

Escuela Superior Politécnica del Litoral

Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas

Diseño a escala de laboratorio de un lecho empacado con materiales sustentables
para adsorción de cadmio y pesticidas clorados en aguas subterráneas

Proyecto Integrador

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero Químico

Presentado por:

Kevin Alexander Crespo Reyes

Fátima Paola Jalil Ramírez

Guayaquil - Ecuador

Año: 2024

Dedicatoria

El presente proyecto se lo dedico a mis padres, quienes me han apoyado en mi formación académica. Mi hermano Pablo, por acompañarme en varios momentos importantes. A Cristian, quien me ha ayudado en los momentos más difíciles y ha sido mi fortaleza. A mis amigos, Emilia, Gianella, Loren, Silvia, Marian, José, Michael, quienes con sus ocurrencias y buen ánimo han hecho llevaderos los momentos de esta etapa universitaria. Por último, a Kevin, por dar todo de sí y ser parte de este trabajo.

Fátima Jalil Ramírez

Dedicatoria

El presente proyecto se lo dedico a mi padre, por haberme apoyado incondicionalmente. Este objetivo cumplido también le corresponde a él. A mi madre por sus enseñanzas y los consejos. A mis hermanos y a las personas que me acompañaron en mi etapa universitaria, aunque algunos ya no estén presentes, hicieron que este momento de mi vida sea mucho más ameno. ¡Gracias totales!

Kevin Crespo Reyes

Agradecimientos

Nuestros más sinceros agradecimientos a los tutores de este trabajo, PhD. Joan Vera y MSc. Nadia Flores, por su paciencia, apoyo y enseñanzas. A la docente, MSc. Ma. Verónica Ordóñez por sus retroalimentaciones. Al MSc. Kevin Cedeño por colaborar en este trabajo. A nuestros profesores, quienes nos formaron académicamente para lograr esta meta. A las personas que nos colaboraron en el desarrollo con su ayuda oportuna.

Kevin Crespo Reyes y Fátima Jalil Ramírez

Declaración Expresa

Nosotros Kevin Alexander Crespo Reyes y Fátima Paola Jalil Ramírez acordamos y reconocemos que:

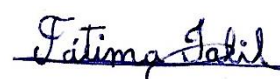
La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores. La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por mí/nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de nuestra innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique los autores que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 10 de noviembre del 2023.



Kevin Crespo Reyes



Fátima Jalil Ramírez

Evaluadores

Ma. Verónica Ordóñez Pazmiño, M.Sc.

Profesor de Materia

Joan Vera Villalobos, Ph.D.

Tutor de proyecto

Nadia Flores Manrique, M.Sc.

Cotutor de proyecto

Resumen

La contaminación del agua en la zona rural del Guayas proviene principalmente por metales pesados y pesticidas clorados debido a la actividad industrial y agrícola. El tratamiento de agua para riego por medio de materiales sustentables ecuatorianos propone una alternativa viable respecto a tratamientos convencionales. El propósito de esta investigación es el diseño de un lecho empacado utilizando zeolita, quitina y carbón activado proveniente de raquis de banano. Para analizar el comportamiento del proceso se realizaron experimentos de equilibrio y de columna de lecho fijo. Los datos experimentales se ajustaron a los modelos de Freundlich y Langmuir. Se determinó como resultado una capacidad de adsorción mayor 100 mg/g para reducir la concentración de un pesticida clorado inicialmente de 200 ppm; y una capacidad de adsorción de entre 5.98 a 4.67 g de cadmio/g adsorbente, cuya concentración inicial fue a 2 ppm. Se obtuvo un porcentaje de remoción, por parte de los adsorbentes, de entre 83% a 99%. Esta investigación corrobora que los adsorbentes propuestos son efectivos para la remoción de azul de metileno, cadmio y clorotalonil, de forma individualizada y como lecho mixto; con ello se proporciona un diseño escalado y prototipado.

Palabras Clave: bioadsorbentes, porcentajes de remoción, curvas de ruptura, prototipo.

Abstract

Water contamination in the rural zone of Guayas is mainly caused by heavy metals and chlorinated pesticides due to industrial and agricultural activity. The treatment of irrigation water employing sustainable Ecuadorian materials proposes a viable alternative versus conventional treatments. The purpose of this research is the design of a packed bed using zeolite, chitin and activated carbon from banana rachis. To analyze the behavior of the process, equilibrium and fixed bed column experiments were carried out. The experimental data were adjusted to the models of Freundlich and Langmuir. As a result, an adsorption capacity greater than 100 mg/g was determined to reduce the concentration of a chlorinated pesticide of 200 ppm initially; and an adsorption capacity between 5.98 to 4.67 g of cadmium/g adsorbent, whose initial concentration was 2 ppm. A removal rate of 83% to 99% was obtained for the adsorbents. This research corroborates that the proposed adsorbents are effective for the removal of methylene blue, cadmium and chlorothalonil, individually and as a mixed bed, thus providing a scaled and prototyped design.

Keywords: bioadsorbents, percentages of removal, breakthrough curves, prototype.

Índice general

Evaluadores.....	vi
Resumen	vii
Abstract	viii
Índice general	ix
Abreviaturas	xiii
Simbología	xiv
Capítulo 1	1
1.1. Introducción.....	2
1.2. Descripción del problema	2
1.3. Justificación del problema	4
1.4. Objetivos.....	5
1.4.1. <i>Objetivo general</i>	5
1.4.2. <i>Objetivos específicos</i>	5
1.5. Marco teórico.....	5
1.5.1. <i>Contaminación del agua en Ecuador</i>	5
1.5.2. <i>Impacto del cadmio, el azul de metileno y los pesticidas clorados</i>	6
1.5.3. <i>Tecnología de remoción de metales pesados y pesticidas clorados en agua subterráneas</i>	7
1.5.3.1. Adsorción.....	7
1.5.4. <i>Lechos empacados</i>	9
1.5.4.1. Zeolita.....	11

1.5.4.2. Cáscara de camarón	11
1.5.4.3. Raquis de banano	12
Capítulo 2	13
2.1. Metodología.....	14
2.1.1. <i>Bioadsorbentes</i>	14
2.1.2. <i>Tratamiento de materia prima</i>	14
2.1.2.1. Raquis de banano	14
2.1.2.2. Zeolita.....	17
2.1.2.3. Quitina.....	18
2.1.3. <i>Caracterización de los adsorbentes</i>	19
2.1.4. <i>Diseño de experimento</i>	19
2.1.4.1. Equilibrio de adsorción	20
2.1.4.2. Adsorción en columna de lecho fijo	22
2.1.4.3. Adsorción por lotes	22
2.1.4.4. Adsorción en columna	24
2.1.5. <i>Adsorción en lecho mixto</i>	26
Capítulo 3	27
3.1. Resultados y análisis.....	28
3.1.1. <i>Caracterización de adsorbentes por FTIR</i>	28
3.1.1.1. Análisis FTIR de quitina	28
3.1.1.2. Análisis FTIR de zeolita	28
3.1.1.3. Análisis FTIR de carbón de raquis de banano.....	29

