos	Cantidad (mL, g)	Solvente	Cantidad (L)	Cantidad resultante (g)
Carbón activado comercial	10 gramos	Ácido clorhídrico	50 mL	Agua destilada	5 L	6.01 gramos de carbón activado funcionalizado
		Cloruro de cobre	12 gramos			
Proceso de funcionalización						
Material	Cantidad (kg)	Reactivos	Cantidad (L, kg)	Solvente	Cantidad (L)	Cantidad resultante (g)
Carbón activado comercial	1 kilogramo	Ácido clorhídrico	5 L	Agua destilada	50 L	905.13 gramos de carbón activado funcionalizado
		Cloruro de cobre	1.2 kilogramos			

Realizado por: Chuto K., Guamán B., 2023.

De acuerdo con el proceso de síntesis del material funcionalizado se evidencia un rendimiento de un 60% al utilizar pequeñas porciones de CA, sin embargo, al utilizar una masa más grande de 1000 g de CA el rendimiento mejora hasta alcanzar el 90.5% de producto, lo que indica que los reactivos logran interactuar de mejor manera con el material al tener mayor área de contacto además la pérdida de producto final en el proceso de lavado disminuye al manejar mayor cantidad de material.

4.3. Prueba de remoción de mercurio (II) con carbón activado comercial

En la **Tabla 4-4**, podemos observar que al utilizar carbón activado comercial como material adsorbente en la prueba piloto de remoción de mercurio, se puede decir que se realiza de mejor manera, obteniendo como resultado la reducción casi total de la concentración de mercurio, esto se debe a que el carbón activado comercial en su estructura posee mayor cantidad de microporos libres que se encargan de adsorber de mejor manera las partículas del material que se requiera eliminar, en este caso para la remoción de mercurio.

Tabla 4-4: Resultados de la prueba de remoción de Hg de la muestra de carbón activado comercial

Muestra	Concentración de Hg (ppb)	Masa de carbón activado (g)	Resultado obtenido (ppb)	q _e (mg Hg ⁺² / g CA)
1	100	0.1	8.44	0.0366
2	500	0.1	6.86	0.1973
3	1000	0.1	11.62	0.3954

Realizado por: Chuto K., Guamán B., 2023.

4.4. Prueba de remoción de mercurio (II) con carbón activado funcionalizado con cloruros

De acuerdo con la **Tabla 5-4**, podemos observar que el proceso de adsorción con el material adsorbente que es el carbón activado funcionalizado no presenta una considerable reducción en la concentración de mercurio, esto se debe a que los microporos del carbón activado fueron ocupados por los iones de cloruro de cobre, lo que nos indica que se reduce su capacidad de adsorción, en comparación con el carbón activado comercial.

Tabla 5-4: Resultados de la prueba de remoción de Hg de la muestra de carbón activo funcionalizado

Muestra	Concentración de Hg (ppb)	Masa de carbón activado funcionalizado (g)	Resultado obtenido (ppb)	q _e (mg Hg ⁺² / g CA)
1	100	0.1	24.18	0.0303
2	500	0.1	295.90	0.0816
3	1000	0.1	917.91	0.0328

Realizado por: Chuto K., Guamán B., 2023.

4.5. Análisis infrarrojo del carbón activado comercial

El espectro infrarrojo que se muestra en la **Figura 1-4**, nos indica las bandas de absorción de los grupos funcionales que contiene la muestra de CA, el espectro que se observa posee un número de onda en un rango de 530 a 4000 cm⁻¹. Las bandas de absorción de 3448 cm⁻¹ y 3398 cm⁻¹ son característica del grupo funcional (OH) de alcoholes, es decir que nos indican un estiramiento muy ancho y una intensidad fuerte debido a su enlace (OH), cabe recalcar que ambas bandas de absorción son una sola, sin embargo, debido a interferencias se muestran como dos picos separados, cuando en realidad pertenecen a la misma banda de absorción. En cambio, la banda de absorción de 1639 cm⁻¹, nos indica la presencia de un doble enlace (C=O, C=C), debido a que presenta una intensidad débil, se puede considerar que pertenece a un grupo carboxílico y oximas (C=C). La banda de absorción de 1246 cm⁻¹, corresponde a un enlace simple (C-O, C-C), el cual representa al grupo funcional (C-C), ya que muestra una intensidad débil, en cambio, la banda de

absorción de 1049 cm^{-1} , es representado por un enlace simple y el cual corresponde a un enlace (C-N).

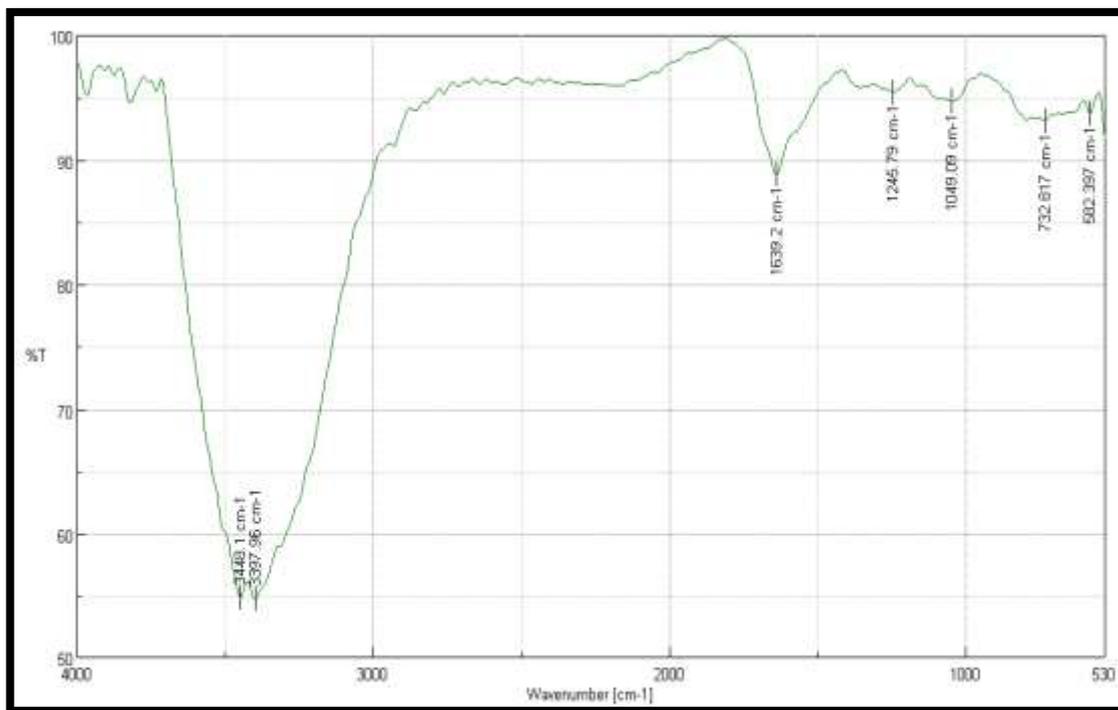


Ilustración 1-4: Espectro infrarrojo de la muestra de carbón activado comercial

Realizado por: Chuto K., Guamán B., 2023.

4.6. Análisis infrarrojo del carbón activado funcionalizado con grupos cloruro

El espectro infrarrojo que se muestra en la **Figura 2-4**, nos indica las bandas de absorción de los grupos funcionales que contiene la muestra de CAF, el espectro que se observa posee un número de onda en un rango de 530 a 4000 cm^{-1} . La banda de absorción de 3259 cm^{-1} es característica del grupo funcional (OH) de alcoholes, es decir que nos indican un estiramiento muy ancho y una intensidad fuerte debido a su enlace (OH), cabe recalcar que la banda de absorción se ve disminuida al comparar con el espectro del CA, esto se debe a la presencia de fenoles que por consecuencia reduce la capacidad de adsorción del CAF. Además, el pico de absorción en la región de aproximadamente 1595 cm^{-1} se debe a las vibraciones de estiramiento (C=C) en el anillo aromático que generalmente se encuentra en el material carbonoso, como el CA. La banda de absorción de 1423 cm^{-1} , corresponde a un enlace simple (-CH₃), el cual representa al grupo funcional (C-H), ya que muestra una intensidad media, en cambio, las bandas de absorción de 1207 cm^{-1} y 1107 cm^{-1} , representan al grupo funcional aminas, ya que poseen un enlace (N-H). La banda de absorción de 872 cm^{-1} , es representado por un enlace simple, el cual corresponde a un enlace (C-H). Finalmente, las bandas de absorción de 748 cm^{-1} y 629 cm^{-1} , representan al grupo

funcional cloruro (C-Cl). Los enlaces más importantes se encuentra en las bandas de absorción de 748 cm^{-1} y 629 cm^{-1} , debido a que representan a los grupos funcionales de cloruro, los mismos que son una parte fundamental para esta investigación.

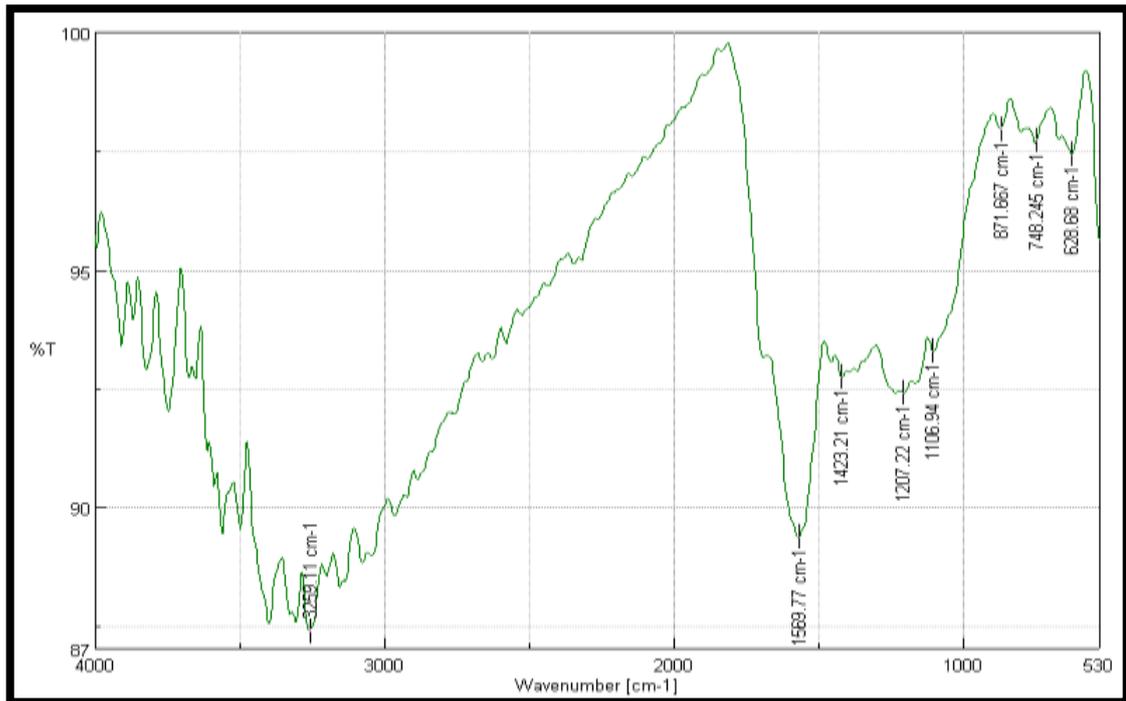
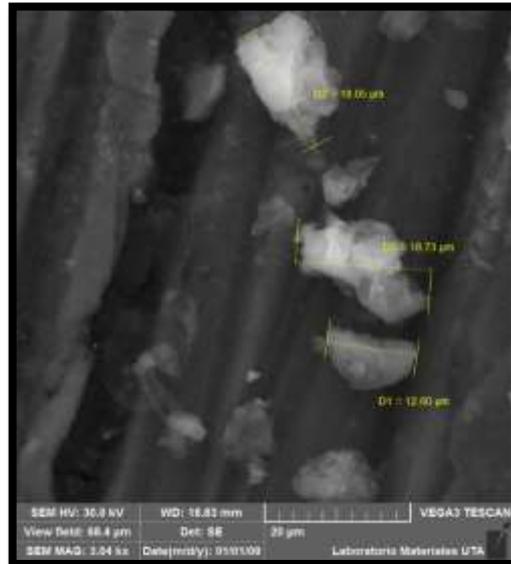


Ilustración 2-4: Espectro infrarrojo de la muestra de carbón activado funcionalizado con cloruros

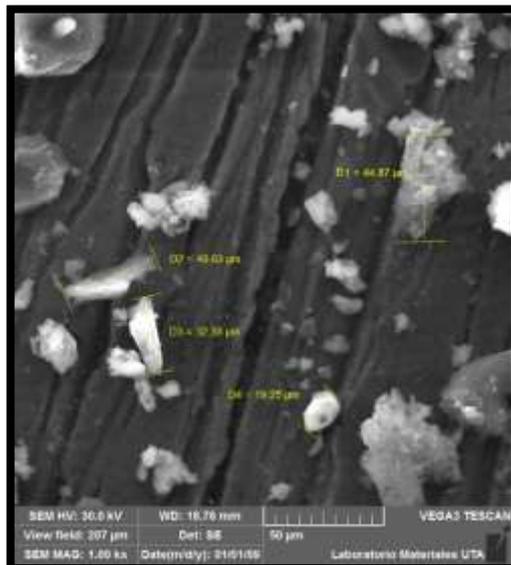
Realizado por: Chuto K., Guamán B., 2023.

4.7. Análisis de Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)

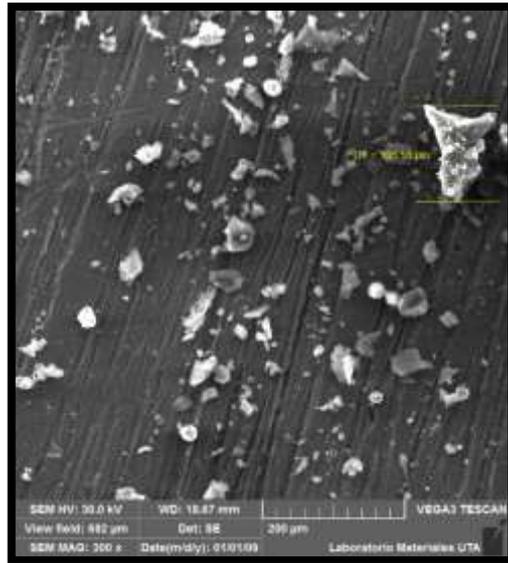
4.7.1. Carbón activado comercial



a) 20 μm



b) 50 μm



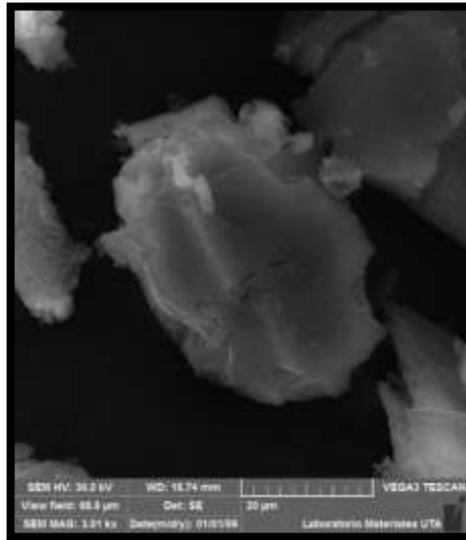
c) 200 μm

Ilustración 3-4: Análisis SEM de muestras de carbón activado comercial

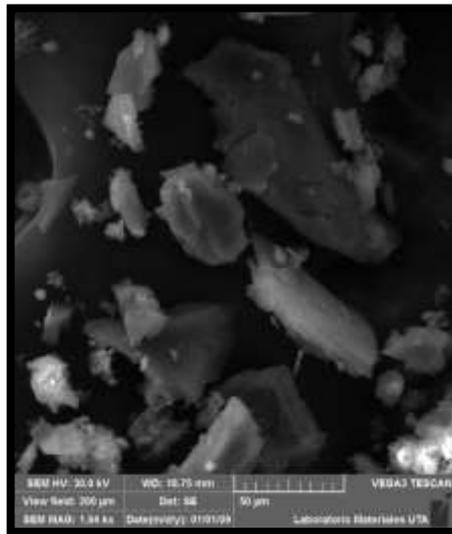
Realizado por: Chuto K., Guamán B., 2023.

En la **Ilustración 3-4** se muestra los estudios que se realizó mediante la microscopía electrónica de barrido, donde se observa las micropartículas del carbón activo comercial con una dimensión mínima encontrada de 12.60 μm y una dimensión máxima encontrada de 135.55 μm , lo que indica un material heterogéneo en estructura y porosidad.