3.1.2. Adsorción por lotes de azul de metileno	29
3.1.3. Adsorción por lotes de cadmio	32
3.1.4. Adsorción por lotes de pesticidas	35
3.1.5. Estimación de masa de adsorbente	38
3.1.6. Porcentaje de remoción	39
3.1.7. Adsorción en columna de cadmio	42
3.1.8. Adsorción en columna de pesticida organoclorado	44
3.1.10. Diseño de lecho empacado mixto	48
3.1.11. Modelado y simulación	50
Capítulo 4	55
4.1. Conclusiones y recomendaciones	56
4.1.1. Conclusiones	56
4.1.2. Recomendaciones	59
Referencias	60
Apéndice A	67
A.1. Límite máximo permisible de cadmio (Presidencia de la República de Ecuador, 2008)..	67
A.2. Límite máximo permisible de pesticidas organofosforados totales (Presidencia de la República de Ecuador, 2008).	67
Apéndice B	68
B.1. Tipos de Isotermas	68
B2. Balance de materia	68
B3. Resultados de adsorción por lotes	69

Apéndice C.....	78
C.1. Curvas de calibración empleadas.....	78
Apéndice D.....	80
D.1. Resultados de adsorción en columnas: Cadmio	80
D.2. Resultados de adsorción en columnas: Clorotalonil.....	82
Apéndice E.....	85
E.1. Resultados en ANSYS	85
E.2. Modelado en ANSYS	86

Abreviaturas

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
IANAS	Red Interamericana de Academias de Ciencias
TULSMA	Texto Unificado de Legislación Secundaria de Medioambiente
LMP	Límite Máximo Permisible
ATSDR	Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades

Simbología

m	Metro
mm	Milímetro
μm	Micrón
s	Segundo
h	Hora
g	Gramo
mg	Miligramo
μg	Microgramo
pH	Potencial de Hidrógeno
ppm	Partes por millón
$^{\circ}\text{C}$	Grados Celsius
rpm	Revoluciones por minuto
\$	Dólar estadounidense
ZT	Zeolita
CCT	Cáscara de camarón tratada
CB	Carbón de raquis de banano
q	Capacidad de adsorción
C	Concentración
AC	Acetato de cadmio
AM	Azul de metileno
PC	Pesticidas clorados

Índice de Figuras

Figura 1. <i>a) Perfiles de concentración y b) curva de ruptura para adsorción en un lecho fijo</i>	9
Figura 2. <i>Diseño típico de un lecho empacado</i>	10
Figura 3. <i>Proceso de tratamiento del raquis de banano</i>	15
Figura 4. <i>Proceso de carbonización del raquis de banano</i>	16
Figura 5. <i>Carbón de raquis de banano con tamaño de partícula entre 1 mm y 600 μm</i>	16
Figura 6. <i>a) Tamices de 1mm y 600μm. b) Zeolita con tamaño de partícula entre 1 mm y 600 μm</i>	17
Figura 7. <i>Zeolita activada con tamaño de partícula entre 1 mm y 600 μm</i>	17
Figura 8. <i>Quitina con tamaño de partícula entre 600 μm y 300 μm</i>	18
Figura 9. <i>Elaboración de columnas de lecho empacado</i>	25
Figura 10. <i>Curva de ruptura típica en columna de adsorción</i>	25
Figura 11. <i>Isoterma de Adsorción Azul de metileno</i>	30
Figura 12. <i>Isoterma de Adsorción Cadmio</i>	32
Figura 13. <i>Isoterma de Adsorción de Clorotalonil</i>	35
Figura 14. <i>Porcentajes de remoción obtenidos para la adsorción de Azul de metileno</i>	39
Figura 15. <i>Porcentajes de remoción obtenidos para la adsorción de Cadmio</i>	40
Figura 16. <i>Porcentajes de remoción obtenidos para la adsorción de pesticida clorotalonil</i>	41
Figura 17. <i>Curva de ruptura de Cadmio en los adsorbentes</i>	42
Figura 18. <i>Curva de ruptura de pesticida Clorotalonil</i>	44
Figura 19. <i>Curva de concentración de lecho mixto – Azul de metileno</i>	46
Figura 20. <i>Curva de concentración de lecho mixto – Pesticida</i>	47
Figura 21. <i>Modelado en Aspen Plus®</i>	51
Figura 22. <i>Simulación en Aspen Adsorption®</i>	52
Figura 23. <i>Renderizado con vista isométrica lateral de lecho empacado mixto</i>	54

Figura 24. <i>Renderizado con vista isométrica frontal-superior de lecho empacado mixto</i>	54
Figura 25. <i>Clasificación de las isotermas según la IUPAC</i>	68
Figura 26. <i>Ajuste con el modelo de Freundlich de Azul de metileno - Carbón</i>	69
Figura 27. <i>Ajuste con el modelo de Langmuir de Azul de metileno - Carbón</i>	70
Figura 28. <i>Ajuste con el modelo de Freundlich de Azul de metileno - Quitina</i>	71
Figura 29. <i>Ajuste con el modelo de Langmuir de Azul de metileno - Quitina</i>	72
Figura 30. <i>Isotermas de Azul de metileno</i>	72
Figura 31. <i>Ajuste con el modelo de Freundlich de Cadmio-Carbón</i>	73
Figura 32. <i>Ajuste con el modelo de Langmuir de Cadmio-Carbón</i>	73
Figura 33. <i>Ajuste con el modelo de Freundlich de Cadmio-Zeolita</i>	74
Figura 34. <i>Ajuste con el modelo de Langmuir de Cadmio-Zeolita</i>	74
Figura 35. <i>Ajuste con el modelo de Freundlich de Cadmio-Quitina</i>	75
Figura 36. <i>Ajuste con el modelo de Langmuir de Cadmio-Quitina</i>	75
Figura 37. <i>Ajuste con el modelo de Freundlich de Pesticida-Carbón</i>	76
Figura 38. <i>Ajuste con el modelo de Langmuir de Pesticida-Carbón</i>	76
Figura 39. <i>Ajuste con el modelo de Freundlich de Pesticida-Quitina</i>	77
Figura 40. <i>Ajuste con el modelo de Langmuir de Pesticida-Quitina</i>	77
Figura 41. <i>Curva de calibración de Azul de metileno del equipo Thermo Scientific® Spectronic 200</i>	78
Figura 42. <i>Curva de calibración de Cadmio del equipo Thermo Scientific® iCAP 7000 SERIES</i>	78
Figura 43. <i>Curva de calibración a partir de la mezcla de contaminantes: Azul de metileno</i>	79
Figura 44. <i>Curva de calibración a partir de la mezcla de contaminantes: Clorotalonil</i>	79
Figura 45. <i>Curvas de ruptura de los adsorbentes con Cadmio</i>	81
Figura 46. <i>Curvas de ruptura de los adsorbentes con Pesticida</i>	83

Figura 47. <i>Deformación total del filtro obtenida de análisis FEM</i>	85
Figura 48. Factor de seguridad obtenido de la herramienta de esfuerzos utilizando FEM	86
Figura 49. Modelado del sólido en Autodesk INVENTOR	87
Figura 50. Entorno de trabajo en ANSYS WORKBENCH	87
Figura 51. Mallado del sólido utilizando elementos prismáticos	88
Figura 52. Calidad de elementos utilizados para el mallado	88
Figura 53. Asignación de condiciones de frontera en la superficie.....	89
Figura 54. Deformación total resultante en el filtro	90
Figura 55. Deformación unitaria equivalente en el filtro	90
Figura 56. Distribución de esfuerzos a lo largo del filtro.....	91
Figura 57. Factor de seguridad en el filtro	91

Índice de Tablas

Tabla 1. <i>Descripción y origen de los bioadsorbentes</i>	14
Tabla 2. <i>Diseño de experimento de adsorción por lotes</i>	21
Tabla 3. <i>Diseño de experimento adsorción en columna de lecho fijo</i>	22
Tabla 4. <i>Diseño de experimento de adsorción por columnas de lecho mixto</i>	26
Tabla 5. <i>Análisis FTIR de quitina</i>	28
Tabla 6. <i>Análisis FTIR de zeolita</i>	28
Tabla 7. <i>Análisis FTIR de carbón activado a partir de raquis de banano</i>	29
Tabla 8. Modelos de los adsorbentes en Azul de metileno	30
Tabla 9. Modelos de los adsorbentes en Cadmio	33
Tabla 10. Modelos de los adsorbentes en Clorotalonil	36
Tabla 11. <i>Masa necesaria de adsorbentes según el contaminante utilizado para un volumen de 2000L</i>	39
Tabla 12. Modelo empleado de lecho mixto	45
Tabla 13. <i>Propuesta de diseño escalado de lecho mixto</i>	48
Tabla 14. Intervalos típicos de diseño para columnas GAC en el tratamiento de aguas residuales.....	48
Tabla 15. <i>Datos de diseño escalado de lecho mixto</i>	49
Tabla 16. <i>Identificación de los principales equipos</i>	51
Tabla 17. <i>Datos de alimentación</i>	52
Tabla 18. <i>Datos de salida</i>	52
Tabla 19. <i>Límite máximo permisible de cadmio en agua</i>	67
Tabla 20. <i>Límite máximo permisible para organoclorados totales</i>	67
Tabla 21. <i>Datos experimentación batch Azul de metileno - Carbón</i>	69
Tabla 22. <i>Datos experimentación batch Azul de metileno - Zeolita</i>	70

Tabla 23. <i>Datos experimentación batch Azul de metileno - Quitina</i>	71
Tabla 24. <i>Datos experimentación batch Cadmio - Carbón</i>	73
Tabla 25. <i>Datos experimentación batch Cadmio - Zeolita</i>	74
Tabla 26. <i>Datos experimentación batch Cadmio - Quitina</i>	75
Tabla 27. <i>Datos experimentación batch Pesticida - Carbón</i>	76
Tabla 28. <i>Datos experimentación batch Pesticida - carbón</i>	77
Tabla 29. <i>Datos experimentación curva de ruptura Cadmio-Carbón</i>	80
Tabla 30. <i>Datos experimentación curva de ruptura Cadmio-Zeolita</i>	80
Tabla 31. <i>Datos experimentación curva de ruptura Cadmio-Quitina</i>	81
Tabla 32. <i>Datos experimentación curva de ruptura Pesticida-Carbón</i>	82
Tabla 33. <i>Datos experimentación curva de ruptura Pesticida-Quitina</i>	82
Tabla 34. <i>Datos de la columna 1 de matriz real con pesticida</i>	83
Tabla 35. <i>Datos de la columna 2 de matriz real con pesticida</i>	84

CAPÍTULO 1

1.1. Introducción

La población rural conformada de 647,461 personas de la provincia del Guayas (INEC, 2020), en Ecuador, usa aguas subterráneas de pozos y ríos para uso doméstico y agrícola, en donde esta última actividad ha contaminado estas fuentes hídricas con metales pesados, compuestos orgánicos y pesticidas clorados. Las investigaciones previas realizadas indican que los materiales como la zeolita, la quitina y el carbón vegetal pueden emplearse como adsorbentes de compuestos indeseados presentes en el agua. Sin embargo, no sugieren un modelo que incluya una combinación de los materiales usados y la capacidad de adsorción, por lo que se pretende diseñar un filtro que sea utilizable por los productores de banano del sector rural, en lugar de sistemas de tratamientos de aguas costosos que requieren elevadas cantidades de energía y varios metros cuadrados para su colocación.

1.2. Descripción del problema

La contaminación de las aguas superficiales es un problema generalizado en todo el país y tiene vínculos con las fuentes urbanas y agrícolas. Ecuador cuenta con una extensa red hídrica que incluye ríos significativos como el Guayas, el Esmeraldas, el Pastaza y el Napo. A nivel nacional, las principales fuentes de contaminación son los asentamientos humanos y las aguas residuales sin tratamiento que se vierten en los ríos. En la región costera, la contaminación por pesticidas clorados y fertilizantes se asocia principalmente con la producción agrícola de banano y palma africana. Además, la actividad camaronera y acuícola en general está estrechamente relacionada con la contaminación de esteros y aguas superficiales (Secretaría del Agua Ecuatoriana, 2019). Las prácticas agrícolas deficientes y las condiciones geográficas favorecen el aumento de sedimentos en los ríos, afectando así la capacidad de almacenamiento de los reservorios y embalses.

El 85% del agua utilizada para riego en Ecuador se destina a procesos agrícolas (Antúnez Sánchez & Guanoquiza Tello, 2019). En cuanto a la presencia de sustancias químicas en el agua, se ha identificado el cadmio. Un análisis de las aguas del Río Daule reveló que el 85% de las muestras presentaban concentraciones de cadmio superiores al límite de efecto establecido en 0.6 mg.kg^{-1} , aunque aún por debajo del umbral probable de efectos biológicos perjudiciales para la salud. Además, el estudio señala la detección de organoclorados en un 53.3% de los muestreos realizados. De los 23 organoclorados analizados, se identificaron 9 tipos, entre ellos, 1,2-dicloro-4-isocianato-benceno en un 31%, 4,4-DDD en un 19%, y aldrina, metoxicloro y endosulfán-sulfato, cada uno en un 1.7%. Otros compuestos como dieldrín, fenamifos, heptacloro y HCH-Delta también fueron detectados, aunque en concentraciones más bajas, específicamente en un 0.83% (IANAS, 2021).