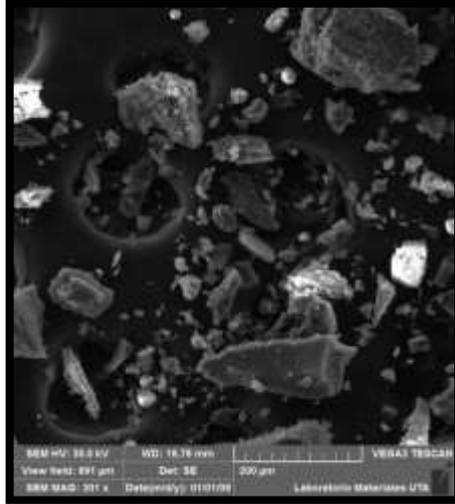
4.7.2. Carbón activado funcionalizado con grupos cloruro



a) 20 μm



b) 50 μm



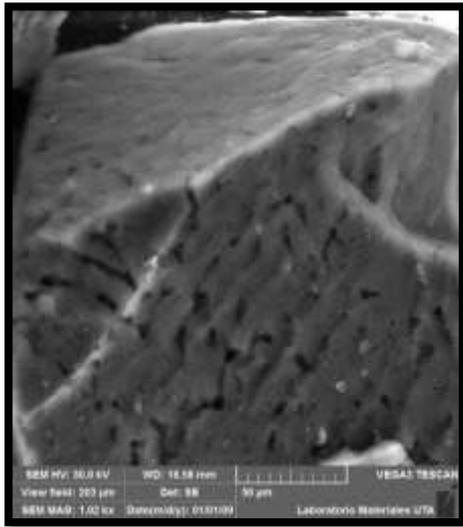
c) 200 μm

Ilustración 4-4: Análisis SEM de muestras de carbón activado funcionalizado

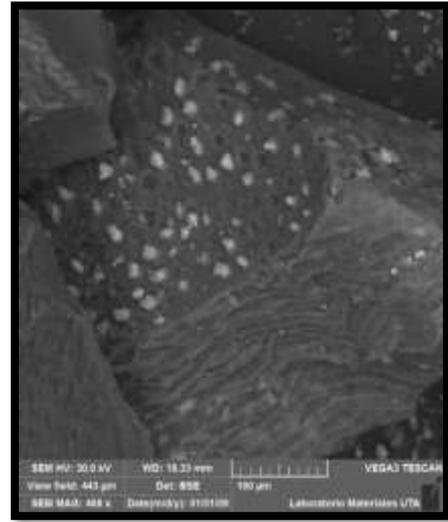
Realizado por: Chuto K., Guamán B., 2023.

En la presente **Ilustración 4-4**, se logra observar las partículas del carbón activo funcionalizado donde se puede apreciar de manera superficial los poros donde se realizan el proceso de adsorción, además se puede observar los cambios estructurales del proceso de funcionalización debido a la presencia de iones Cl^- ligados al material.

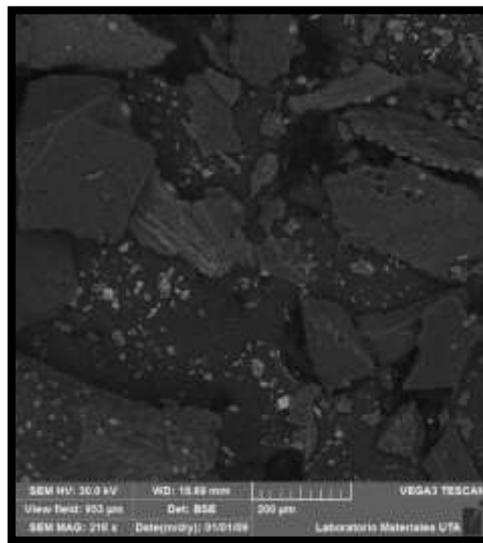
4.7.3. Carbón activado funcionalizado más mercurio (Hg^{+2})



a) 50 μm



b) 100 μm



c) 200 μm

Ilustración 5-4: Análisis SEM de muestras de carbón activado funcionalizado con mercurio

Realizado por: Chuto K., Guamán B., 2023.

En la **Ilustración 4-4**, se puede observar la morfología del carbón activo funcionalizado que fue sumergida en una solución estándar con Hg^{+2} , en la **Ilustración (a)** la toma más cercana de la muestra (50 μm) se nota que la superficie es rugosa y presenta poros característicos que son muy resaltables para el proceso de adsorción favoreciendo la remoción de mercurio en aguas.

4.8. Pruebas estacionarias

4.8.1. Prueba estacionaria de tiempo de contacto

4.8.1.1. Prueba a 25 °C de temperatura

Tabla 6-4: Resultados de la prueba de tiempo de contacto a 25 °C

N°	Tiempo de contacto (min)	Temperatura (°C)	Concentración de Hg y revoluciones	Masa de carbón activado funcionalizado (g)	Resultado obtenido (ppb)	Porcentaje de remoción (%)
1	Inicial	25	500 ppb 150 r.p.m.	1	400.95	0
2	0.5				399.24	0.43
3	2				350.57	12.57
4	5				291.36	27.33
5	10				233.88	41.67
6	20				189.88	52.64
7	40				118.73	70.39
8	60				81.81	79.60
9	80				49.47	87.66
10	100				38.37	90.43
11	120				36.86	90.81
12	150				35.78	91.08
13	180				34.79	91.32
14	240				34.38	91.42

Realizado por: Chuto K., Guamán B., 2023.

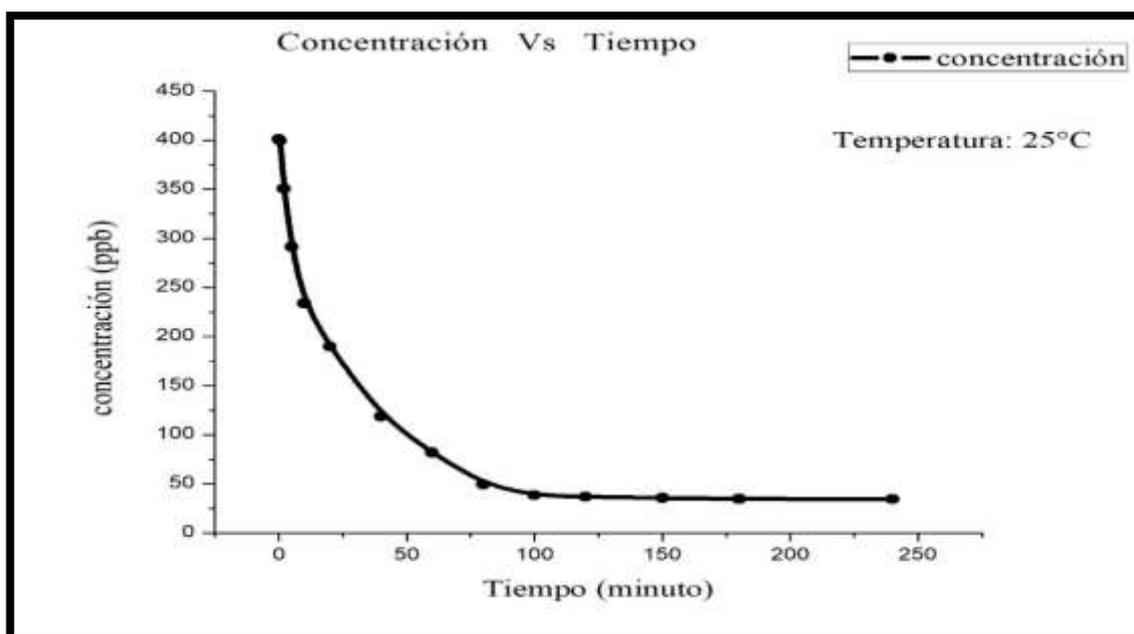


Ilustración 6-4: Concentración vs Tiempo a 25 °C

Realizado por: Chuto K., Guamán B., 2023.

En la **Tabla 6-4**, se puede ver que, en el transcurso de cuatro horas, con una temperatura de 25 °C, a 150 r.p.m. y con 1 gramo de carbón activado funcionalizado ha disminuido significativamente la concentración de mercurio de 400.95 ppb a 34.38 ppb donde el proceso de adsorción entra en equilibrio como se muestra en la **Ilustración 6-4**, reduciendo un 91.43% de la concentración de Hg^{+2} .

4.8.1.2. Prueba a 30 °C de temperatura

Tabla 7-4: Resultados de la prueba de tiempo de contacto a 30 °C

N°	Tiempo de contacto (min)	Temperatura (°C)	Concentración de Hg y revoluciones	Masa de carbón activado funcionalizado (g)	Resultado obtenido (ppb)	Porcentaje de remoción (%)
1	Inicial	30	500 ppb 150 r.p.m.	1	589.23	0
2	0.5				469.00	20.40
3	1				400.12	32.09
4	5				357.71	39.29
5	10				320.37	45.63
6	20				281.80	52.17
7	40				235.74	59.99
8	60				213.02	63.85
9	80				191.27	67.54
10	100				164.16	72.14

11	120				123.26	79.08
12	150				91.87	84.41
13	180				68.93	88.30
14	240				62.49	89.40

Realizado por: Chuto K., Guamán B., 2023.

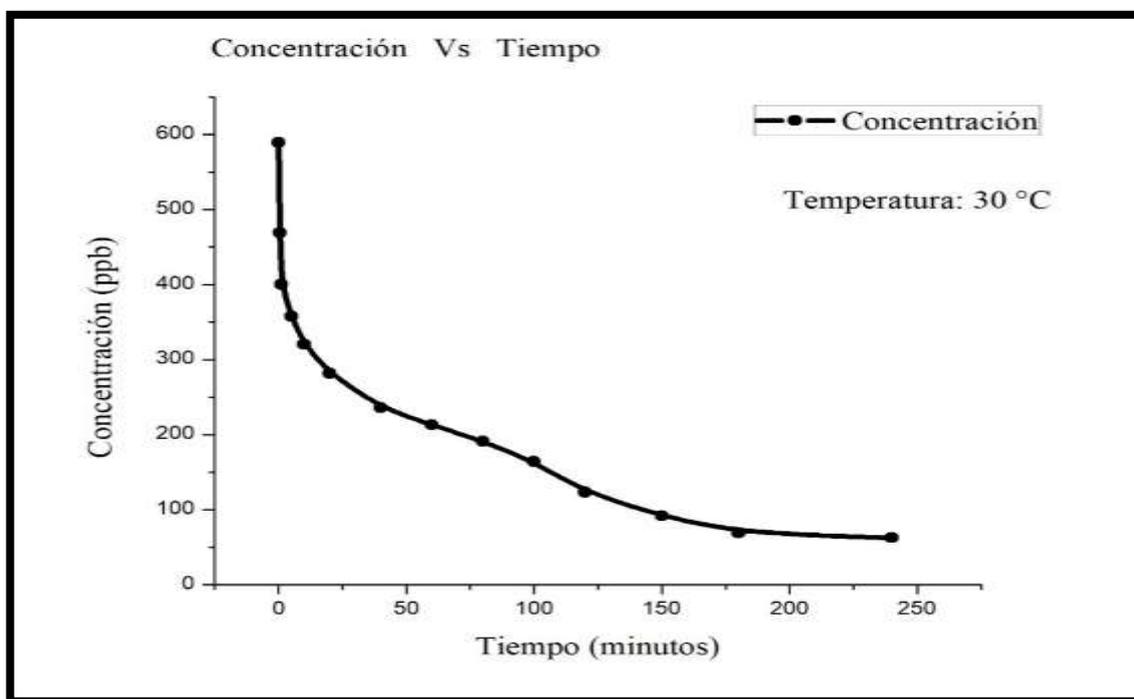


Ilustración 7-4: Concentración vs Tiempo a 30 °C

Realizado por: Chuto K., Guamán B., 2023.

En la **Tabla 7-4**, se puede ver que, en el transcurso de cuatro horas, con una temperatura de 30 °C, a 150 r.p.m. y con 1 gramo de carbón activo funcionalizado ha disminuido significativamente la concentración de mercurio de 589.23 ppb a 62.49 ppb donde el proceso de adsorción entra en equilibrio como se muestra en la **Ilustración 7-4**, reduciendo un 89.4% de la concentración de Hg^{+2} .

4.8.1.3. Prueba a 35 °C de temperatura

Tabla 8-4: Resultados de la prueba de tiempo de contacto a 35 °C

N°	Tiempo de contacto (min)	Temperatura (°C)	Concentración de Hg y revoluciones	Masa de carbón activado funcionalizado (g)	Resultado obtenido (ppb)	Porcentaje de remoción (%)
1	Inicial	35	500 ppb 150 r.p.m.	1	446.40	0
2	0.5				393.56	11.84
3	1				352.56	21.02
4	5				284.69	36.23
5	10				269.84	39.55
6	20				233.06	47.79
7	40				197.08	55.85
8	60				182.62	59.09
9	80				154.93	65.29
10	100				138.93	68.88
11	120				98.75	77.88
12	150				63.96	85.67
13	180				31.46	92.95
14	240				29.57	93.38

Realizado por: Chuto K., Guamán B., 2023.

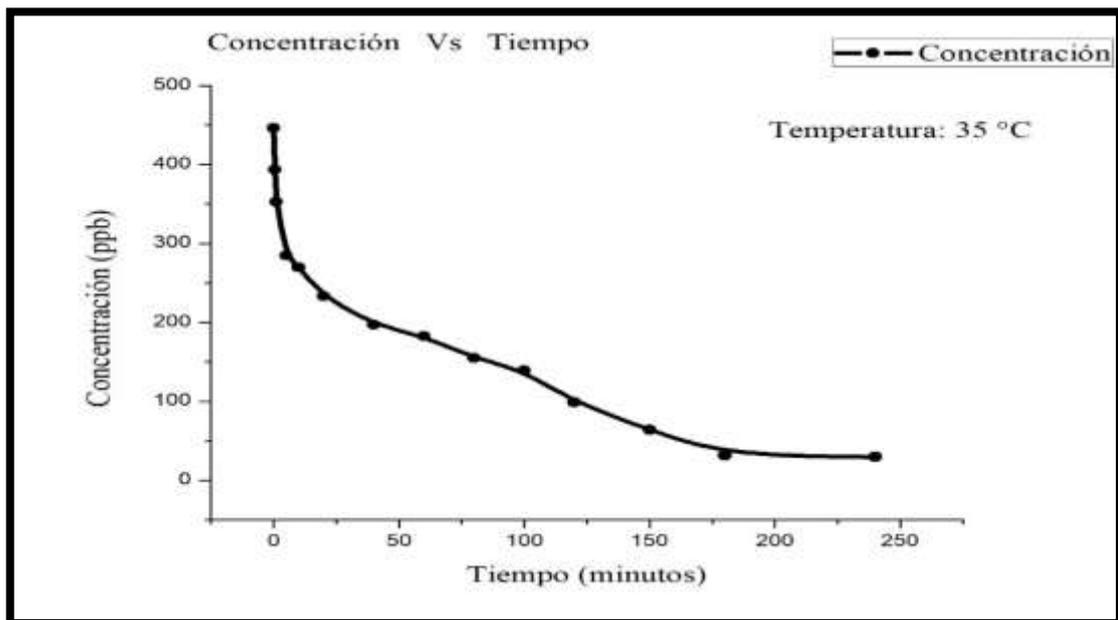


Ilustración 8-4: Concentración vs Tiempo a 30 °C

Realizado por: Chuto K., Guamán B., 2023.

En la **Tabla 8-4**, se puede ver que, en el transcurso de cuatro horas, con una temperatura de 35 °C, a 150 r.p.m. y con 1 gramo de carbón activo funcionalizado ha disminuido significativamente la

concentración de mercurio de 446.40 ppb a 29.57 ppb donde el proceso de adsorción entra en equilibrio como se muestra en la **Ilustración 8-4**, reduciendo un 93.38% de la concentración de Hg^{+2} .

De acuerdo con los resultados obtenidos en esta investigación, se observa que el material entra en equilibrio en un tiempo aproximado de cuatro horas lo que indica que los sitios activos se encuentran saturados logrando su máxima capacidad de adsorción, sin embargo, se pudo determinar que a una temperatura de 35 °C se obtuvo la concentración en equilibrio de mercurio más baja en comparación a las otras dos temperaturas presentando a esta temperatura el mayor porcentaje de remoción.

4.8.1.4. Cinética de adsorción

Para determinar la cinética de adsorción de la prueba de tiempo de contacto se procedió a aplicar los modelos cinéticos de pseudo primer y pseudo segundo orden, con el objetivo de determinar cuál modelo se acopla de mejor manera a cada una de las temperaturas de análisis, como se muestra a continuación en las siguientes gráficas.

- **Prueba a 25 °C de temperatura**

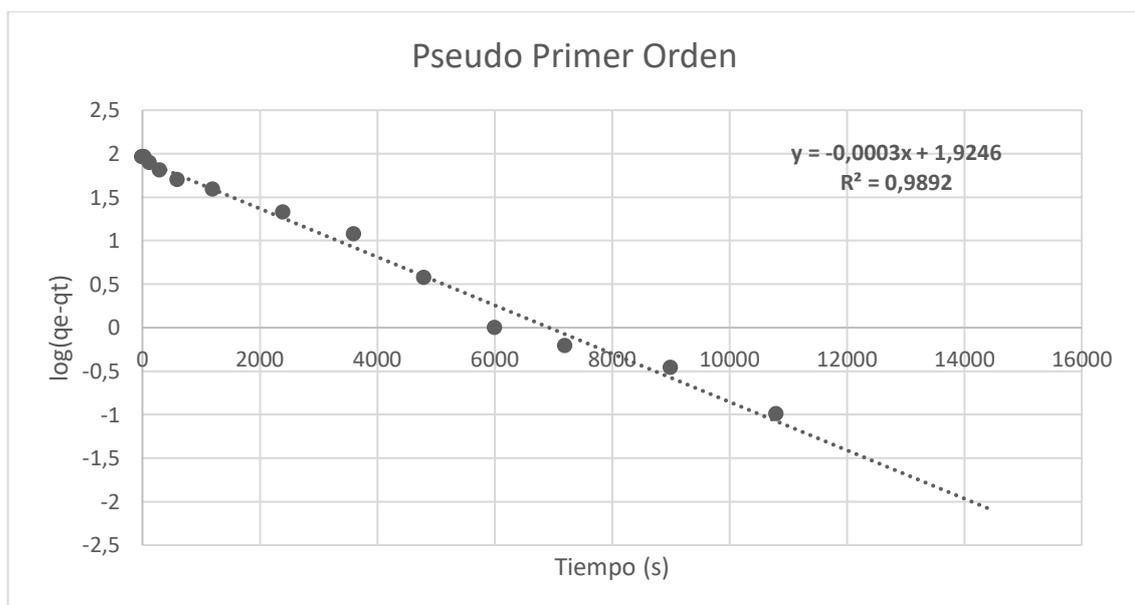


Ilustración 9-4: Cinética de adsorción de pseudo primer orden de mercurio (II) sobre carbón activo funcionalizado en función del tiempo de contacto a 25 °C

Realizado por: Chuto K., Guamán B., 2023.