En el país, el 20.7% del agua fuente consumida está contaminada. En el área rural, el porcentaje de agua contaminada se incrementa hasta el 31.8%. En la zona rural, el consumo de agua contaminada por el tipo de suministro es del 45.8% de la red pública, el 19.8% de otra fuente por tubería y el 12% por pozo protegido/entubado (Diario La Hora, 2017).

La presencia de contaminantes en el agua es perjudicial para las plantaciones de los productores en el sector rural debido a que reducen su capacidad para crecer y desarrollarse de manera saludable; además se ve afectada la calidad del suelo, por lo que la productividad se reduce. Por último, la ingesta de alimentos contaminados representa un riesgo para la salud de las comunidades agrícolas y el consumidor final (IANAS, 2021).

La ausencia de mecanismos para la reducción de contaminantes de las fuentes de agua en el sector rural tiene como consecuencia la necesidad de desarrollar estrategias con el fin de mejorar la calidad del agua. En el Ecuador, actualmente existen planes como la Gestión Social del Agua, que incluye a la actividad de la Escuela de Agua donde se estudia aspectos claves para la

sostenibilidad de los sistemas de agua; sin embargo, no incluyen herramientas físicas con la capacidad de resolver esta problemática (Ayuda en acción Ecuador, 2021).

1.3. Justificación del problema

Este trabajo se realiza con la finalidad de diseñar un filtro a escala de laboratorio con la capacidad de adsorber contaminantes (pesticidas clorados, azul de metileno y cadmio) presentes en el agua que es destinada al riego de las plantaciones en el sector rural del Ecuador. La realización del proyecto está orientado a conseguir un prototipo adecuado que tenga la suficiente capacidad de adsorber residuos peligrosos y los mantenga en los límites permisibles establecidos por las normas regulatorias nacionales.

La calidad del agua afecta directamente a los sembríos en el campo rural, por lo que es indispensable desarrollar mecanismos que permitan eliminar componentes no deseados. Este proyecto responde a la necesidad del sector bananero, quienes buscan utilizar agua proveniente de acuíferos, libre de contaminantes, para sus actividades productivas.

Entre las restricciones se tiene que el lecho empacado modelado debe ser de bajo costo y accesible para los dueños de pequeñas fincas, además de ser de fácil uso y diseñado para un bajo flujo de agua. Los elementos del lecho empacado deben ser inertes químicamente y no deben significar un contaminante adicional al agua. El diseño tiene que garantizar el tratamiento de agua subterránea cumpla con la calidad de este recurso, establecida según la normativa nacional del Anexo 1 del Libro VI del TULSMA (Presidencia de la República de Ecuador, 2008).

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Evaluar la capacidad de adsorción de un lecho empacado basado en quitina, zeolita y carbón de raquis de banano para remoción de cadmio, y pesticidas clorados en aguas subterráneas a escala de laboratorio.

1.4.2. Objetivos específicos

1. Cuantificar la remoción de los contaminantes seleccionados empleando distintos materiales filtrantes, estableciendo los respectivos modelos de adsorción por lotes y de flujo continuo.

2. Medir la capacidad de adsorción del diseño propuesto en un programa de simulación para su aplicación en campo y la realización del tratamiento de agua subterránea para el cumplimiento con el TULSMA anexo 1.

1.5. Marco teórico

1.5.1. Contaminación del agua en Ecuador

La contaminación hídrica se define como la presencia de contaminantes en el agua en cantidades y durante un período suficiente como para causar efectos adversos en la salud y el medio ambiente. Estos contaminantes abarcan desde materia orgánica, nutrientes, sólidos suspendidos, metales pesados, hidrocarburos, sales, hasta organismos patógenos. A pesar de ser un recurso esencial para la vida debido a sus múltiples propiedades, el agua se utiliza ampliamente en actividades cotidianas como la agricultura (70% al 80%), la industria (20%) y el uso doméstico (6%). Esto la convierte en uno de los recursos más valiosos del planeta. Preservar y mantener la calidad de las fuentes naturales es de suma importancia para garantizar su sostenibilidad y para

que las generaciones futuras puedan aprovechar este recurso vital (Antúnez Sánchez & Guanoquiza Tello, 2019).

En Ecuador, la agricultura emerge como una de las principales fuentes de contaminación, ya que los agricultores emplean fertilizantes, plaguicidas y herbicidas con el objetivo de mejorar la fertilidad del suelo y proteger los cultivos. Estos productos, transportados por las lluvias y los sistemas de riego, se desplazan hacia ríos y vertientes, resultando en la contaminación del agua. El uso de pesticidas en la producción agrícola conlleva impactos perjudiciales tanto para la salud humana como para el medio ambiente, particularmente afectando el agua y el suelo. Entre los contaminantes químicos presentes en el agua, son comunes el arsénico, el cadmio, el mercurio, el cromo y los nitritos. Todos ellos han sido identificados en proporciones superiores a las deseables en estudios realizados. El crecimiento del sector agrario ha provocado la importación de herbicidas en un 125% desde 1998 a 2008. A su vez, la de fungicidas subió 38%, lo que sugiere una mayor presencia de residuos peligrosos en el agua (IANAS, 2021).

1.5.2. Impacto del cadmio, el azul de metileno y los pesticidas clorados

La contaminación del agua por metales pesados y compuestos orgánicos sintéticos, como pesticidas o fármacos, es causada por una descarga inadecuada de aguas residuales en los medios acuáticos, provocando problemas de salud a las poblaciones consumidoras. El cadmio genera enfermedades estomacales como vómitos y diarrea, y su acumulación produce a largo plazo daños en los riñones (ATSDR, 2016). Los pesticidas clorados en su exposición muestran hiperestésias, parestesias, confusión, malestar, cefalea y fatiga, a largo plazo produce dermatitis, alteraciones digestivas (náuseas y vómitos), irritación de las mucosas respiratorias y conjuntivales, astenia, síntomas neurológicos (cefaleas, vértigo, pérdida de equilibrio) (Ferrer, 2003).

En un estudio de los ríos Arenal y Junquillo (Tapia Miranda, 2013), en la desembocadura del canal de dos plantaciones bananeras en la provincia de Los Ríos, se analizaron los niveles de

organoclorados en el agua del río antes y después de la fumigación aérea. Como resultado, la cantidad de organoclorados en el río Arenal es ocho puntos superiores al límite permitido, el río Junquillo es seis puntos superiores.