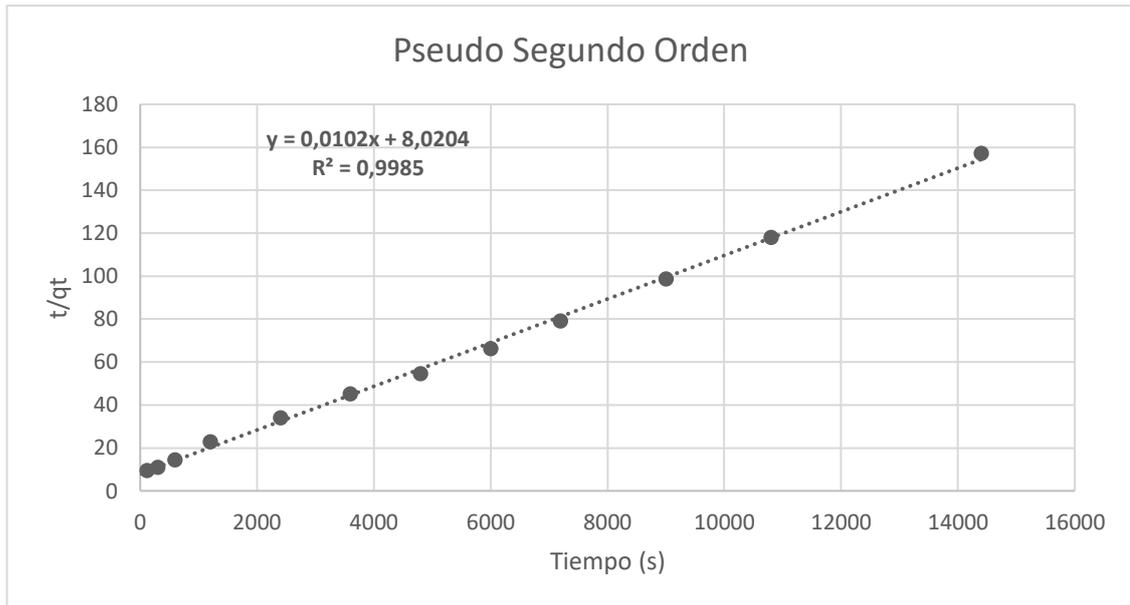


Ilustración 10-4: Cinética de adsorción de pseudo segundo orden de mercurio (II) sobre carbón activo funcionalizado en función del tiempo de contacto a 25 °C

Realizado por: Chuto K., Guamán B., 2023.

- Prueba a 30 °C de temperatura

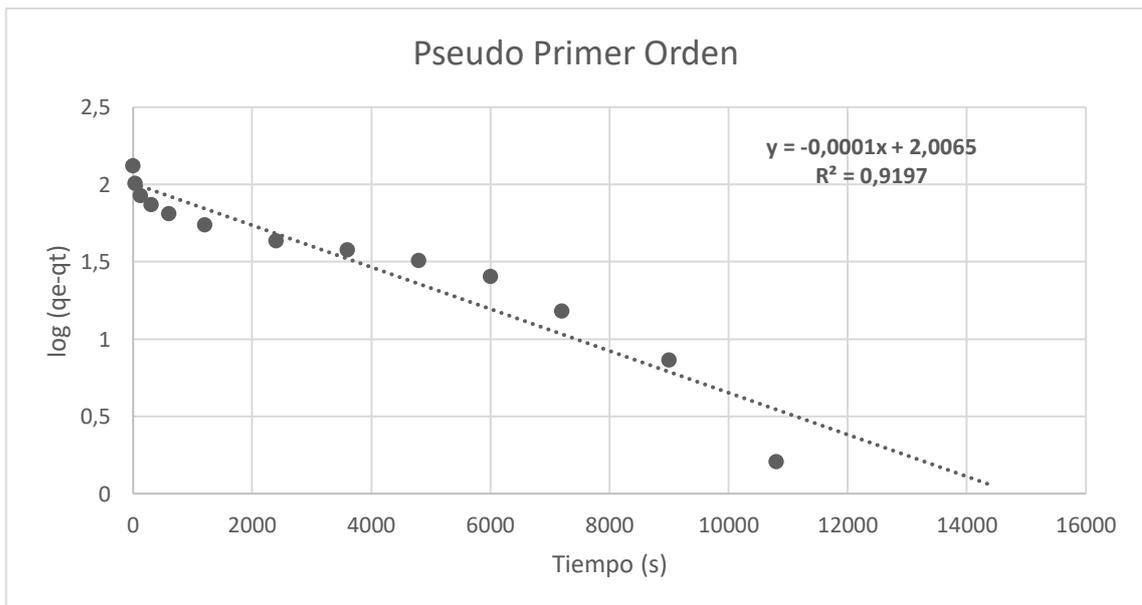


Ilustración 11-4: Cinética de adsorción de pseudo primer orden de mercurio (II) sobre carbón activo funcionalizado en función del tiempo de contacto a 30 °C

Realizado por: Chuto K., Guamán B., 2023.

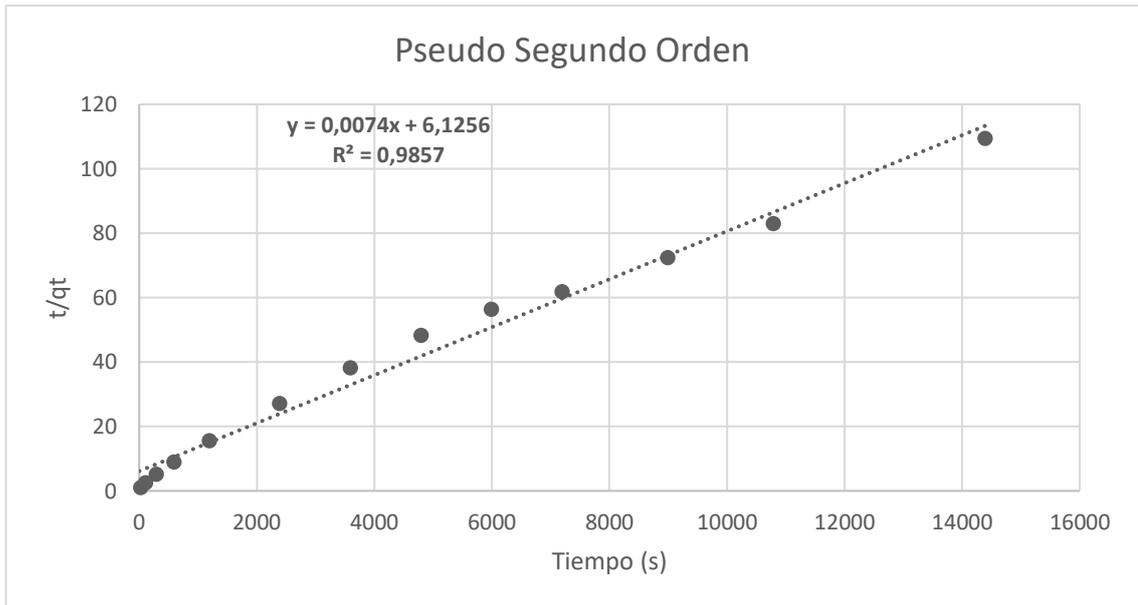


Ilustración 12-4: Cinética de adsorción de pseudo segundo orden de mercurio (II) sobre carbón activo funcionalizado en función del tiempo de contacto a 30 °C

Realizado por: Chuto K., Guamán B., 2023.

- **Prueba a 35 °C de temperatura**

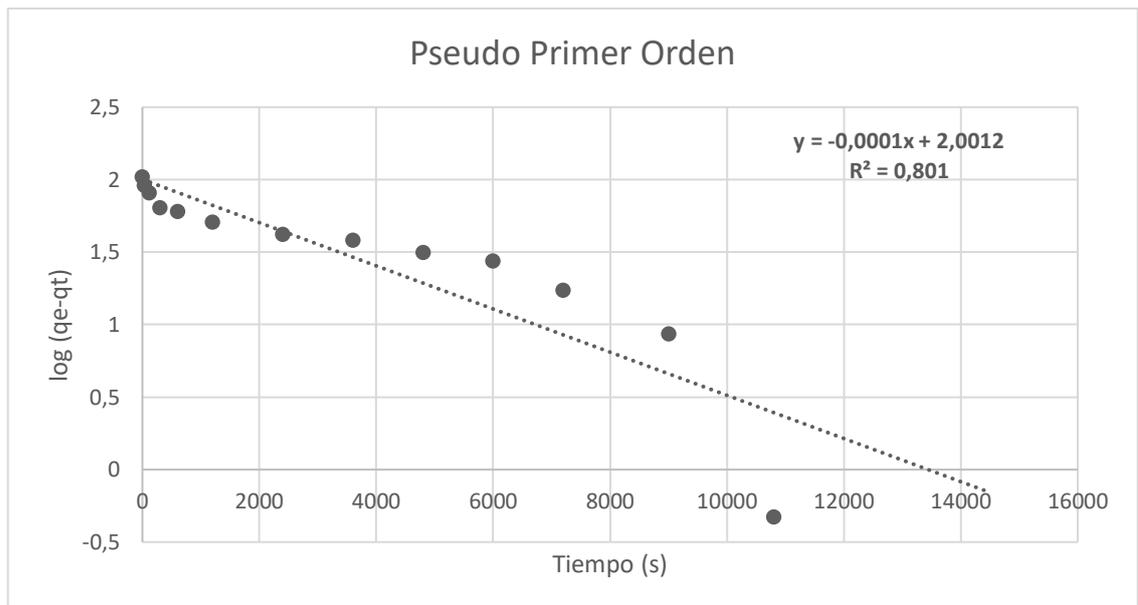


Ilustración 13-4: Cinética de adsorción de pseudo primer orden de mercurio (II) sobre carbón activo funcionalizado en función del tiempo de contacto a 35 °C

Realizado por: Chuto K., Guamán B., 2023.

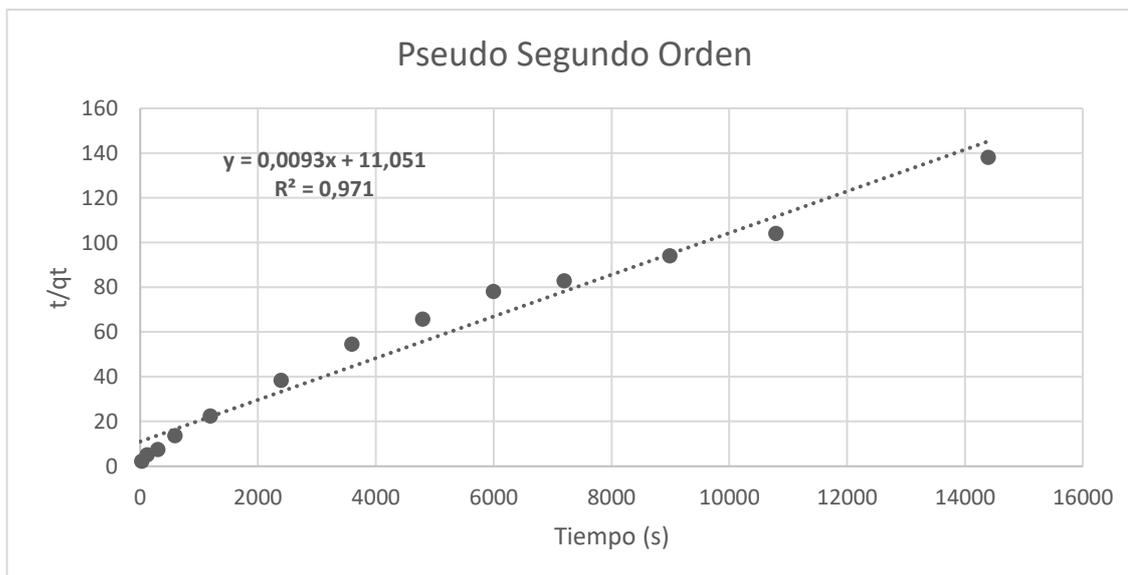


Ilustración 14-4: Cinética de adsorción de pseudo segundo orden de mercurio (II) sobre carbón activo funcionalizado en función del tiempo de contacto a 35 °C

Realizado por: Chuto K., Guamán B., 2023.

El mecanismo de adsorción de mercurio (II) sobre carbón activado funcionalizado en condiciones estacionarias con un tiempo de 240 minutos y tres temperaturas diferentes (25 °C; 30 °C y 35 °C) que se encuentran representado en las **Ilustraciones (9-4, 10-4, 11-4, 12-4, 13-4 y 14-4)** correspondientes a las pruebas estacionarias del tiempo de contacto.

A partir de los modelos de pseudo primer orden y pseudo segundo orden se obtuvo los parámetros de la cinética de adsorción, usando las siguientes ecuaciones respectivamente:

$$\log (q_e - q_t) = \log (q_e) - \frac{k_1}{2.303} * t \quad (1-4)$$

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} * t \quad (2-4)$$

q_e y q_t representan las concentraciones de mercurio (II) por unidad de masa en equilibrio y en el tiempo, respectivamente. El $q_{e\max p}$ más alto es 0.1317 mg Hg⁺²/g CAF a una temperatura de 30 °C, en cambio, el $q_{e\max p}$ más bajo es de 0.0916 mg Hg⁺²/g CAF a una temperatura de 25 °C (**Tabla 9-4**). Esta variación de q_e se podría explicar al aumento de temperatura y de velocidad de reacción de los iones provocando una mejor adsorción en los puntos activos del CAF.

Tabla 9-4: Parámetros de modelo cinético pseudo primer orden y pseudo segundo orden a diferentes temperaturas

Parámetros	Temperatura		
	25 °C	30 °C	35 °C
Capacidad máxima de adsorción			
q_{\max} (mg Hg ⁺² / g CAF)	0.0916	0.1317	0.1042
Modelo de Pseudo Primer Orden			
R ²	0.9880	0.9200	0.8010
K ₁ (L/min)	0.0010	0.0002	0.0002
q_e (mg Hg ⁺² / g CAF)	0.0841	0.1015	0.1003
Modelo Pseudo Segundo Orden			
R ²	0.9985	0.9857	0.9710
K ₂ (g/ mg·min)	0.00001	0.00001	0.00001
q_e (mg Hg ⁺² / g CAF)	0.0980	0.1351	0.1075

Realizado por: Chuto K., Guamán B., 2023.

De acuerdo con los valores de R² (Tabla 9-4) se determina que la adsorción de Hg⁺² sigue una cinética de pseudo segundo orden en todos los procesos de adsorción a diferentes temperaturas lo que indica que la interacción de adsorción se debe a enlaces químicos (quimisorción) al tener un valor de R² superiores al compararlos con los valores obtenidos en la linealización con el modelo de pseudo primer orden.

4.8.2. Prueba de isothermas de adsorción

Tabla 10-4: Resultados de la prueba de isothermas de adsorción a diferentes temperaturas

Nº	Concentración teórica inicial (ppb)	Concentración real inicial Hg ⁺² (ppb)	Concentración final Hg ⁺² (ppb) y 25 °C	Concentración final Hg ⁺² (ppb) y 30 °C	Concentración final Hg ⁺² (ppb) y 35 °C
1	100	97.58	87.68	53.68	39.46
2	250	244.16	96.88	87.24	67.12
3	500	457.15	279.19	203.32	152.55
4	750	734.85	377.40	322.98	247.39
5	1000	1097.74	678.88	627.21	487.99
6	1500	1402.65	1005.31	991.21	988.34
7	2000	2101.98	1683.11	1673.66	1545.00

Realizado por: Chuto K., Guamán B., 2023.

Tabla 11-4: Resultados de la capacidad de adsorción de las isotermas

Concentración real inicial Hg ⁺² (ppb)	Capacidad de adsorción de las isotermas		
	q _e (mg Hg ⁺² / g CAF) a 25 °C	q _e (mg Hg ⁺² / g CAF) a 30 °C	q _e (mg Hg ⁺² / g CAF) a 35 °C
98	0.00198	0.00878	0.01162
244	0.02946	0.03138	0.03541
457	0.03559	0.05077	0.06092
735	0.07149	0.08237	0.09749
1098	0.08377	0.09411	0.12195
1403	0.07947	0.08229	0.08286
2102	0.08377	0.08566	0.11140

Realizado por: Chuto K., Guamán B., 2023.

En la **Tabla 11-4**, se presenta los resultados de las capacidades de adsorción a diferentes concentraciones de Hg⁺² iniciales experimentadas, con lo cual se puede observar que la capacidad máxima de adsorción se ve influenciada por la aumento de concentración de los iones mercurio en solución teniendo una relación directamente proporcional, este resultado se explica que al existir mayor número de iones metálicos estos pueden alcanzar los sitios activos más profundos del material debido a su naturaleza porosa.