1.5.3. Tecnología de remoción de metales pesados y pesticidas clorados en agua subterráneas

Se han desarrollado técnicas para el tratamiento y remoción de este tipo de contaminantes del medio acuoso, las comúnmente usadas para la remoción de metales pesados son filtración por membrana, intercambio iónico, adsorción, precipitación química, electrocoagulación y las no convencionales como nanofiltración, ultrafiltración, coagulación – floculación (Antúnez Sánchez & Guanoquiza Tello, 2019).

1.5.3.1. Adsorción

La adsorción se utiliza como técnica para eliminar una amplia gama de contaminantes, y destaca por su alta capacidad de remoción. Este método resulta fácil de aplicar, tiene bajos costos debido a su flexibilidad y diseño simple, y no genera contaminantes tóxicos. Entre los adsorbentes comúnmente empleados se incluyen carbones activados, arcillas, biopolímeros, zeolitas, perlas de sílice, así como plantas o desechos lignocelulósicos (Antúnez Sánchez & Guanoquiza Tello, 2019).

La isoterma de adsorción se define como la relación de equilibrio entre la concentración de la fase fluida y la concentración de las partículas adsorbentes a una temperatura específica (Geankoplis, 1998).

La isoterma lineal atraviesa el origen de las coordenadas, y la cantidad absorbida es directamente proporcional a la concentración en el fluido. Se considera que las isotermas que presentan una convexidad hacia arriba son favorables, ya que permiten obtener cargas de sólidos

relativamente altas incluso a bajas concentraciones en el fluido (McCabe, Smith, & Harriott, 2007).

La isoterma de Langmuir está dada por la relación:

$$W = W_{m\acute{a}x} \left[\frac{K \times c}{(1 + K \times c)} \right] \quad (1.1)$$

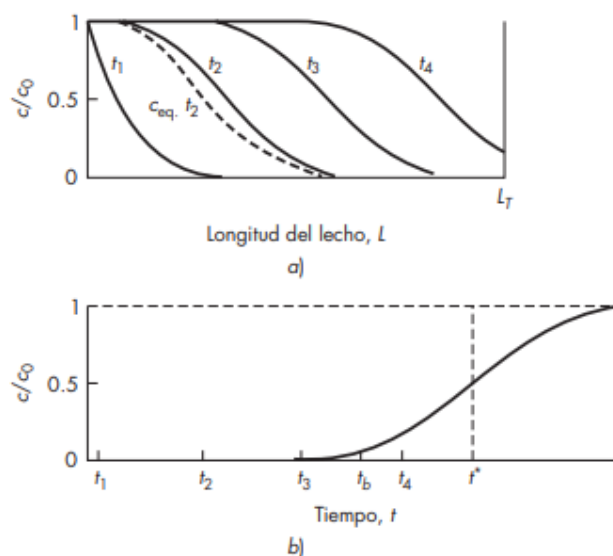
Se representa la carga del adsorbato (W), la concentración en el fluido (c) y la constante de adsorción (K). La isoterma es del tipo favorable, su nivel de favorabilidad se mide usando las siguientes condiciones, cuando K es mayor y $K \times c \gg 1$; mientras que la isoterma se aproxima a ser lineal cuando $K \times c < 1$. Es importante mencionar que la isoterma de Langmuir se deriva bajo la suposición de una superficie uniforme, aunque esta suposición puede no ser válida en todos los casos. A pesar de esto, la relación funciona razonablemente bien para gases que se adsorben débilmente (McCabe, Smith, & Harriott, 2007).

Para isotermas altamente favorables la ecuación empírica de Freundlich:

$$W = b \times c^m \quad (1.2)$$

Donde b y m son constantes, se observa que $m < 1$ generalmente proporciona un ajuste más preciso de los datos experimentales, en especial para la adsorción desde líquidos. El caso límite de una isoterma altamente favorable es la adsorción irreversible, en la cual la cantidad adsorbida se mantiene constante e independiente de la disminución de la concentración hasta valores muy bajos. En sistemas de adsorción, se observa que la cantidad adsorbida tiende a disminuir a medida que la temperatura aumenta. En estos casos, es posible desorber el adsorbato al incrementar la temperatura, incluso en situaciones que originalmente se describen como "irreversibles". La variación de la temperatura puede tener un impacto significativo en la adsorción y desorción de sustancias en superficies adsorbentes (McCabe, Smith, & Harriott, 2007).

Figura 1. a) Perfiles de concentración y b) curva de ruptura para adsorción en un lecho fijo



Fuente: McCabe, Smith, & Harriott, 2007.

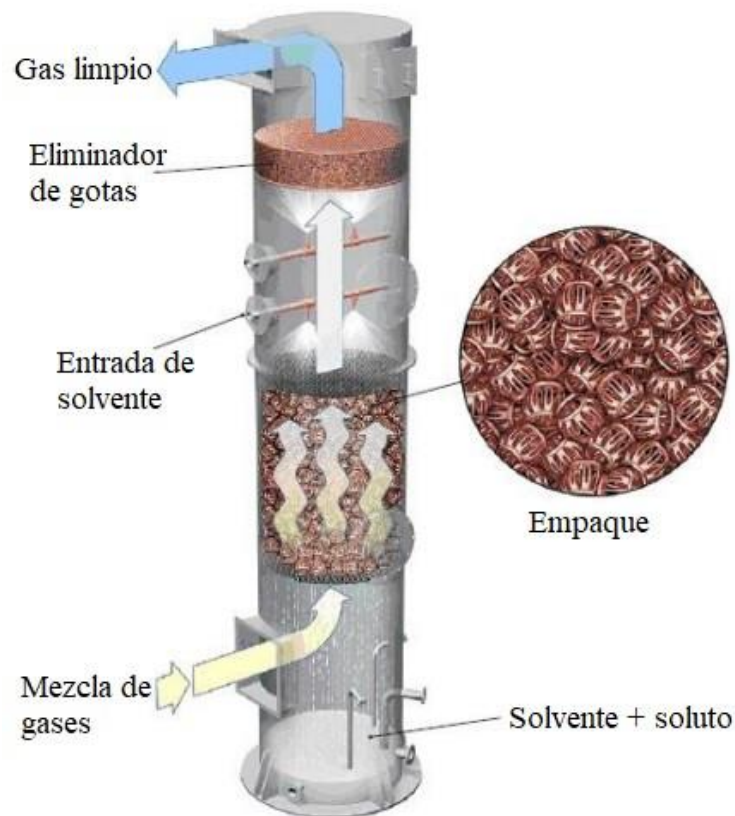
En los lechos fijos, se incorporan sensores internos que posibilitan la obtención de perfiles, como se ilustra en la Figura 1. Estos perfiles pueden preverse y emplearse para calcular la curva de concentración versus tiempo del fluido que sale del lecho. La representación gráfica de esta curva se conoce como la curva de ruptura, mostrada en la figura b. Para los tiempos t_1 y t_2 , la concentración a la salida es prácticamente nula, como se evidencia en la figura a (McCabe, Smith, & Harriott, 2007).