4.8.2.1. Isotermas de adsorción a diferentes temperaturas

- **Prueba a 25 °C de temperatura**

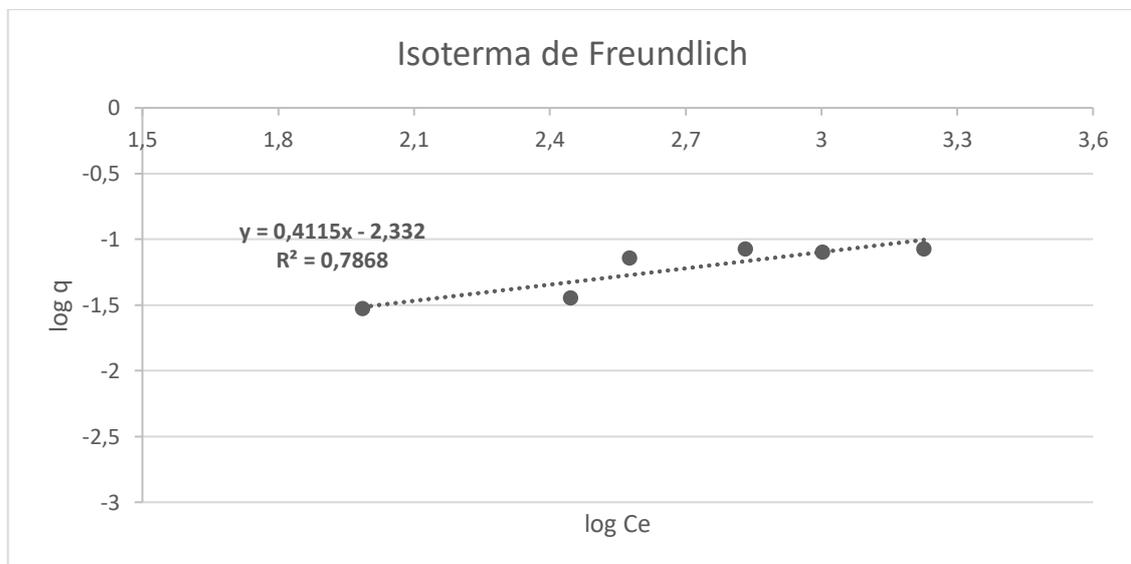


Ilustración 15-4: Isoterma de adsorción de mercurio (II) sobre carbón activo funcionalizado a 25 °C según el modelo de Freundlich

Realizado por: Chuto K., Guamán B., 2023.

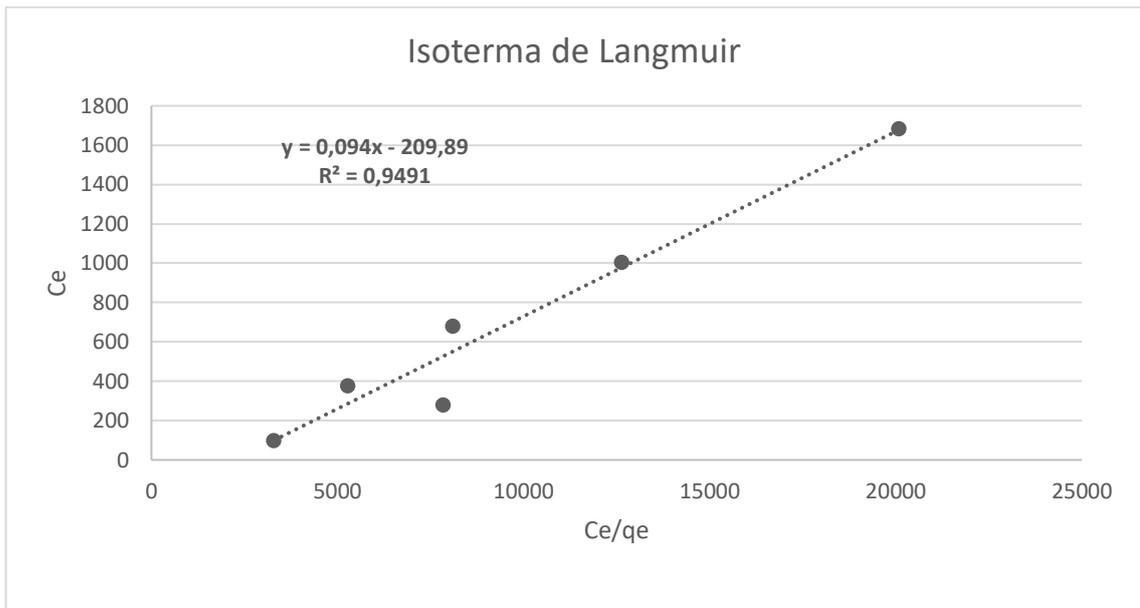


Ilustración 16-4: Isotherma de adsorción de mercurio (II) sobre carbón activo funcionalizado a 25 °C según el modelo de Langmuir

Realizado por: Chuto K., Guamán B., 2023.

- **Prueba a 30 °C de temperatura**

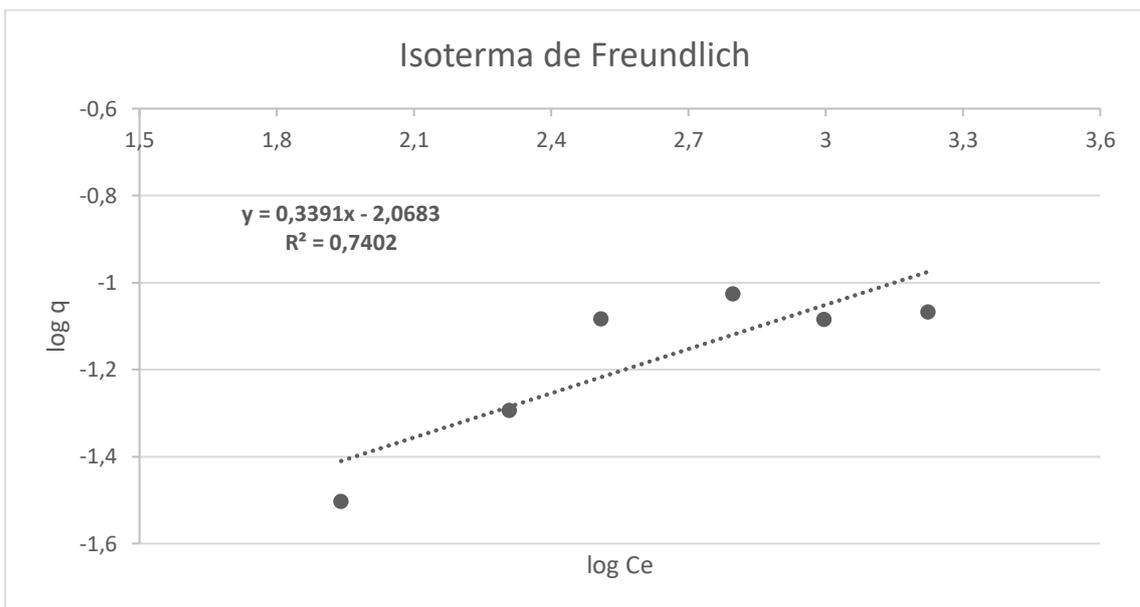


Ilustración 17-4: Isotherma de adsorción de mercurio (II) sobre carbón activo funcionalizado a 30 °C según el modelo de Freundlich

Realizado por: Chuto K., Guamán B., 2023.

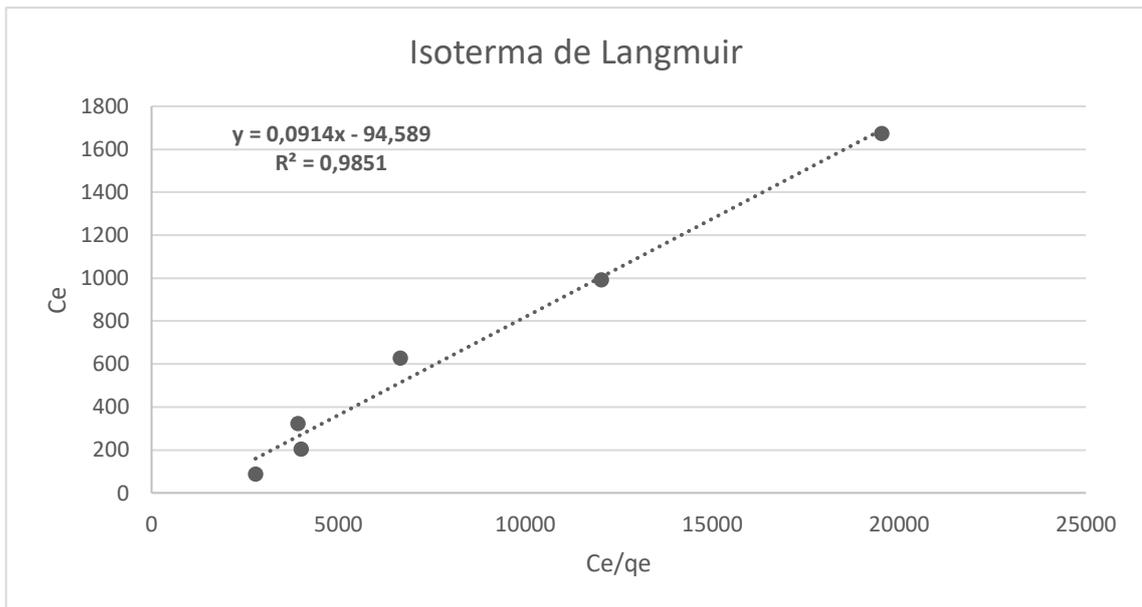


Ilustración 18-4: Isotherma de adsorción de mercurio (II) sobre carbón activo funcionalizado a 30 °C según el modelo de Langmuir

Realizado por: Chuto K., Guamán B., 2023.

- **Prueba a 35 °C de temperatura**

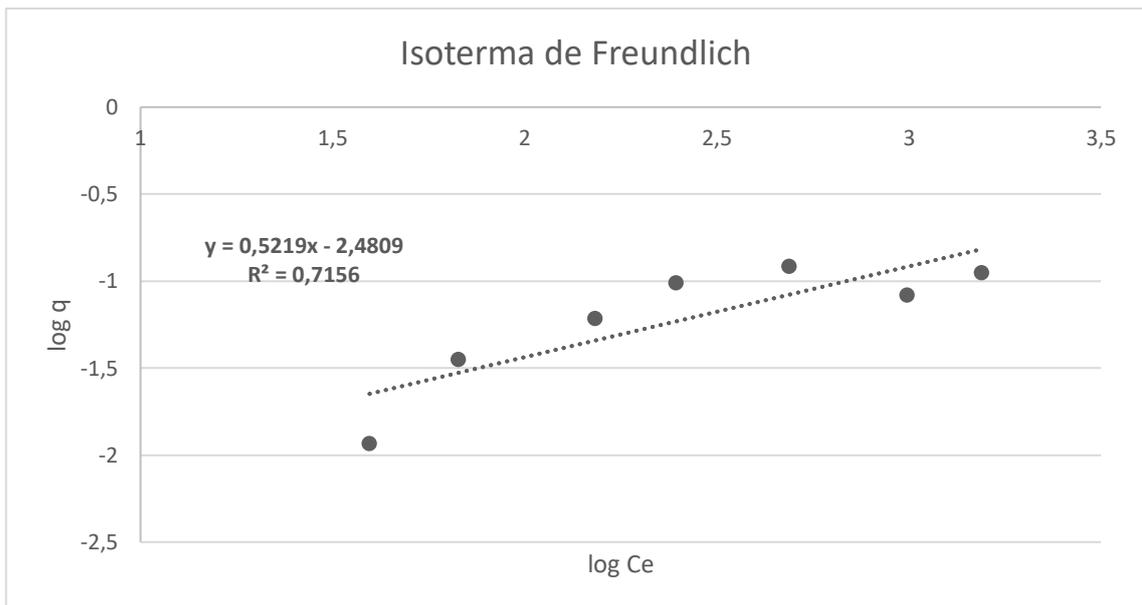


Ilustración 19-4: Isotherma de adsorción de mercurio (II) sobre carbón activo funcionalizado a 35 °C según el modelo de Freundlich

Realizado por: Chuto K., Guamán B., 2023.

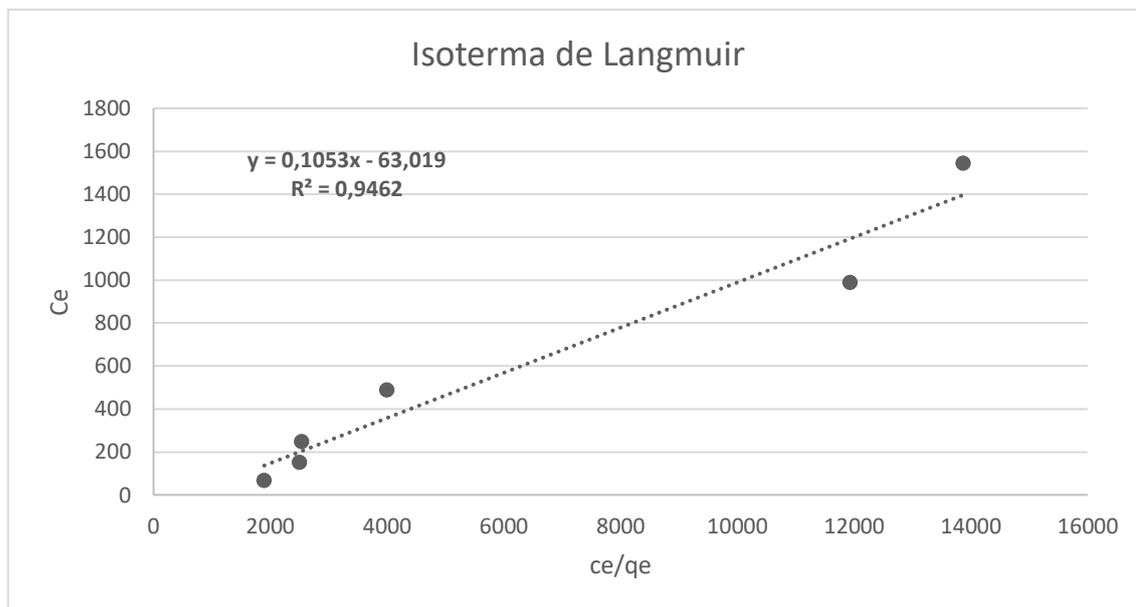


Ilustración 20-4: Isoterma de adsorción de mercurio (II) sobre carbón activo funcionalizado a 35 °C según el modelo de Langmuir

Realizado por: Chuto K., Guamán B., 2023.

Tabla 12-4: Parámetros del modelo de adsorción de Langmuir y Freundlich considerando diferentes temperaturas

Parámetros	Temperatura		
	25 °C	30 °C	35 °C
Isoterma de Freundlich			
K _F	0.0050	0.0090	0.0030
N	2.4300	2.9490	1.9161
R ²	0.7868	0.7402	0.7160
Isoterma de Langmuir			
K _L	0.0048	0.0106	0.0159
q _m	0.0940	0.0914	0.1053
R ²	0.9491	0.9851	0.9460

Realizado por: Chuto K., Guamán B., 2023.

El modelo de Langmuir tuvo un mejor ajuste lineal que el modelo de Freundlich, esto lo podemos constatar en los resultados de R² de las gráficas de las isotermas de adsorción de mercurio (II) sobre carbón activado a las diferentes temperaturas indicadas en cada gráfica. Este modelo asume que el proceso de adsorción se restringe a una superficie monocapa uniforme y debido a sus sitios activos limitados no presenta interacciones entre el soluto adsorbido y otras especies (Arias et al., 2017, p.7). Además, en la **Tabla 12-4**, la capacidad de adsorción a una temperatura de 35 °C es la más eficiente en la presente investigación teniendo un q_e de 0.1053 mg de mercurio (II) por cada gramo de carbón activo funcionalizado, lo que nos indica que mientras más aumente la

concentración de mercurio (II), más aumentará la capacidad de adsorción en comparación a las otras temperaturas.

4.8.3. Prueba estacionaria del efecto del pH sobre la capacidad de adsorción del carbón activado funcionalizado

Tabla 13-4: Resultados de la prueba del efecto del pH a diferentes rangos

N° de muestras	pH inicial	Masa de carbón activado funcionalizado (g)	Volumen de HCl concentrado adicionado	Volumen de 0,1 N NaOH adicionado	pH final	Resultado obtenido (ppb)	Porcentaje de remoción (%)
Control	3.66	0.2	-	-	4	776.23	0
1	3.01		1 gota	-	2	279.44	64
2	3.43		-	-	3	256.16	67
3	3.48		-	1 gota	4	186.30	76
4	3.44		-	2 gotas	5	131.96	83
5	3.48		-	14 gotas	6	108.67	86
6	3.26		-	16 gotas	7	170.77	78
7	3.58		-	18 gotas	9	217.34	72
8	3.51		-	30 gotas	10	240.63	69

Realizado por: Chuto K., Guamán B., 2023.

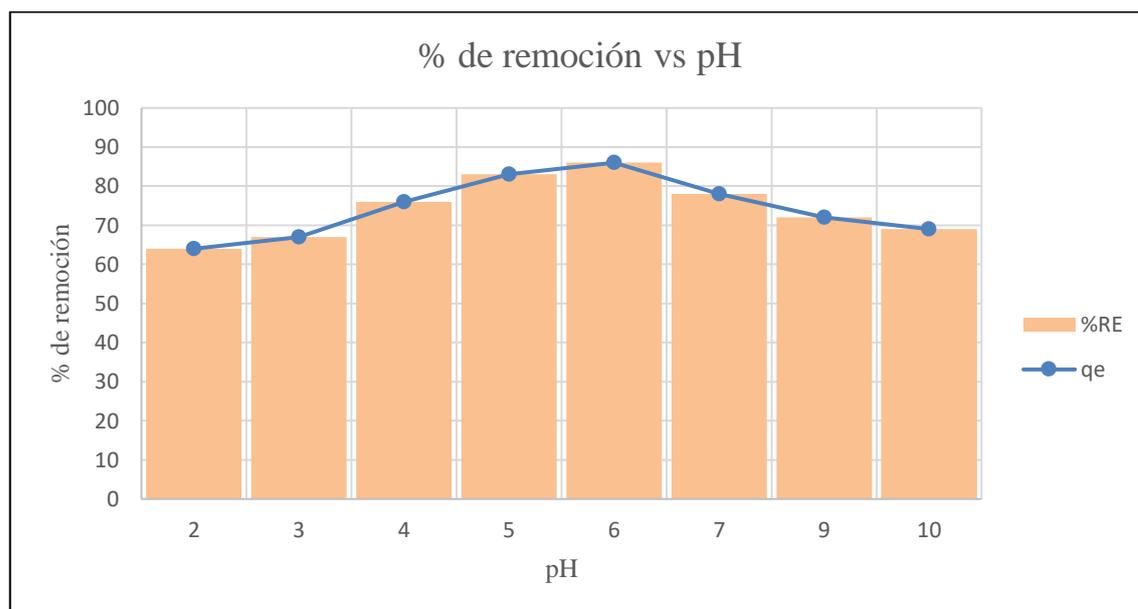


Ilustración 21-4: Adsorción de mercurio (II) sobre carbón activo funcionalizado en función del pH ($C_0 = 776.23$ ppb, masa = 0.2 g, V = 10 mL)

Realizado por: Chuto K., Guamán B., 2023.

Los experimentos se realizaron a ocho rangos diferentes de pH, la adsorción aumenta del 64% a pH = 2 hasta del 86% a pH = 6. Según los autores Arias et al. (2020, p.11) indican que las muestras que son ácidas ($2 \leq \text{pH} < 4$) son ricas en cationes las mismas que se adsorben junto con las moléculas de mercurio existiendo una competencia de los sitios activos, en las muestras en el rango ($5 \leq \text{pH} \leq 9$) el proceso de adsorción existe menos competencias entre cationes lo que favorece a la adsorción de los iones mercurio y en las muestras básicas ($\text{pH} > 9$) el exceso de iones (OH) interfiere con el proceso de adsorción disminuyendo la capacidad de adsorción del carbón activo funcionalizado.

En la **Ilustración 21-4**, se puede notar que a un pH = 6 se logró el mayor porcentaje de remoción de Hg^{2+} y consecuentemente una capacidad máxima de adsorción fue de 0.0333 mg Hg^{2+} / g CAF, esto se lo obtuvo empleando 0.2 gramos de carbón activado funcionalizado, a 150 r.p.m. y en cuatro horas se logró reducir su concentración de 776 ppb a 109 ppb equivalente a 86% de concentración reducida.

4.8.4. Prueba estacionaria de masa adsorbente

Tabla 14-4: Resultados de la prueba de masa adsorbente

N° de muestras	Masa de carbón activado funcionalizado (g)	Concentración (ppb)	Tiempo de agitación y revoluciones	Volumen de la solución (mL)	Resultado obtenido (ppb)
1	Inicial	500	4 horas 150 r.p.m.	40	445.57
2	0.3				250.44
3	0.5				150.95
4	0.8				65.86
5	1				5.08
6	1.25				0.06

Realizado por: Chuto K., Guamán B., 2023.

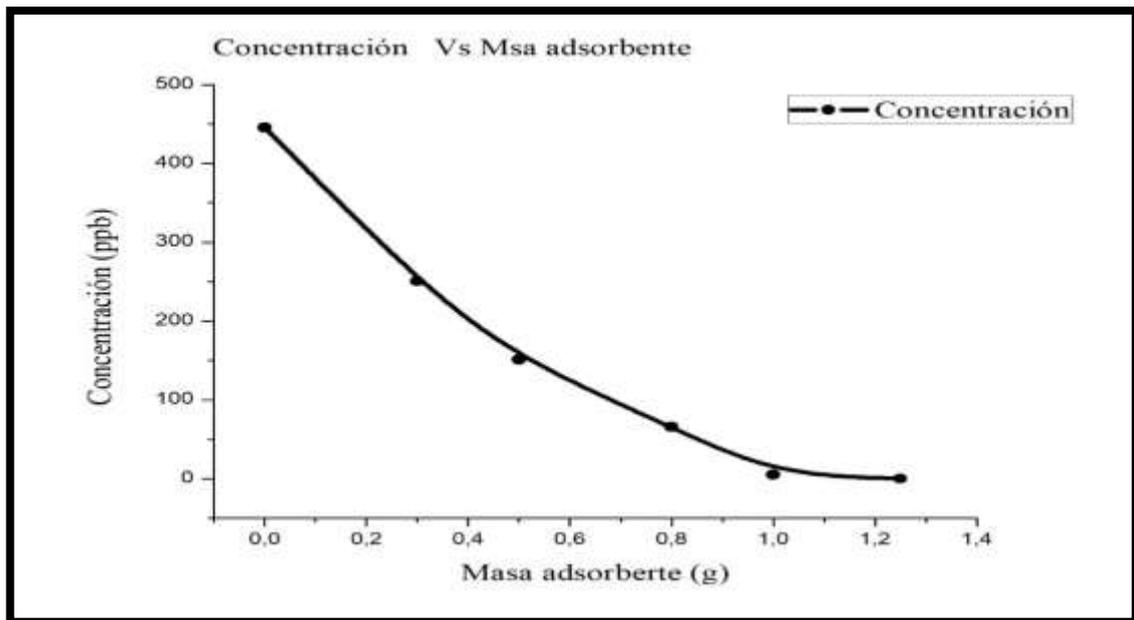


Ilustración 22-4: Concentración vs masa adsorbente

Realizado por: Chuto K., Guamán B., 2023.

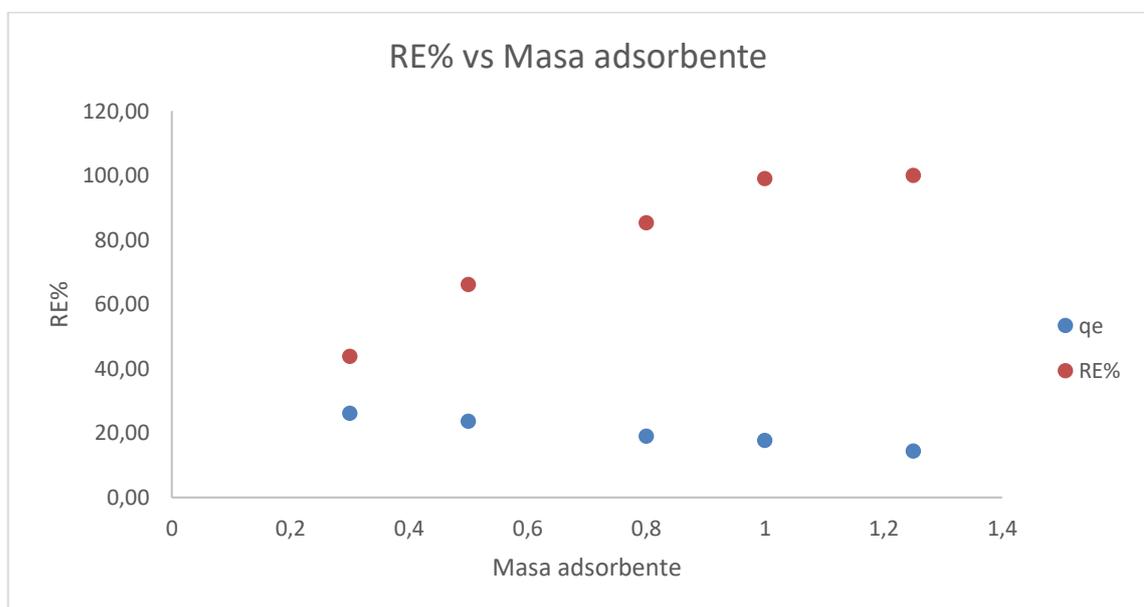


Ilustración 23-4: Efecto de la concentración inicial sobre el proceso de adsorción ($V = 40 \text{ mL}$, $C_0 = 445.57 \text{ ppb}$)

Realizado por: Chuto K., Guamán B., 2023.

En la **Ilustración 23-4**, se puede observar los datos de remoción del material empleando diferentes masas de carbón activo funcionalizado en una solución de 500 ppb de mercurio, la misma que nos muestra que a mayor masa de carbón activo funcionalizado mayor porcentaje de remoción de iones mercurio en solución, siendo así que ocupando 1.25 g de carbón activo funcionalizado a 150 r.p.m. durante cuatro horas la concentración disminuyó a 0.064 ppb Hg^{+2}

que equivale a un porcentaje de remoción del 99.99% de Hg^{+2} por el adsorbente (**Tabla 15-4**), mientras que el porcentaje de remoción más bajo es 43.70% que corresponde a la masa más baja que es 0.3 g de carbón activado funcionalizado esos resultados se deben a que a mayor masa mayor número de sitios activos por los que los iones tienen una mayor superficie de interacción.

Sin embargo se puede observar que al aumentar la masa del material adsorbente la capacidad máxima de adsorción (q_e) disminuye, este comportamiento se ha observado también en otros materiales (Arias et al., 2017, p.7), la presencia de mayor número de sitios activos al aumentar la masa hace que al momento de interaccionar los iones con los sitios no logren saturarse por completo disminuyendo su capacidad de adsorción lo que conlleva a determinar que la concentración de los iones influyen en los valores de q_e .

Tabla 15-4: Capacidad de adsorción de la prueba estacionaria de masa adsorbente

Capacidad de adsorción (q_e)	RE (%)
26.02	43.79
23.57	66.12
18.99	85.22
17.62	98.86
14.26	99.99

Realizado por: Chuto K., Guamán B., 2023.

4.8.5. Prueba estacionaria de punto isoelectrico de carbón activado funcionalizado

Tabla 16-4: Resultados de la prueba de punto isoelectrico

N° de muestras	Masa de carbón activado funcionalizado (g)	Reactivos adicionales	pH	Potencial eléctrico (mV)
1	0.5	0.1 N NaOH 0.1 M HCl Agua purificada	2	273.3
2			3	252.2
3			4	243.8
4			5	221.5
5			6	216.2
6			7	187.7
7			8	167.9
8			9	2.7
9			10	-64.9
10			11	-219.6

Realizado por: Chuto K., Guamán B., 2023.

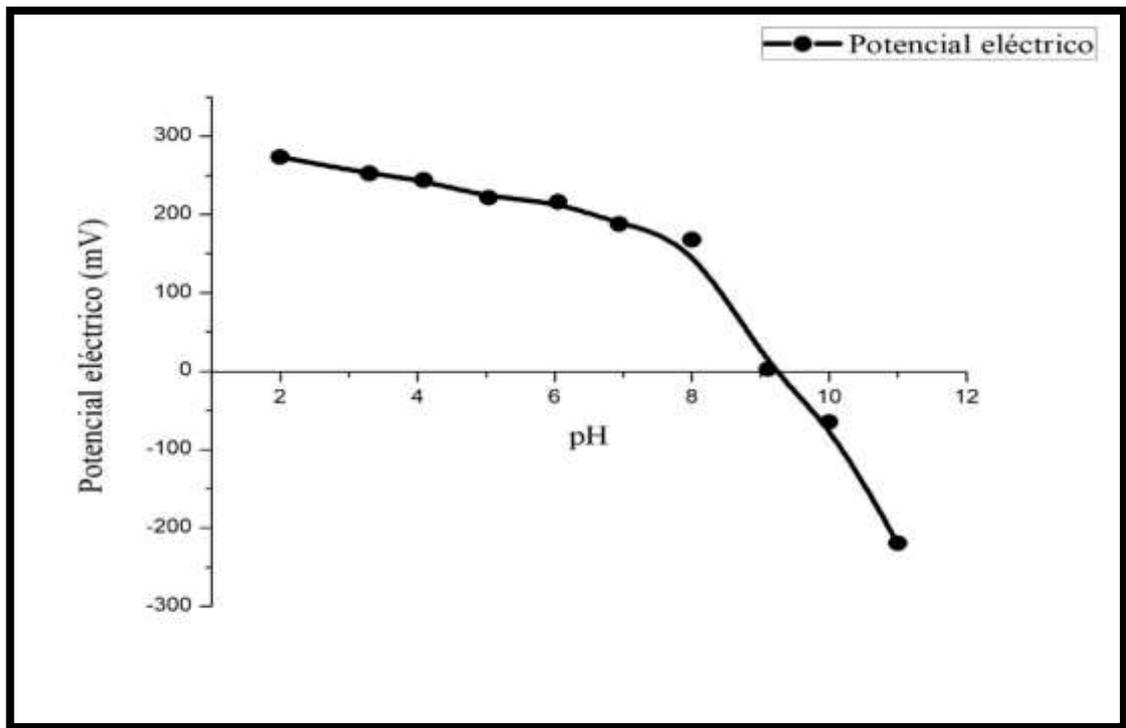


Ilustración 24-4: Potencial eléctrico vs pH

Realizado por: Chuto K., Guamán B., 2023.

Las pruebas isoelectricas se realizaron con el pH-metro, configurando su lectura para potencial eléctrico en milivoltios (mV) considerando un intervalo de pH de 2.00 y 11.00, en la **Tabla 16-4** podemos identificar la disminución del potencial eléctrico del carbón activo funcionalizado provocada por el aumento del pH, siendo notable la disminución del potencial eléctrico posterior a un pH aproximadamente igual 8 lo que nos indica que a ese valor es el punto isoelectrico del material donde los sitios activos superficiales cargados positivamente es igual a los sitios activos cargados negativamente, además se debe considerar que por arriba de este punto isoelectrico se puede presentar la ionización de grupos ácidos (Guo, Zhang & Shan, 2008, p.4), estos valores son respaldados con el efecto del pH en q_e (**Ilustración 24-4**) donde se puede observar una disminución de la capacidad de adsorción a un pH próximo a 7.5 considerando que se acerca al punto de carga zero y que los iones Cl^- van a presentar una interacción de repulsión al incrementar los iones negativos en la superficie dificultando la adsorción del mercurio.

4.9. Prueba dinámica de adsorción de mercurio (II) sobre carbón activado funcionalizado

4.9.1. Prueba dinámica durante 24 horas con un caudal de 7mL/min

Tabla 17-4: Resultados de la prueba dinámica a un caudal de 7 mL/min

Caudal	7 mL/min	
Concentración inicial (ppb)	940.89	
Revoluciones de la bomba peristáltica	4.9	
Tiempo de llenado de la columna de adsorción dinámica más agua purificada (h)	1.72	
Tiempo de llenado de la columna de adsorción dinámica más el estándar de mercurio (h)	1.8	
Masa de carbón activado funcionalizado (g)	100	
Tiempo a partir de la primera descarga (h)	Concentración final (ppb)	q_e (mg/g)
0	21.27	0
0.2	25.63	0.00077
0.4	25.11	0.00154
0.8	22.41	0.00309
1	25.05	0.00385
2	24.26	0.00770
3	23.86	0.01155
4	24.19	0.01540
5	28.65	0.01916
6	20.55	0.02319
7	24.48	0.02694
8	22.32	0.03086
9	27.35	0.03453
10	26.38	0.03841
12	28.93	0.04596
15	32.20	0.05725
18	37.01	0.06833
21	36.19	0.07979
24	39.93	0.09082

Realizado por: Chuto K., Guamán B., 2023.

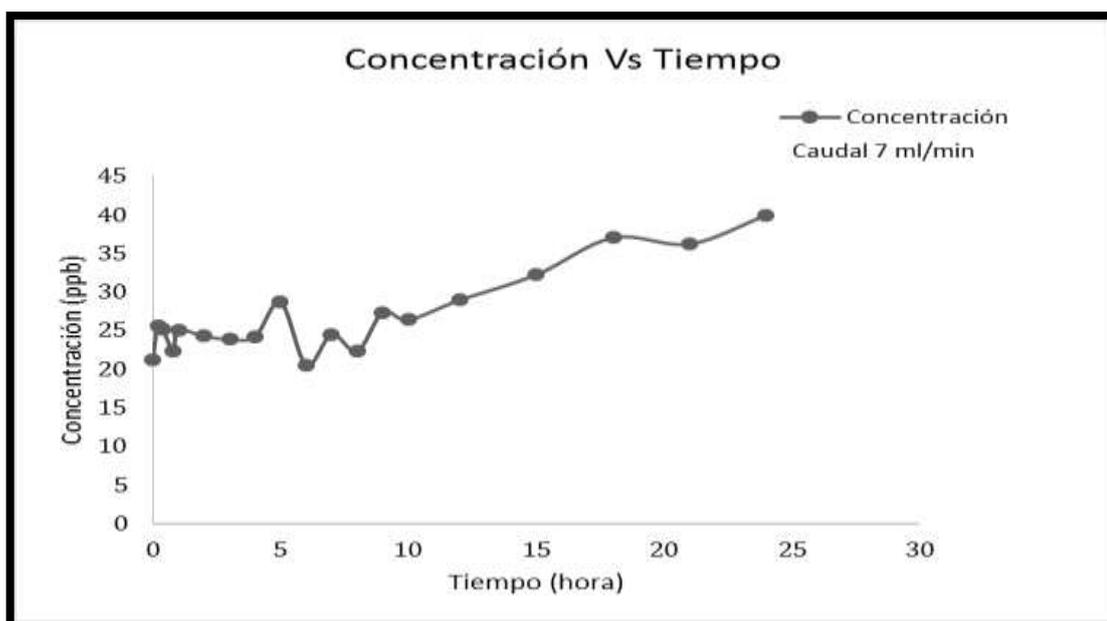


Ilustración 25-4: Prueba dinámica con un caudal de 7 mL/min

Realizado por: Chuto K., Guamán B., 2023.

El proceso de adsorción dinámica se realizó dentro de una columna de lecho fijo con una solución de Hg^{+2} a un caudal de 7 mL/min y con 100 gramos de CAF por 24 horas tomando alícuotas de 40 mL en intervalos de 15 min aproximadamente, los valores obtenidos por el proceso de adsorción del material presentan bajas concentraciones a la salida de la columna los valores se encuentran en un rango de 21 a 22 ppb de Hg^{+2} en una hora, posteriormente se observa una elevación de la concentración de mercurio en las alícuotas hasta obtener valores cercanos a los 39 ppb a las 24 horas, estos valores indican que el material empieza a saturar los sitios activos por lo cual la capacidad de remoción se ve afectada observándose el incremento de los iones, no obstante se debe considerar que a las 24 horas el material a interactuado con un volumen de 10 L de solución contaminada presentando una capacidad de adsorción en un rango 0.09082 mg Hg^{+2} /g CAF manteniendo un porcentaje de remoción del 96%.