1.5.4. Lechos empacados

Inicialmente, la transferencia de masa predominante tiene lugar en las proximidades de la entrada del lecho, donde el líquido entra en contacto con el adsorbente. Si el sólido no contiene adsorbato desde el principio, la concentración en el líquido decrece de manera exponencial a medida que se aleja de la entrada, alcanzando casi cero antes de llegar al final de la capa. Después de transcurrir unos minutos, el sólido cercano a la entrada se encuentra casi saturado y la mayor parte de la transferencia de masa tiene lugar fuera de la entrada. La región donde se experimenta

el cambio más significativo en la concentración es conocida como la zona de transferencia de masa, y comúnmente se establece que sus límites van en un rango de valores de C/C_0 de 0.95 a 0.05.

Figura 2. *Diseño típico de un lecho empacado*



Fuente: Benítez, 2009.

Es posible generar perfiles similares para la concentración promedio de adsorbato en el sólido. En esta representación, se observa un sólido prácticamente saturado en la entrada, seguido de un cambio significativo en la región de transferencia de masa, y finalmente, una concentración nula al llegar al final del lecho. Estos perfiles proporcionan una descripción visual de cómo cambia la concentración del adsorbato tanto en el líquido como en el sólido a lo largo del lecho, lo cual es valioso para comprender y analizar los procesos de adsorción en lechos fijos (McCabe, Smith, & Harriott, 2007).

1.5.4.1. Zeolita

Las zeolitas naturales se originan por la precipitación de líquidos que se encuentran en los poros, como en fenómenos hidrotermales o a través de la alteración de vidrios volcánicos. Estas zeolitas poseen propiedades que incluyen porosidad, capacidad de adsorción e intercambio iónico. Desde la perspectiva del control ambiental para la eliminación de contaminantes, las zeolitas naturales son ampliamente empleadas debido a su extracción económica, la disponibilidad en grandes cantidades y su excelente estabilidad frente a procesos químicos y térmicos, lo que permite su reactivación y uso en diversos ciclos (Curi, Granda, Lima, & Sousa, 2006).

1.5.4.2. Cáscara de camarón

El consumo global de camarones es elevado y constituye una parte significativa de la ingesta alimentaria a nivel mundial. Se estima que entre el 45% al 68% de los exoesqueletos de los camarones se desechan durante el procesamiento (Guzhñay Lozano, 2022). El Ecuador forma parte de los principales países productores de camarón con exportaciones de 137,331 toneladas en 2020. La cantidad restante de desechos formados en la producción camaronera es elevada y tiene la deficiencia de no recibir el tratamiento correcto.

La cáscara de camarón puede ser usada como adsorbente para la remoción de metales pesados como mercurio, níquel, cromo, plomo, cobre y cadmio (Jurado Delgado, 2019). Uno de los componentes principales de la cáscara de camarón es la quitina, que constituye el 17% al 32% de la cáscara cruda y puede considerarse como celulosa con un grupo hidroxilo en la segunda posición de carbono reemplazado por un grupo acetamido. La quitina es un muy buen adsorbente, ya que posee muchas propiedades deseadas para materiales sorbentes, siendo su origen biodegradable y rentable (Jurado Delgado, 2019).

1.5.4.3. Raquis de banano

El plátano ostenta una posición destacada entre las frutas en países de Asia, Latinoamérica y África. En el año 2013, se alcanzó una producción de 106 millones de toneladas, con la mayoría concentrada en dos continentes, donde Asia contribuyó con un 57% y América con un 26% (Tutivén Ramón, 2020). La agroindustrialización de este producto a nivel nacional y local genera volúmenes considerables de residuos sólidos durante las fases de precosecha y cosecha. El raquis o vástago, por su parte, se utiliza como alimento para el ganado y puede servir como fuente de materiales fibrosos, como papel, materiales de construcción y artesanías.

El carbón activado elaborado a partir de raquis de banano tiene una capacidad de adsorción superior al 91% empleando azul de metileno (Méndez Verduga, 2019). Su uso como lecho filtrante influye en los parámetros físicos, químicos y microbiológicos de agua mejorando el índice de calidad del agua (Gualteros Díaz & Chacón Rodríguez, 2015).

CAPÍTULO 2

2.1. Metodología

2.1.1. Bioadsorbentes

Biomásas con capacidad de adsorber contaminantes del agua. La selección se basó en cuatro criterios: la adsorción de metales pesados y pesticidas en la literatura, la disponibilidad, el factor económico, y la oportunidad de añadir valor a dicho material (Universidad para la Cooperación Internacional, 2020).

Tabla 1. Descripción y origen de los bioadsorbentes

Bioadsorbente	Especie	Ubicación	Origen
Zeolita	Modernita y Clinoptilolita (Alumino silicato hidratado de sodio, potasio y calcio) (Morante)	Formación cayo, cuencas de Progreso, Santa Elena y sur de Manabí	Mineral extraído
Cáscara de camarón	Litopenaeus Vannamei	Guayaquil, Guayas	Residuos del pelado de camarón
Raquis de banano	Musa AAA	Guayaquil, Guayas	Pseudotallo residual de la cosecha

2.1.2. Tratamiento de materia prima

2.1.2.1. Raquis de banano

Se extrajo manualmente los raquis de banano de los residuos de la cosecha. Se lo cortó en pedazos pequeños, como se referencia se tiene el tamaño de la mano, con un cuchillo y luego en forma de láminas como en la figura 3. El secado se llevó a cabo en un secador de bandejas artesanal, a una temperatura promedio de 60°C por 48 horas. Se obtuvo un porcentaje de humedad removida del 86.43%. Para remover aún más la humedad se colocó la muestra en la estufa Memmert® U40 a 105°C por 24 horas, se percibió que las láminas estén secas por medio de una coloración café y una sensación quebradiza para la posterior molienda en un molino tradicional, se realiza hasta que se obtengan fibras delgadas y cortas.

Figura 3. *Proceso de tratamiento del raquis de banano*



La carbonización se realizó a partir de 20 g de la muestra seca y molida mezclado con 100ml de ácido fosfórico (H_3PO_4) al 85% de concentración en peso de la marca La casa del esparadrapo®. Se dejó reposar tapado a temperatura ambiente con exposición indirecta al sol por 24 horas. Se realizaron 6 lavados con agua potable y filtros desechables de papel usados para café molido de las marcas Brewrite® y Melitta® (apéndice B) para remover el ácido, hasta observar que el agua salga con coloración amarilla clara y traslúcida. Se neutralizó con 50 ml de hidróxido de sodio (NaOH) a concentración 1 M, hasta llegar a un pH de 7, medido con tiras de pH Citotest®. Luego se filtró por gravedad con los filtros nombrados anteriormente.