En vista de estos datos se puede realizar una proyección del tiempo de saturación del material en condiciones dinámicas considerando como punto de referencias la capacidad de remoción a las 24 horas obteniendo un tiempo aproximado de saturación 560 horas.

4.9.2. Prueba dinámica con diferente caudal

Tabla 18-4: Resultados de la prueba dinámica a un caudal de 15 mL/min

Caudal	15 mL/min	
Concentración inicial (ppb)	934.88	
Revoluciones de la bomba peristáltica	10.8	
Tiempo de llenado de la columna de adsorción dinámica más agua purificada (h)	0.67	
Tiempo de llenado de la columna de adsorción dinámica más el estándar de mercurio (h)	0.5	
Masa de carbón activado funcionalizado (g)	100	
Tiempo a partir de la primera descarga (h)	Concentración final (ppb)	q_e (mg/g)
0	27.76	0
0.2	28.78	0.00163
0.4	31.66	0.00325
0.8	29.98	0.00652
1	29.23	0.00815
2	32.88	0.01624
3	29.32	0.02445
4	31.64	0.03252
5	28.15	0.04080
6	26.95	0.04903
7	26.78	0.05721
8	32.80	0.06495
9	32.54	0.07309
10	33.59	0.08112

Realizado por: Chuto K., Guamán B., 2023.

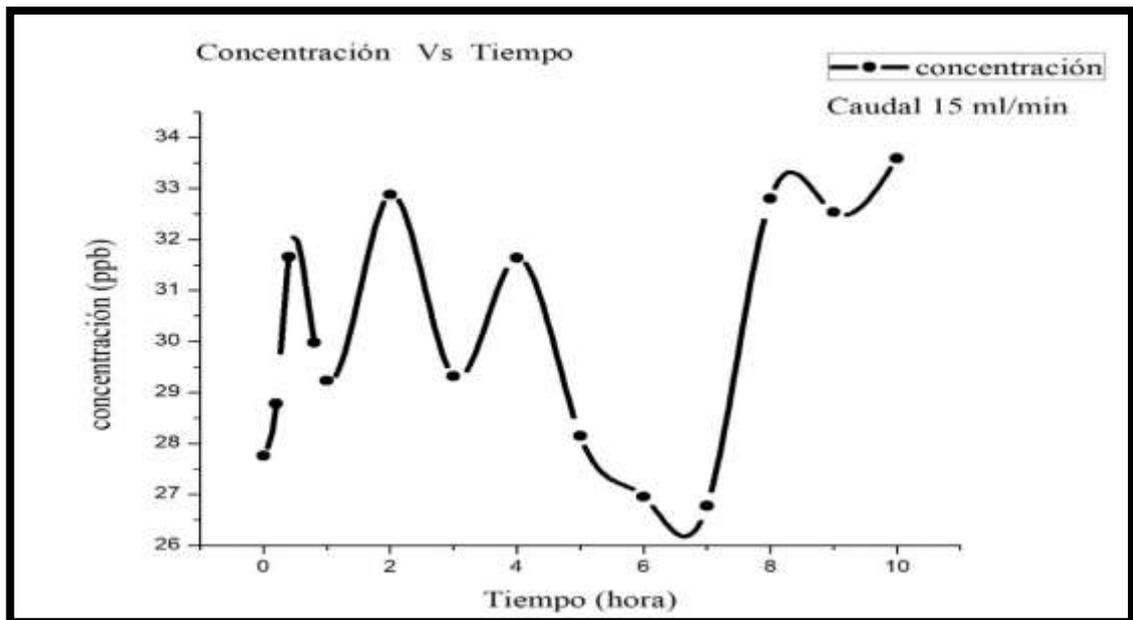


Ilustración 26-4: Prueba dinámica con un caudal de 15 mL/min

Realizado por: Chuto K., Guamán B., 2023.

El proceso de adsorción dinámica se realizó dentro de una columna de lecho fijo con una solución de Hg^{+2} a un caudal de 15 mL/min y con 100 gramos de CAF por 10 horas tomando alícuotas de 40 mL en intervalos de 15 min aproximadamente, los valores obtenidos por el proceso de adsorción del material presentan bajas concentraciones a la salida de la columna los valores se encuentran en un rango de 27 a 29 ppb de Hg^{+2} en una hora , posteriormente se observa una variación leve de la concentración de mercurio en las alícuotas hasta obtener valores cercanos a los 34 ppb a las 10 horas, estos valores indican que el material empieza a saturar los sitios activos por lo cual la capacidad de remoción se ve afectada observándose el incremento de los iones, no obstante se debe considerar que a las 10 horas el material a interactuado con un volumen de 10 L de solución contaminada presentando una capacidad de adsorción en un rango 0.08112 mg Hg^{+2} /g CAF manteniendo un porcentaje de remoción del 93%.

En vista de estos datos se puede realizar una proyección del tiempo de saturación del material en condiciones dinámicas considerando como punto de referencias la capacidad de remoción a las 10 horas obteniendo un tiempo aproximado de saturación 278 horas.

CAPÍTULO V

5. MARCO PROPOSITIVO

5.1. Propuesta

Una vez culminada esta investigación sobre la adsorción de mercurio (II) sobre carbón activado funcionalizado con grupos cloruro en condiciones estacionarias y dinámicas, de acuerdo con los resultados anteriormente presentados, nosotros proponemos la fabricación de filtros a base de carbón activado funcionalizado.

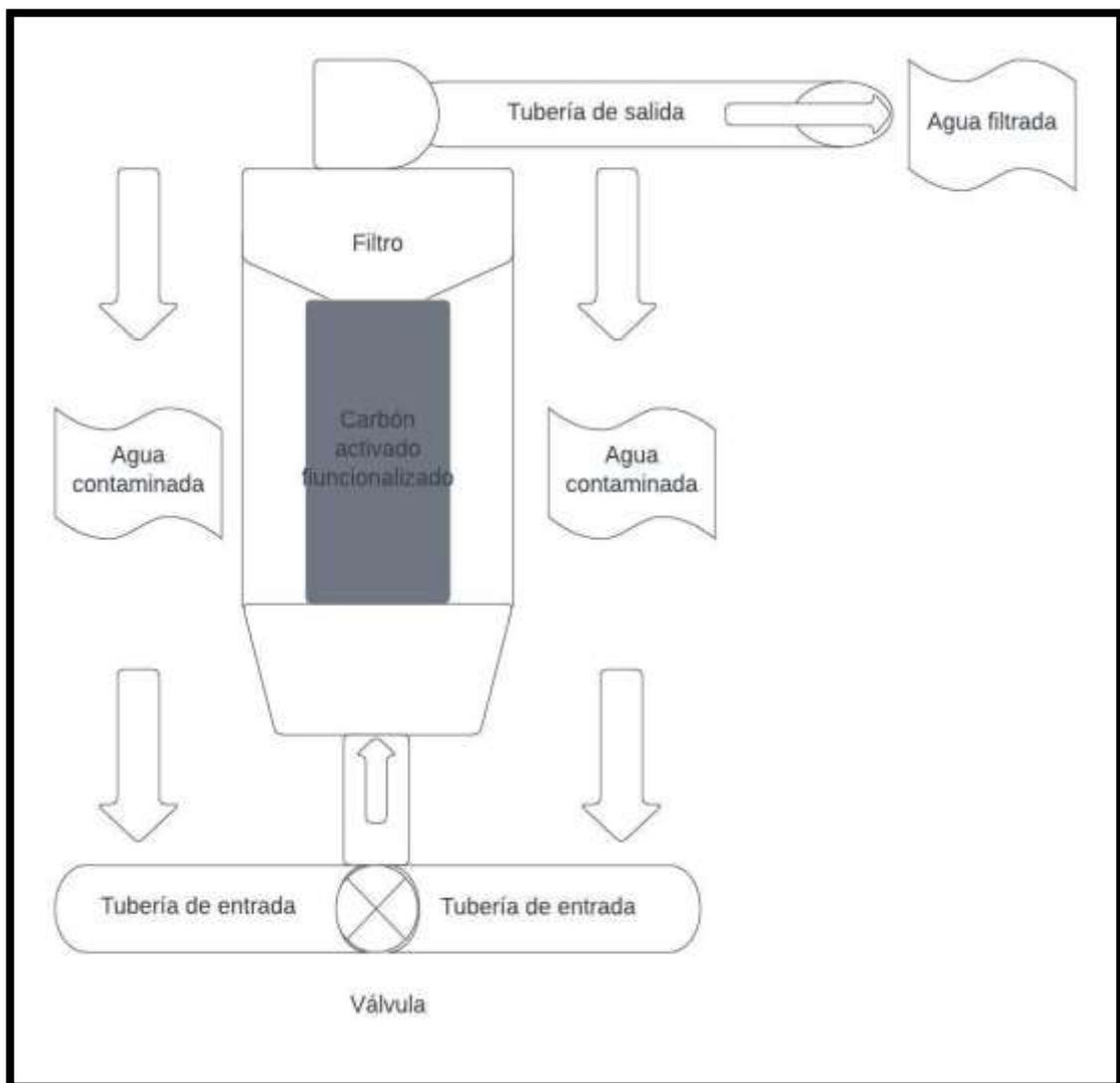


Ilustración 1-5: Diseño del filtro de carbón activado funcionalizado propuesto

Realizado por: Chuto K., Guamán B., 2023.

5.1.1. Filtros de carbón activado funcionalizado

Estos filtros a base de carbón activado funcionalizado tendrán la función de retener metales pesados, en especial el mercurio, presente en las aguas provenientes de la industria minera, debido a que estos filtros gracias a su estructura microporosa se encargarán de atrapar estos en la superficie del carbón activado, haciendo que este material sea un gran medio de filtración eficaz para eliminación de metales pesados.

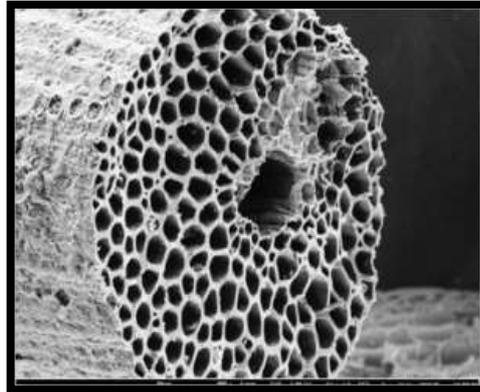


Ilustración 2-5: Estructura microporosa de los filtros de carbón activado.

Fuente: (CC BY-NC-ND, 2023).

Otra gran cualidad que poseen estos filtros de carbón activado es que para aumentar más su eficiencia se los podrían someter a tratamientos químicos que nos ayudaran aumentar su capacidad de adsorción de compuestos contaminantes específicos. Además, si estos filtros de carbón activado permiten mantener su eficiencia, lo que nos ayuda a retener los contaminantes durante un tiempo mucho más largo, donde en las condiciones correctas de ventilación, estos periodos pueden llegar a plazo de máximo hasta 4 años.



Ilustración 3-5: Filtro de carbón activado utilizado para purificar agua de consumo humano

Fuente: (CC BY-NC-ND, 2023).

Este proyecto de investigación demuestra la factibilidad que tienen estos filtros de carbón activado funcionalizado para eliminar el mercurio de estándares preparados a escala de laboratorio, sin embargo, si se podría aplicar este proyecto con el objetivo de crear una planta piloto para el tratamiento de aguas provenientes de la industria minera, estos nos ayudaría a controlar la contaminación producida por estos metales pesados en nuestro país.

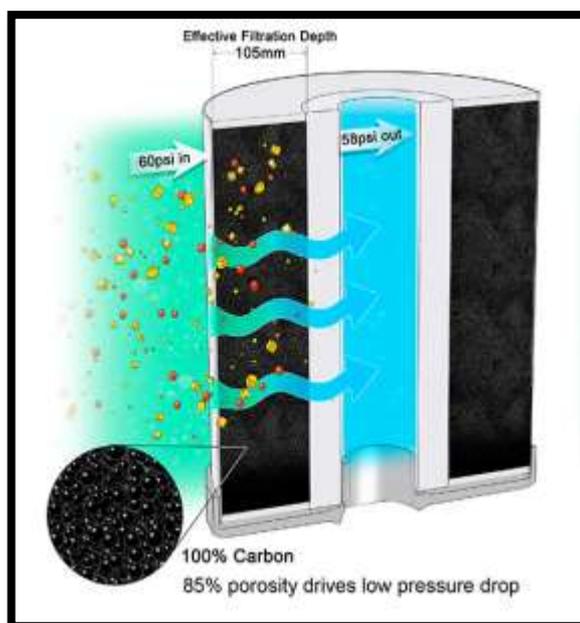


Ilustración 4-5: Composición de un filtro comercial de carbón activado

Fuente: (AQUAGLOBAL, 2023, p.1)

Si se obtienen resultados favorables en la planta piloto de tratamiento, traerá muchos beneficios para los habitantes de las provincias en donde la minería artesanal provoca muchos estragos en su vida cotidiana, dentro de los beneficios que se obtendrían con uso de los filtros de carbón

activado funcionalizado, estaría la reducción de metales pesados de efluentes de agua, reducción de metales pesados presentes en los alimentos, reducción de la contaminación ambiental, etc.

CONCLUSIONES

- Se funcionalizó un kilogramo de carbón activo comercial mediante procesos químicos, en dicho proceso se realizó un pre-tratamiento de limpieza con ácido clorhídrico al 37% y mediante el uso de cloruro de cobre al 12% (m/V) se logró añadir grupos funcionales (Cl-) a la estructura del material adsorbente.
- Se caracterizó el carbón activado funcionalizado con grupos cloruro mediante procesos espectroscópicos como Espectroscopia Infrarroja con Transformadas de Fourier (FT/IR) donde se logró observar diferentes grupos funcionales como: (O-H) a un número de onda de 3259 cm^{-1} y grupos cloruro (C-Cl) que se encontraba en rango de banda de absorción de 748 cm^{-1} y 629 cm^{-1} evidenciando la correcta funcionalización del material adsorbente, además, con la Microscopía Electrónica de Barrido se determinó el tamaño de las partículas de carbón activo funcionalizado que se encontraban a un rango de $20\text{ }\mu\text{m}$ – $200\text{ }\mu\text{m}$ de espesor observándose la estructura regular porosa y se observó los cambios estructurales por el proceso de funcionalización con iones cloruro.
- Se adsorbió mercurio (II) sobre CAF en condiciones estacionarias obteniendo resultados según las condiciones establecidas, la reducción de Hg^{+2} un 93% en un tiempo de contacto de 4 horas, a un pH=6 se obtuvo la reducción del 86% y a una masa de 1.25 g CAF una reducción del 99,9%; indicando que el CAF con cloruro de cobre (II) es capaz de adsorber mercurio (II), debido a su área superficial y su estructura porosa, en donde los iones de mercurio se adhieren a su poros, lo que nos indica una reducción de la concentración de Hg^{+2} de aguas contaminadas, sin embargo, en condiciones dinámicas de adsorción no se pudo determinar el porcentaje de remoción a las condiciones establecidas.
- Se determinó la capacidad de adsorción (q_e) del CAF a tres diferentes temperaturas, obteniéndose una máxima capacidad de adsorción de $0.1317\text{ mg Hg}^{+2}/\text{g CAF}$ a 30°C con un tiempo de contacto de 240 minutos, el análisis de isotermas nos indica que se alcanza el máximo valor de q_e ($0.1053\text{ mg Hg}^{+2}/\text{g CAF}$) a 35°C lo que indica que la temperatura influye directamente en la capacidad de adsorción del material, en la pruebas de pH se determinó que el material posee mejores propiedades de adsorción en un rango de pH de 5 a 6.5, finalmente de acuerdo a la masa adsorbente el q_e máximo de $0.024\text{ mg Hg}^{+2} / \text{g CAF}$ ocurre a la menor masa adsorbente de 0.3g.

- Se estableció los parámetros de operación de la columna de lecho fijo como son: Caudal, concentración, masa del adsorbente (carbón activo funcionalizado) y tiempo, las mismas que nos ayudó a determinar la capacidad adsorbente del carbón activo funcionalizado, presentando un valor de q_e de 0.090 y 0.081 mg Hg⁺²/ g CAF a un caudal de 7 mL/min y 15 mL/min respectivamente, sin alcanzar la saturación; proyectando un tiempo de saturación de la columna en 560 y 278 horas a distintos caudales.

RECOMENDACIONES

- Para las pruebas estacionarias, se recomienda tomar las siguientes relaciones con el objetivo de obtener resultados óptimos en el análisis: Trabajar con una solución de 250 mL, con una concentración inicial de 500 ppb y una masa adsorbente de 1 gramo de carbón activo funcionalizado.
- Para las pruebas de tiempo de contacto e isothermas, se recomienda tomar alícuotas de 2 mL en un vaso de precipitación de 100 mL, posterior a esto tomar 1 mL para aforar en un tubo falcon a 15 mL, con el propósito de evitar contaminación de las alícuotas en el proceso de análisis, además de evitar la varianza producida por la toma de muestras con la micropipeta y el error sea mínimo.
- Para el momento de filtrar las alícuotas, se recomienda utilizar jeringas de 10 mL con su respectivo filtro de 0.45 μm , debido a que al ir utilizando estos su eficiencia va disminuyendo, provocando errores en la medición de las muestras en el generador de hidruros.
- Se recomienda para poder realizar pruebas dinámicas posteriores, elevar la concentración de mercurio (II), aumentar el volumen de la solución estándar de mercurio (II) o disminuir la masa del carbón activo funcionalizado, con el fin de observar el comportamiento de la Concentración vs Tiempo, debido a que en algún momento el carbón activado funcionalizado se saturará por la adsorción mercurio (II) y la concentración de la muestra en análisis debe elevarse hasta asemejarse a la concentración inicial con la cual trabaje.