En la estufa precalentada a 200°C se secó por 6 horas en un vaso de precipitación de vidrio de 1000 ml marcas Boeco y Labclass Boro 3.3. En una bandeja de aluminio se colocó la muestra para llevarla a una mufla Barnstead Thermolyne 1300 FB1315M a 250°C por 2 horas. En dos tamices W.S. Tyler® de 1 mm y 600 μ m (No. 18 y No. 30) se separó el carbón obtenido por arriba de 1mm para moler suavemente con un mortero de porcelana y se vuelve a tamizar hasta que se recolectó un carbón con tamaño de partícula entre 1 mm y 600 μ m como se muestra en la figura 5 (Méndez Verduga, 2019).

Figura 4. *Proceso de carbonización del raquis de banano*

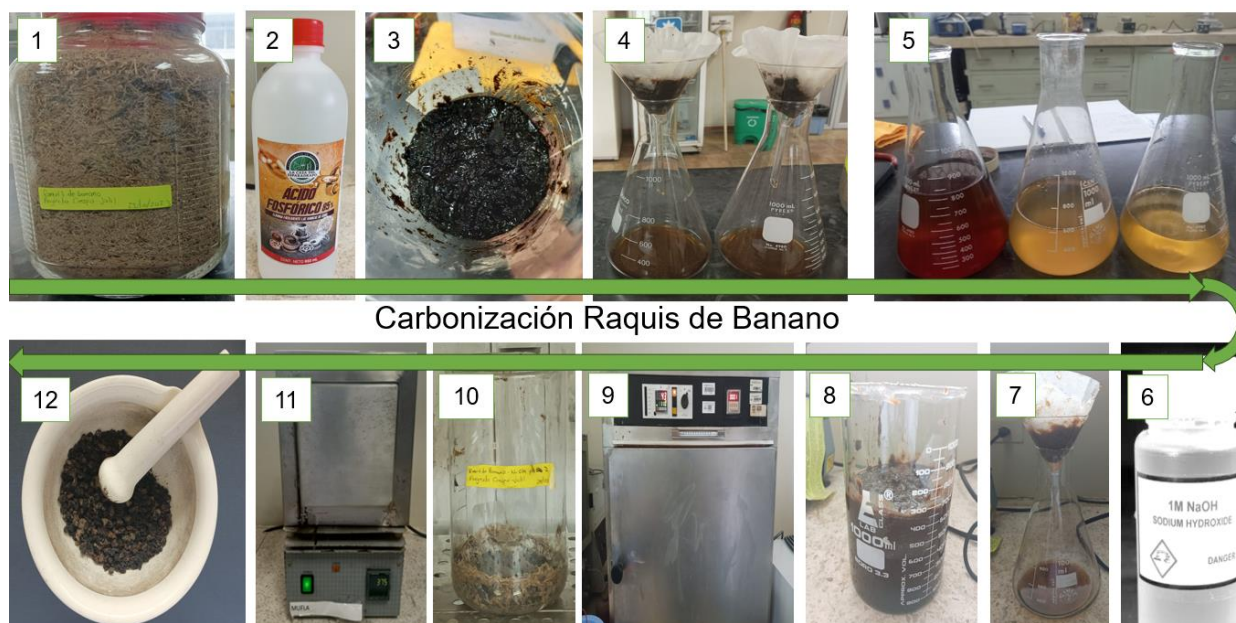


Figura 5. *Carbón de raquis de banano con tamaño de partícula entre 1 mm y 600 μm*



2.1.2.2. Zeolita

Se tamizó la zeolita para obtener un tamaño de partícula específico con tamices W.S. Tyler® de 1 mm y 600 μm (No. 18 y No. 30) como se muestra en la figura 6. Se colocó en una bandeja de aluminio y se activó en una mufla Barnstead Thermolyne® 1300 FB1315M a 250°C por 1 hora.

Figura 6. a) Tamices de 1mm y 600 μm . b) Zeolita con tamaño de partícula entre 1 mm y 600 μm



Figura 7. Zeolita activada con tamaño de partícula entre 1 mm y 600 μm



2.1.2.3. Quitina

Se lavó las cáscaras de camarón (sin cabeza) varias veces con agua a temperatura ambiente hasta obtener agua limpia. Luego con agua caliente para eliminar los microorganismos que pueden destruir fácilmente la cáscara (Pacheco Serrano & Tapia Marcos, 2022).

Luego el material se seca en una estufa Memmert® U40 a 70°C por 12 horas. Para eliminar biopigmentos y proteínas, se agregaron cáscaras de camarón secas en una proporción de 1:10 a una mezcla de una solución de NaOH al 5% p/p marca Acros Organics®, extra puro en forma de micro perlas, y H₂O₂ al 1% p/p de la marca Laboratorio Cevallos® con agitación continua a temperatura ambiente (30°C) durante 72 horas (Pacheco Serrano & Tapia Marcos, 2022).

El producto resultante se filtró y se lavó con agua hasta un pH neutro de 7 y se secó en una estufa a 70°C durante 24 horas. Finalmente, para reducir el tamaño de las partículas, se realizó una molienda manual utilizando un mortero y tamices W.S. Tyler® No. 30 y No. 50 para obtener un tamaño de partícula entre 600 µm a 300 µm como se muestra en la figura 8 (Pacheco Serrano & Tapia Marcos, 2022).

Figura 8. *Quitina con tamaño de partícula entre 600 µm y 300 µm*



2.1.3. Caracterización de los adsorbentes

Los materiales se caracterizaron por FTIR para conocer los grupos funcionales que contienen y los posibles puntos de adsorción. Para caracterizar los adsorbentes se emplea un espectrofotómetro FT-IR Thermo Scientific® Nicolet iS10 mediante la técnica de reflectancia total atenuada (HATR). Mediante esta técnica se logró identificar los grupos funcionales presentes en los materiales. En el equipo se colocó 1g de adsorbente sólido y seco, con un tamaño de partícula de entre 1 mm y 600 µm.

2.1.4. Diseño de experimento

La finalidad del proyecto realizado fue modelar un lecho empacado para la adsorción de metales pesados y agroquímicos empleando tres adsorbentes distintos: carbón activado de raquis de banano, cáscara de camarón tratada y zeolita activada. Mediante revisión bibliográfica se estableció la forma adecuada para la obtención y tratamiento de estos materiales (Pabón Guerrero, Benítez Benítez, Sarria Villa, & Gallo Corredor, 2020).