GLOSARIO

Adsorbato: Son aquellas sustancias adsorbidas por un carbón activado o por otro material adsorbente (Aguapedia, 2022, p.83).

Adsorbente: Es el material en el que se verifica el fenómeno de la adsorción, como por ejemplo el carbón activado (Aguapedia, 2022, p.83).

Adsorción: Es la adhesión de un finísimo estrato de moléculas líquidas o gaseosas, a la superficie de sólidos con los que aquellas entran en contacto (Aguapedia, 2022, p.83).

Área superficial: Es la cantidad de superficie referida al conjunto de los poros del carbón. Se la determina basándose en una isoterma de adsorción, según el método de BET y se expresa en m^2/g (Aguapedia, 2022, p.83).

Carbón activado: Es un carbón que ha sido activado a altas temperaturas mediante el calentamiento por vapor de agua y dióxido de carbono o por agentes deshidratantes, dando lugar a una estructura porosa interna enormemente desarrollada (Aguapedia, 2022, p.83).

Cinética química: Es un área de la química que se encarga de estudiar la velocidad de la reacción, la manera en que la reacción cambia de acuerdo a los parámetros que se utilicen (Delgado Mendoza, 2021, p.90).

Columna de carbón: Es una columna rellena con carbón activado granulado cuya función primaria es la adsorción preferente de tipos de moléculas específicos (Aguapedia, 2022, p.84).

Equilibrio de adsorción: El equilibrio es alcanzado cuando hay una igualdad entre los iones del adsorbato en la solución y los iones del adsorbato que se encuentra en la superficie del adsorbente. Es la capacidad de retención entre la cantidad de adsorbato en el adsorbente por unidad de masa o volumen (Delgado Mendoza, 2021, p.90).

Isoterma de adsorción: Es la medida de la capacidad de adsorción en función de la concentración de la sustancia adsorbida o adsorbato a una temperatura preestablecida. Se representa por curvas en diagramas en los que se representa la cantidad adsorbida por unidad de peso del adsorbente y la concentración en el punto de equilibrio adsorbato (Aguapedia, 2022, p.86).

Lecho fijo: Es un proceso de adsorción en el cual el material adsorbente permanece fijo, en el interior de la columna, hasta su completa saturación (Aguapedia, 2022, p.86).

Lecho móvil: Designa una operación a contracorriente dentro de una columna desadsorción individual. El carbón saturado es desplazado hasta el extremo inferior de la columna y el carbón fresco o regenerado se añade al extremo superior. El flujo del líquido se mueve de abajo a arriba, en dirección opuesta a la del carbón (Aguapedia, 2022, p.86).

Macroporos: Se llama así a los poros contenidos en el carbón activado cuyo diámetro sea superior a los 500 Angstroms (Aguapedia, 2022, p.86).

Mesoporos: Son los poros contenidos en el carbón activado cuyo diámetro queda comprendido entre los 500 y los 30 Angstroms (Aguapedia, 2022, p.86).

Microporos: Son los poros contenidos en el carbón activado cuyo diámetro sea inferior a 30 Angstroms (Aguapedia, 2022, p.86).

Reacción química: Es el proceso termodinámico en la que se transforman dos o más especies debido al incremento o disminución de las concentraciones de los reactivos y productos (Delgado Mendoza, 2021, p.90).

Tiempo de contacto: Es el tiempo que necesita una corriente para atravesar una columna de carbón, suponiendo que toda la corriente fluya a idéntica velocidad. Es igual al volumen del lecho del carbón, en vacío, dividido por el volumen del efluente (Aguapedia, 2022, p.87).

BIBLIOGRAFÍA

AGENCIA DE PROTECCIÓN AMBIENTAL DE ESTADOS UNIDOS. Información básica sobre el mercurio. *EPA, Estados Unidos*. [en línea]. 2022. [Consulta: 9 febrero 2023]. Disponible en: <https://espanol.epa.gov/espanol/informacion-basica-sobre-el-mercurio>.

AGENCY FOR TOXIC SUBSTANCES AND DISEASE REGISTRY. Datos básicos sobre el mercurio. Efectos a la salud por exposición al mercurio. *Environmental Protection Agency, United States*. [en línea], 2012. [Consulta: 9 febrero 2023]. Disponible en: https://www.atsdr.cdc.gov/mercury/docs/11-229617-FSpan-508_Efectos_a_laSalud.pdf.

AGUAPEDIA. Manual del carbón activo. *Universidad de Sevilla, España*. [en línea]. 2022. [Consulta: 23 febrero 2023]. Disponible en: www.aguapedia.net.

ANGAMARCA QUINDE, P.M. Utilización de óxido de grafeno reducido para la adsorción del azul de metileno de los efluentes procedentes de la industria textil. [en línea]. (Trabajo de titulación). (Maestría) Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador. 2020. pp. 1-59. [Consulta: 15 febrero 2023]. Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/14096>.

AQUAGLOBAL. Filtro de carbón activado. *Lima, Perú*. [en línea]. 2023. [Consulta: 14 febrero 2023]. Disponible en: <https://www.aquaglobals.com/filtro-de-carbon-activado.php>.

ARIAS, F., GUEVARA, M., TENE, T., ANGAMARCA, P., MOLINA, R., VALAREZO, A., SALGUERO, O., VACACELA GÓMEZ, C., ARIAS, M. y CAPUTI, L.S. The Adsorption of Methylene Blue on Eco-Friendly Reduced Graphene Oxide. *Nanomaterials*. [en línea], 2022. (Basel, Switzerland). vol. 10, no. 4, ISSN 2079-4991. DOI 10.3390/NANO10040681. [Consulta: 17 febrero 2023]. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32260330/>.

ARIAS ARIAS, F.E., BENEDUCI, A., CHIDICHIMO, F., FURIA, E. y STRAFACE, S. Study of the adsorption of mercury (II) on lignocellulosic materials under static and dynamic conditions. *Chemosphere*. [en línea], 2017. vol. 180, ISSN 0045-6535. DOI 10.1016/J.CHEMOSPHERE.2017.03.137. [Consulta: 15 febrero 2023]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0045653517305222>.

AZIZ, A.S.A., MANAF, L.A., MAN, H.C. y KUMAR, N.S. Column dynamic studies and breakthrough curve analysis for Cd(II) and Cu(II) ions adsorption onto palm oil boiler mill fly ash (POFA). *Environmental science and pollution research international*. [en línea], 2014. vol. 21, no. 13, ISSN 1614-7499. DOI 10.1007/S11356-014-2739-5. [Consulta: 17 febrero 2023]. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24659435/>.

CAMFIL. Cronología y avances del carbón activo. *España*. [en línea]. 2022. [Consulta: 13 febrero 2023]. Disponible en: <https://www.camfil.com/es-es/insights/innovacion-tecnologia-e-investigacion/journey-of-activated-carbon>.

CARBOTECNIA. ¿Qué es el carbón activado y para qué sirve? y ¿Para qué sirve?. *México*. [en línea]. 2022. [Consulta: 13 febrero 2023]. Disponible en: <https://www.carbotecnia.info/aprendizaje/carbon-activado/que-es-carbon-activado/>.

CARRILLO MEJÍA, A.G. Estudio para la determinación cinética de adsorción de Arsénico sobre residuos de cacao (*Theobroma cacao*). [en línea]. (Trabajo de titulación). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Ciencias, Escuela de Ingeniería Química, Riobamba, Ecuador. 2021. pp. 1-81. [Consulta: 15 febrero 2023]. Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/16744>.

CARRO DE DIEGO, L.M. Eliminación de mercurio de efluentes acuosos con materiales de bajo coste: proceso combinado de bioadsorción-reducción. [en línea]. 2012. S.l.: Universidad da Coruña. [Consulta: 30 abril 2022]. Disponible en: https://ruc.udc.es/dspace/bitstream/handle/2183/10146/CarrodeDiego_LeticiaM_TD_2012.pdf.

CENTENO SÁNCHEZ, C.V. y POMASQUI CHACHA, S.N. Adsorción de azul de metileno en solución usando zeolita natural impregnada con OG y OGr. [en línea]. (Trabajo de titulación). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Ciencias, Escuela de Ciencias Químicas, Riobamba, Ecuador. 2022. pp. 1-148. [Consulta: 15 febrero 2023]. Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/17575>.

CORZO, A. y LEDESMA, N.R. Técnicas de Análisis en Química Orgánica - CROMATOGRFÍA. [en línea], 2019. [Consulta: 28 abril 2022]. Disponible en: <https://fcf.unse.edu.ar/archivos/series-didacticas/SD-44-Cromatografia-CORZO.pdf>.

DE PRADA DÍAZ, Á. y GÓMEZ HERNÁNDEZ, J. Estudio experimental de la aglomeración de partículas en un lecho fluidizado. [en línea], 2014. [Consulta: 28 abril 2022]. Disponible en: <https://core.ac.uk/download/pdf/44310631.pdf>.

DELGADO MENDOZA, P.J. Análisis comparativo mediante isoterma de adsorción: Freundlich y Langmuir para remoción de Pb^{2+} en medio acuoso. [en línea]. (Trabajo de titulación). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Ciencias, Escuela de Ciencias Químicas, Riobamba, Ecuador. 2021. pp. 1-104. [Consulta: 15 febrero 2023]. Disponible en: <http://dspace.espoch.edu.ec/handle/123456789/14556>.

EQUIPO EDITORIAL ETECÉ. Mercurio. *Enciclopedia Humanidades, Argentina*. [en línea]. 2023. [Consulta: 9 febrero 2023]. Disponible en: <https://humanidades.com/mercurio-metal/>.

EQUIPO Y LABORATORIOS DE COLOMBIA. Carbón activado. *Colombia*. [en línea]. 2022. [Consulta: 13 febrero 2023]. Disponible en: <https://www.equiposylaboratorio.com/portal/articulo-ampliado/carbon-activado>.

EUROCARB. ¿Qué es el Carbón Activado?. *Reino Unido*. [en línea]. 2022. [Consulta: 13 febrero 2023]. Disponible en: <https://www.eurocarb.com/es/productos/que-es-el-carbon-activado/>.

GUO, X., ZHANG, S. y SHAN, X. quan. Adsorption of metal ions on lignin. *Journal of Hazardous Materials*. [en línea], 2008. vol. 151, no. 1, ISSN 0304-3894. DOI 10.1016/J.JHAZMAT.2007.05.065. [Consulta: 15 febrero 2023]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304389407007790?via%3Dihub>.

INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN GEOLÓGICO Y ENERGÉTICO. Un acuerdo mundial para proteger la salud y el ambiente frente al mercurio. [en línea]. 2022. [Consulta: 28 abril 2022]. Disponible en: <https://www.geoenergia.gob.ec/un-acuerdo-mundial-para-proteger-la-salud-y-el-ambiente-frente-al-mercurio/>.

LAGUA LÓPEZ, W.G. Evaluación de carbón activado de semillas de datura como material adsorbente de metales (cromo VI y plomo II). [en línea]. (Trabajo de titulación). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Ciencias, Escuela de Ingeniería Química, Riobamba, Ecuador. 2022. pp. 1-98. [Consulta: 15 febrero 2023]. Disponible en: <http://dspace.espoch.edu.ec/handle/123456789/16908>.

LANDY ÁLVAREZ, J.A. Remoción de cromo III y plomo II en solución acuosa, utilizando carbón activo obtenido de las semillas de guayaba. [en línea]. (Trabajo de titulación). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Ciencias, Escuela de Ingeniería Química, Riobamba, Ecuador. 2022. pp. 1-63. [Consulta: 15 febrero 2023]. Disponible en: <http://dspace.espoch.edu.ec/handle/123456789/17751>.

LENNTECH. Mercurio (Hg) - Propiedades químicas y efectos sobre la salud y el medio ambiente. [en línea]. 2022. [Consulta: 9 febrero 2023]. Disponible en: <https://www.lenntech.es/periodica/elementos/hg.htm>.

LLAMUCA ÑAÑAY, J.P. Evaluación de la actividad biosorbente de la cáscara de naranja y espiga de arroz para la remoción de mercurio inorgánico en solución acuosa. [en línea]. (Trabajo de titulación). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Ciencias, Escuela de Ciencias Químicas, Riobamba, Ecuador. 2018. pp. 1-71. [Consulta: 15 febrero 2023]. Disponible en: <http://dspace.espoch.edu.ec/handle/123456789/9752>.

MACÍAS ERAZO, K.E. Aplicación de nanopartículas magnéticas de hierro (magnetita) en la adsorción de arsénico en aguas contaminadas. [en línea]. (Trabajo de titulación). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Ciencias, Escuela de Ingeniería Química, Riobamba, Ecuador. 2022. pp. 1-84. [Consulta: 15 febrero 2023]. Disponible en: <http://dspace.espoch.edu.ec/handle/123456789/16939>.

MINISTERIO DEL AMBIENTE. Convenio de Minamata sobre Mercurio: Ratificación peruana. [en línea]. 2016. Primera. Lima: s.n. [Consulta: 30 abril 2022]. Disponible en: www.minam.gob.pe.

MINISTERIO DEL AMBIENTE AGUA Y TRANSICIÓN ECOLÓGICA. Acuerdo mundial para reducir emisiones de mercurio. [en línea]. 2022. [Consulta: 26 abril 2022]. Disponible en: <https://www.ambiente.gob.ec/ecuador-aplica-fuertes-medidas-ante-emisiones-de-mercurio/>.

POSADA, M. Isabel. y ARROYAVE, M. del Pilar. Efectos del mercurio sobre algunas plantas acuáticas tropicales. *Revista EIA*. [en línea], 2006. no. 6, ISSN 1794-1237. [Consulta: 26 abril 2022]. Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-12372006000200006&lng=en&nrm=iso&tlng=es.

REAL ACADEMIA ESPAÑOLA y ASALE. Adsorbente. *Diccionario de la lengua española*. [en línea]. 2022. [Consulta: 28 abril 2022]. Disponible en: <https://dle.rae.es/adsorbente?m=form>.

REAL ACADEMIA ESPAÑOLA y ASALE. Isotermo, isoterma. *Diccionario de la lengua española*. [en línea]. 2022. [Consulta: 28 abril 2022]. Disponible en: <https://dle.rae.es/isotermo#MCefujQ>.

ROJAS, H.A., GUERRERO, D.C., VÁSQUEZ, O.Y. y VALENCIA, J.S. Aplicación del Modelo de Bohart y Adams en la Remoción de Mercurio de Drenajes de Minería por Adsorción con Carbón Activado. *Información tecnológica*. [en línea], 2012. vol. 23, no. 3, ISSN 0718-0764. DOI 10.4067/S0718-07642012000300004. [Consulta: 25 abril 2022]. Disponible en: http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642012000300004&lng=en&nrm=iso&tlng=en.

SÁNCHEZ, J. y CAMESELLE, C. Biosorción de mercurio (Hg²⁺) usando materiales solidos residuales como adsorbentes. *Afinidad. Journal of Chemical Engineering Theoretical and Applied Chemistry*. [en línea], 2017. vol. 74, no. 577, ISSN 2339-9686. [Consulta: 27 abril 2022]. Disponible en: <https://raco.cat/index.php/afinidad/article/view/320727/411224>.

SANTIAGO BARAHONA, B. Funcionalización de materiales nanocarbonosos con polietilenimina. [en línea]. 2016. S.l.: s.n. [Consulta: 28 abril 2022]. Disponible en: <https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/8213/382715.pdf?sequence=1>.

TUBERT, I. y TALANQUER, V. Sobre adsorción. *Educación Química*. [en línea], 2018. vol. 8, no. 4, ISSN 1870-8404. DOI <http://dx.doi.org/10.22201/fq.18708404e.1997.4.66595>. [Consulta: 27 abril 2022]. Disponible en: <http://revistas.unam.mx/index.php/req/article/view/66595/58495>.

TUBÓN RENGEL, K.A. Adsorción de plomo sobre carbón activado obtenido de residuos de frutos de *Crescentia Cujete*. [en línea]. (Trabajo de titulación). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Ciencias, Escuela de Ciencias Químicas, Riobamba, Ecuador. 2021. pp. 1-98. [Consulta: 15 febrero 2023]. Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/14620>.

VALENCIA RÍOS, J.S. y CASTELLAR ORTEGA, G.C. Predicción de las curvas de ruptura para la remoción de plomo (II) en disolución acuosa sobre carbón activado en una columna empacada. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*. [en línea], 2013. vol. 66,

no. 66, ISSN 0120-6230. [Consulta: 21 febrero 2023]. Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-62302013000100012&lng=en&nrm=iso&tlng=es.

VERA GASKELL, V.E. y MOROCHO CHUCHUCA, D.A. Evaluación de adsorción de plomo y mercurio en carbón activado proveniente de la cascarilla de arroz. [en línea]. (Trabajo de titulación). Universidad Técnica de Machala, Facultad de Ciencias Químicas y de la salud, Escuela de Ingeniería Química, El Oro, Ecuador. 2015. pp. 1-53. [Consulta: 30 abril 2022]. Disponible en: <http://repositorio.utmachala.edu.ec/bitstream/48000/3653/1/CD000027-TRABAJO%20COMPLETO-pdf>.

WEINBERG, P.J. Introducción a la Contaminación por Mercurio para las ONG. [en línea]. 2010. S.l.: s.n. [Consulta: 27 abril 2022]. Disponible en: https://ipen.org/sites/default/files/documents/ipen_mercury_booklet-es.pdf.



ANEXOS

ANEXO A: MATERIA PRIMA DE LA INVESTIGACIÓN



Carbón activado comercial

Fórmula: C

Cantidad: 2 kg

Masa Molar: 12.011 g/mol

Distribuidor: Casa del Químico

Realizado por: Chuto K., Guamán B., 2023.

ANEXO B: MATERIALES UTILIZADOS EN LA INVESTIGACIÓN



- | | |
|---|--|
| <ol style="list-style-type: none">1. Tubos Falcon de 15 y 50 mL.2. Embudo buchner.3. Embudo simple.4. Mortero con pistilo.5. Matraz Erlenmeyer de 100 mL.6. Kitasato.7. Vasos de precipitación de 100, 250, 600, 1000 y 2000 mL.8. Vidrio reloj.9. Balones de aforo de 50, 100, 250 y 500 mL.10. Probetas de 100 y 1000 mL.11. Pipetas graduadas de 1, 3, 5 y 10 mL.12. Pipetas volumétricas de 10 mL.13. Bureta de 50 mL.14. Micropipeta.15. Puntas plásticas para micropipeta.16. Filtros de jeringas. | <ol style="list-style-type: none">17. Crisol.18. Pinzas metálicas para crisol.19. Jeringas de 10 mL.20. Espátula con cuchara.21. Gradilla de tubos de ensayo.22. Soporte universal.23. Pinzas de soporte universal.24. Piseta.25. Papel filtro.26. Valde plástico de 10000 mL.27. Mangueras plásticas.28. Bandejas plásticas de aluminio.29. Varilla de agitación.30. Guantes.31. Máscara con filtros de carbono.32. Canicas de vidrio. |
|---|--|

Realizado por: Chuto K., Guamán B., 2023.

ANEXO C: REACTIVOS UTILIZADOS EN LA INVESTIGACIÓN

 <p>Cloruro de Cobre Fórmula: CuCl_2 Cantidad: 1.2 kg Masa Molar: 12.011 g/mol</p>	 <p>Ácido Clorhídrico (37%) Fórmula: HCl Cantidad: 2.5 L Masa Molar: 36.46 g/mol</p>	 <p>Hidróxido de Sodio Fórmula: NaOH Cantidad: 100 g Masa Molar: 40 g/mol</p>
 <p>Ácido Nítrico Fórmula: HNO_3 Cantidad: 100 mL Masa Molar: 63.01 g/mol</p>	 <p>Borohidruro de Sodio Fórmula: NaBH_4 Cantidad: 100 g Masa Molar: 37.83 g/mol</p>	 <p>Agua destilada Fórmula: H_2O Cantidad: 15 L Masa Molar: 18.02 g/mol</p>
 <p>Estándar de Mercurio (II) Fórmula: Hg^{2+} Cantidad: 100 mL</p>	 <p>Oxido de Mercurio Fórmula: HgO Cantidad: 30 g Masa Molar: 216.6 g/mol</p>	

Realizado por: Chuto K., Guamán B., 2023.

ANEXO D: EQUIPOS UTILIZADOS EN LA INVESTIGACIÓN



Sorbona
Marca: *BIOBASE*
Modelo: FH1000(X)



Shaker
Marca: *ESCO*



Agitador Orbital Shaker
Marca: *BOECO*



Balanza Analítica Electrónica
Marca: *OHAUS*
Modelo: Explorer EX623



pH-metro
Marca: *Fisher Scientific*
Modelo: XL150



Estufa
Marca: *MEMMERT*
Modelo: FC-L. INV-015



Bomba de vacío



Microscopio Electrónico de Barrido



Espectrofotómetro de infrarrojo
Marca: *JASCO*
Modelo: FT/IR-4100



Columna de adsorción de lecho fijo



Generador de Hidruros VP100
Marca: *Thermo Fisher*
Modelo: iC 300 Series



Purificador de agua

ANEXO E: PRUEBA PILOTO DE FUNCIONALIZACIÓN DE CARBÓN ACTIVADO



a.



b.



c.



d.



e.



f.



g.



h.



i.

a. Extracción al vacío del HCl del carbón activado.

b. Medición del pH de la muestra.

c. Lavado de la muestra.

d. Preparación del CuCl_2 .

e. Solución de CuCl_2 para la funcionalización química del carbón activado.

f. Homogenización del carbón activado y el CuCl_2 .

g. Agitación a 150 r.p.m. de la muestra.

h. Remoción de la muestra después del proceso de agitación.

i. Secado de la muestra de carbón activado funcionalizado.

Realizado por: Chuto K., Guamán B., 2023.

ANEXO F: PROCESO DE FUNCIONALIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA



a.



b.



c.



d.



e.



f.



g.



h.



i.

a. Reacción del HCl con el carbón activado.

b. Extracción al vacío del HCl de la muestra de carbón activado en la Sorbona.

c. Medición del pH de la muestra.

d. Preparación del CuCl_2 .

e. Homogenización del carbón activado y el CuCl_2 .

f. Secado de la muestra de carbón activado funcionalizado a $65\text{ }^\circ\text{C}$.

g. Extracción al vacío del CuCl_2 de la muestra.

h. Remoción de la muestra después del proceso de secado a $105\text{ }^\circ\text{C}$.

i. Pesado de la muestra final de carbón activado funcionalizado.

Realizado por: Chuto K., Guamán B., 2023.

ANEXO G: PRUEBAS ESTACIONARIAS



a.



b.



c.



d.



e.



f.



g.



h.



i.

a. Preparación de estándares de mercurio.
 b. Pesaje de carbón activado funcionalizado.
 c. Homogeneización de los estándares de mercurio con las muestras de carbón activado funcionalizado.
 d. Utilización del Shaker a diferentes temperaturas.
 e. Toma de alícuotas de 1 mL en tubos falcon de 15 mL para analizar en el generador de hidruros.

f. Filtración de muestras para eliminar sólidos residuales.
 g. Prueba estacionaria de isotermas de adsorción.
 h. Prueba estacionaria de carbón activado funcionalizado en contacto con diferentes pH.
 i. Prueba estacionaria de punto isoeléctrico.

Realizado por: Chuto K., Guamán B., 2023.

ANEXO H: PRUEBAS DINÁMICAS Y ANÁLISIS



a.



b.



c.



d.



e.



f.



g.



h.



i.

a. Armado de la columna dinámica de adsorción.

b. Preparación del material adsorbente de la columna dinámica.

c. Colocación del estándar de mercurio en la alimentación de la columna dinámica.

d. Preparación de borohidruro de sodio.

e. Preparación de estándares de mercurio para la curva de calibración del generador de hidruros.

f. Calibración del generador de hidruros.

g. Lectura de muestras de mercurio en el generador de hidruros.

h. Introducción de la muestra para el análisis SEM.

i. Visualización de los resultados del análisis SEM.

Realizado por: Chuto K., Guamán B., 2023.

**ANEXO I: RESULTADOS DE LA CINÉTICA DE ADSORCIÓN DE LA PRUEBA DE
TIEMPO DE CONTACTO**

Temperatura: 25 °C

Tiempo (s)	Concentración (ppb)	ln	1/[]	qt	log (qe-qt)	t/qt
0	400.95	5.9938	0.00249	0	1.9620	
30	399.24	5.9896	0.00250	0.4279	1.9600	
120	350.57	5.8596	0.00285	12.5965	1.8978	9.5264
300	291.36	5.6746	0.00343	27.3989	1.8078	10.9493
600	233.88	5.4548	0.00428	41.7690	1.6978	14.3647
1200	189.88	5.2464	0.00527	52.7687	1.5896	22.7407
2400	118.73	4.7768	0.00842	70.5569	1.3239	34.0150
3600	81.81	4.4044	0.01222	79.7854	1.0739	45.1210
4800	49.47	3.9015	0,02021	87.8699	0.5766	54.6262
6000	38.37	3.6474	0,02606	90.6451	-0.0010	66.1921
7200	36.86	3.6071	0.02713	91.0241	-0.2086	79.0999
9000	35.78	3.5773	0.02796	91.2943	-0.4580	98.5822
10800	34.79	3.5493	0.02875	91.5415	-0.9949	117.9792
14400	34.38	3.5376	0.02908	91.6426		157.1320

Realizado por: Chuto K., Guamán B., 2023.

Temperatura: 30 °C

Tiempo (s)	Concentración (ppb)	ln	1/[]	qt	log (qe-qt)	t/qt
0	589.22	6,3788	0,00169	0	2,1195	
30	469.00	6,1506	0,00213	30,0570	2,0070	0,9981
120	400.12	5,9917	0,00249	47,2765	1,9263	2,5382
300	357.71	5,8797	0,00279	57,8789	1,8680	5,1832
600	320.37	5,7694	0,00312	67,2147	1,8093	8,9266
1200	281.80	5,6412	0,00354	76,8568	1,7390	15,6134
2400	235.73	5,4627	0,00424	88,3731	1,6366	27,1575
3600	213.02	5,3614	0,00469	94,0515	1,5755	38,2768
4800	191.26	5,2536	0,00522	99,4901	1,5077	48,2459
6000	164.15	5,1008	0,00609	106,2675	1,4051	56,4612
7200	123.25	4,8142	0,00811	116,4929	1,1816	61,8063
9000	91.86	4,5203	0,01088	124,3406	0,8659	72,3818
10800	68.93	4,2331	0,01450	130,0736	0,2073	83,0298
14400	62.48	4,1349	0,01600	131,6855		109,3514

Realizado por: Chuto K., Guamán B., 2023.

Temperatura: 35 °C

Tiempo (s)	Concentración (ppb)	ln	1/[]	qt	log (qe-qt)	t/qt
0	446.40	6,1012	0,00224	0	2,0179	
30	393.55	5,9752	0,00254	13,2115	1,9590	2,2707
120	352.55	5,8652	0,00283	23,4612	1,9071	5,1148
300	284.68	5,6513	0,00351	40,4289	1,8046	7,4204
600	269.84	5,5978	0,00370	44,1394	1,7786	13,5932
1200	233.06	5,4513	0,00429	53,3343	1,7064	22,4995
2400	197.07	5,2836	0,00507	62,3310	1,6219	38,5041
3600	182.61	5,2074	0,00547	65,9458	1,5827	54,5902
4800	154.92	5,0429	0,00645	72,8684	1,4961	65,8721
6000	138.93	4,9339	0,00719	76,8673	1,4368	78,0565
7200	98.74	4,5925	0,01012	86,9141	1,2379	82,8404
9000	63.96	4,1582	0,01563	95,6105	0,9344	94,1318
10800	31.45	3,4486	0,03178	103,7361	-0,3255	104,1103
14400	29.56	3,3866	0,03382	104,2086		138,1842

Realizado por: Chuto K., Guamán B., 2023.

ANEXO J: RESULTADOS DE LA PRUEBA ESTACIONARIA DE LAS ISOTERMAS DE ADSORCIÓN

Temperatura: 25 °C

Concentración teórica inicial (ppb)	Concentración real inicial Hg (ppb)	Concentración final Hg (ppb) a 25 °C	x=Co-Ce	q=x/m
100	97,57	87,68	9,8920	0,00197
250	244,16	96,87	147,2897	0,02945
500	457,15	279,19	177,9611	0,03559
750	734,84	377,39	357,4504	0,07149
1000	1097,73	678,87	418,8596	0,08377
1500	1402,64	1005,30	397,3400	0,07946
2000	2101,98	1683,11	418,8702	0,08377

Realizado por: Chuto K., Guamán B., 2023.

log Ce	log q	1/Ce	1/q	qe/ce	ce/qe
	-2,7036	0,01140	505,4589	2,2563E-05	44320,4104
1,9862	-1,5307	0,01032	33,9467	0,00030	3288,5870
2,4459	-1,4486	0,00358	28,0960	0,00012	7844,1327
2,5767	-1,1457	0,00264	13,9879	0,00018	5279,0107
2,8317	-1,0769	0,00147	11,9371	0,00012	8103,8658
3,0022	-1,0998	0,00099	12,5836	7,9048E-05	12650,4631
3,2261	-1,0768	0,00059	11,9368	4,9773E-05	20091,1225

Realizado por: Chuto K., Guamán B., 2023.

Temperatura: 30 °C

Concentración teórica inicial (ppb)	Concentración real inicial Hg (ppb)	Concentración final Hg (ppb) a 30 °C	x=Co-Ce	q=x/m
100	97,57	53,68	43,8943	0,00877
250	244,16	87,24	156,9224	0,03138
500	457,15	203,32	253,8312	0,05076
750	734,84	322,97	411,8676	0,08237
1000	1097,73	627,20	470,5280	0,09410
1500	1402,64	991,20	411,4390	0,08228
2000	2101,98	1673,66	428,3207	0,08566

Realizado por: Chuto K., Guamán B., 2023.

log Ce	log q	1/Ce	1/q	qe/ce	ce/qe
1,7298	-2,0565	0,01862	113,9100	0,00016	6114,8258
1,9407	-1,5032	0,01146	31,8628	0,00035	2779,7911
2,3081	-1,2944	0,00491	19,6981	0,00024	4005,0238
2,5091	-1,0842	0,00309	12,1398	0,00025	3920,9165
2,7974	-1,0263	0,00159	10,6263	0,00015	6664,9381
2,9961	-1,0846	0,00100	12,1524	8,3018E-05	12045,6252
3,2236	-1,0672	0,00059	11,6734	5,1184E-05	19537,5101

Realizado por: Chuto K., Guamán B., 2023.

Temperatura: 35 °C

Concentración teórica inicial (ppb)	Concentración real inicial Hg (ppb)	Concentración final Hg (ppb) a 35 °C	x=Co-Ce	q=x/m
100	97,57	39,46	58,1129	0,01162
250	244,16	67,11	177,0476	0,03540
500	457,15	152,54	304,6041	0,06092
750	734,84	247,39	487,4554	0,09749
1000	1097,73	487,98	609,7480	0,12194
1500	1402,64	988,34	414,3037	0,08286
2000	2101,98	1544,99	556,9860	0,11139

Realizado por: Chuto K., Guamán B., 2023.

log Ce	log q	1/Ce	1/q	qe/ce	ce/qe
1,5961	-1,9346	0,02534	86,0394	0,00029	3395,3390
1,8268	-1,4508	0,01489	28,2409	0,00052	1895,4535
2,1834	-1,2152	0,00655	16,4147	0,00039	2504,0224
2,3933	-1,0110	0,00404	10,2573	0,00039	2537,5849
2,6884	-0,9138	0,00204	8,2001	0,00024	4001,5547
2,9949	-1,0816	0,00101	12,0684	8,3838E-05	11927,7634
3,1889	-0,9531	0,00064	8,9768	7,2102E-05	13869,2777

Realizado por: Chuto K., Guamán B., 2023.

ANEXO K: RESULTADOS DE LA CAPACIDAD DE ADSORCIÓN DE LA PRUEBA DE PH

pH final	Resultado obtenido (ppb)	Porcentaje removido (%)	Porcentaje residual (%)	qe (ppb)
2	279,44	64	36	24,8394
3	256,15	67	33	26,0037
4	186,29	76	24	29,4968
5	131,95	83	17	32,2136
6	108,67	86	14	33,3779
7	170,77	78	22	30,2730
9	217,34	72	28	27,9443
10	240,63	69	31	26,7799

Realizado por: Chuto K., Guamán B., 2023.

**ANEXO L: RESULTADOS DE LA CAPACIDAD DE ADSORCIÓN DE LA PRUEBA DE
MASA ADSORBENTE**

Masa del adsorbente (g)	Concentración (ppb)	qe	%RE
0	445,56		
0,3	250,43	26,02	43,79
0,5	150,95	23,57	66,12
0,8	65,86	18,99	85,22
1	5,08	17,62	98,86
1,25	0,06	14,26	99,99

Realizado por: Chuto K., Guamán B., 2023.

**ANEXO M: RESULTADOS DE LA CAPACIDAD DE ADSORCIÓN DE LAS PRUEBAS
DINÁMICAS**

Caudal de 7 mL/min

Tiempo (horas)	Concentración caudal 7 mL/min (ppb)	%RE	Qe
0	21,26	97,74	91,9625
0,2	25,62	97,27	91,5266
0,4	25,10	97,33	91,5785
0,8	22,40	97,61	91,8488
1	25,04	97,33	91,5844
2	24,26	97,42	91,6631
3	23,85	97,46	91,7037
4	24,19	97,42	91,6701
5	28,64	96,95	91,2248
6	20,54	97,81	92,0347
7	24,47	97,39	91,6416
8	22,31	97,62	91,8575
9	27,35	97,09	91,3540
10	26,38	97,19	91,4513
12	28,92	96,92	91,1965
15	32,19	96,57	90,8695
18	37,01	96,06	90,3881
21	36,19	96,15	90,4702
24	39,92	95,75	90,0968

Realizado por: Chuto K., Guamán B., 2023.

Caudal de 15 mL/min

Tiempo (horas)	Concentración caudal 15 mL/min (ppb)	%RE	Qe
0	27,75	97,05	90,7126
0,2	28,77	96,94	90,6103
0,4	31,65	96,63	90,3225
0,8	29,98	96,81	90,4902
1	29,23	96,89	90,5653
2	32,87	96,50	90,2003
3	29,32	96,88	90,5562
4	31,63	96,63	90,3243
5	28,14	97,00	90,6733
6	26,95	97,13	90,7929
7	26,77	97,15	90,8108
8	32,80	96,51	90,2082
9	32,53	96,54	90,2347
10	33,59	96,43	90,1291

Realizado por: Chuto K., Guamán B., 2023.



UNIDAD DE PROCESOS TÉCNICOS Y ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO Y DOCUMENTAL

REVISIÓN DE NORMAS TÉCNICAS, RESUMEN Y BIBLIOGRAFÍA

Fecha de entrega: 18 / 07 / 2023

INFORMACIÓN DEL AUTOR/A (S)
Nombres – Apellidos: Kevin Ronaldo Chuto Lema Byron Raúl Guamán Silva
INFORMACIÓN INSTITUCIONAL
Facultad: Ciencias
Carrera: Ingeniería Química
Título a optar: Ingeniero Químico
f. Analista de Biblioteca responsable: Ing. Rafael Inty Salto Hidalgo

1201-DBRA-UPT-2023