Para la evaluación y análisis del proceso de adsorción se realizaron ensayos de equilibrio y en columna de lecho fijo. Se empleó acetato de cadmio (AC) como metal pesado a ser analizado en las concentraciones señaladas en la tabla 3, ya que se ha evidenciado su presencia en los ríos de la zona costera del Ecuador excediendo el límite máximo permisible (IANAS, 2021), mayor a 0.01mg/L, establecido en la Norma de Calidad Ambiental y de Descarga de Efluentes: Recurso Agua, en el Libro VI del TULSMA (Presidencia de la República de Ecuador, 2008).

Según investigaciones, la concentración de pesticidas en el agua es elevada debido a la creciente actividad agrícola (Antúnez Sánchez & Guanoquiza Tello, 2019) y supera el LMP. El uso de pesticidas comerciales para las pruebas de adsorción implica costos elevados en la experimentación y determinación de la concentración en agua. Por lo cual, se empleó azul de metileno (AM) en las concentraciones mostradas en la tabla 3, como sonda porque simula una

estructura orgánica parecida a los plaguicidas y fertilizantes (Cisneros Pérez, Intriago-Mendoza, & Ramos-Galarza, 2018) y es detectable por el equipo usado durante la realización del proyecto.

2.1.4.1. Equilibrio de adsorción

Con el propósito de realizar el equilibrio de adsorción de pesticidas y metales pesados que se encuentran en una matriz acuosa, se llevaron a cabo pruebas de adsorción por lotes. Los datos de entrada se muestran en la Tabla 2. Las variables de salida son las concentraciones de los compuestos contaminantes después de 24 horas de ejecución del experimento. A partir de los datos obtenidos se graficaron isothermas de adsorción, se estimó la capacidad de adsorción de los materiales y los porcentajes de remoción.

Tabla 2. *Diseño de experimento de adsorción por lotes*

Experimento No.	Datos			Adsorbato					Adsorbente		
	Tipo	Volumen (ml)	Temperatura (°C)	Concentración (ppm)					Tipo	Tamaño	Peso (g)
1									ZT		
2									ZT	1 mm- 600 µm	
3									ZT		
4									CB		
5	Azul de metileno	25	30	10	20	30	40	50	CB	600 µm	0.5
6	C ₁₆ H ₁₈ ClN ₃ S								CB		
7									CCT		
8									CCT	600 µm- 355 µm	
9									CCT		
10									ZT		
11									ZT	1mm- 600 µm	
12									ZT		
13									CB		
14	Acetato de cadmio	30	30	2	4	6	8	10	CB	600 µm	0.5
15	Cd(O ₂ CCH ₃) ₂ (H ₂ O) ₂								CB		
16									CCT		
17									CCT	600 µm- 355 µm	
18									CCT		
19									ZT		
20									ZT	1mm- 600 µm	
21									ZT		
22									CB		
23	Azul de metileno	25	30	200	400	600	800	1000	CB	600 µm	0.5
24	C ₁₆ H ₁₈ ClN ₃ S								CB		
25									CCT		
26									CCT	600 µm- 355 µm	
27									CCT		

2.1.4.2. Adsorción en columna de lecho fijo

Se llevaron a cabo pruebas de adsorción en columnas con lechos de cada adsorbente. Los datos de entrada de los experimentos se presentan en la Tabla 3. Los datos de salida son las concentraciones de los contaminantes en los efluentes transcurrido cierto tiempo. Con estos datos se elaboraron curvas de ruptura de los sistemas establecidos. El punto de ruptura indica el momento en que se llega a la concentración máxima del efluente (McCabe, Smith, & Harriott, 2007). Para esto, la concentración máxima fijada es a la que se alcanza la concentración del límite máximo permisible del contaminante. Además, el punto de ruptura sirve como señal del final de la operación para realizar la regeneración del filtro antes de que este se sature completamente (Higuera Cobos, Arroyave Londoño, & Florez García, 2008).

Tabla 3. *Diseño de experimento adsorción en columna de lecho fijo*

No.	Adsorbato			Adsorbente		
	Experimento	Tipo	C (ppm)	T (°C)	Tipo	Tamaño
28	Acetato de cadmio $Cd(O_2CCH_3)_2(H_2O)_2$	100	30	ZT	1mm-600 μ m	3
29				CCT	600 μ m-355 μ m	3
30				CB	600 μ m	3
31	Clorotalonil	1000	30	CCT	600 μ m-355 μ m	3
32	$C_8Cl_4N_2$			CB	1mm-600 μ m	3

2.1.4.3. Adsorción por lotes

Para la preparación de los adsorbatos se prepara una solución estándar 1000 ppm empleando acetato de cadmio. Además, se prepara una solución estándar de 1000 ppm de azul de metileno y de 1000 ppm de clorotalonil.

Se emplea matraces cónicos de 100 ml de marcas Boeco® y Labclass® Boro 3.3. Se añade una cantidad específica de adsorbente y un volumen de solución contenedora de contaminante a

una concentración conocida. Estos datos se mencionan en la tabla 2. Se colocaron los matraces en una plancha de calentamiento con agitación Mtops® HS180 a una temperatura de 30°C y 100 rpm durante 24 horas para alcanzar el equilibrio de adsorción, se realizó por triplicado en esas condiciones.

Una vez completado cada ensayo, se separa la fase sólida mediante centrifugación. Se tomó un volumen de la fase líquida y se evaluó la concentración residual de AM en un espectrofotómetro UV-Visible Thermo Scientific® Spectronic 200 en cubeta de cuarzo a 670 nm. Para determinar la concentración final de acetato de cadmio se empleó un ICP Spectrometer Thermo Scientific® iCAP 7000 Series. Todas las muestras se analizaron por triplicado y se consideraron valores promedio como resultados.

El error cuadrático medio (ecuación 2.1) es la desviación estándar de los valores residuales o errores de predicción. Los valores residuales son una medida de la distancia de los puntos de datos de la línea de regresión. El RMSE es una medida de cuál es el nivel de dispersión de estos valores residuales. Es decir, indica la exactitud del modelo (Oracle, s.f.). Se debe tener en cuenta que el cálculo del RMSE no indica si el ajuste es adecuado, por lo que la isoterma más exacta es específica de cada sistema de adsorbato y adsorbente.

El RMSE se calculó empleando la siguiente ecuación:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - y_i')^2} \quad (2.1)$$

Donde:

n = número total de puntos de datos.

y_i = valor de salida actual del experimento.

y_i' = valor de salida de predicción del modelo.

El porcentaje de remoción (ecuación 2.2) muestra la disminución porcentual de la concentración de un contaminante respecto a la concentración inicial del mismo en un experimento

de adsorción. Este cambia para el mismo sistema adsorbato-adsorbente en función de las condiciones establecidas, como pueden ser: concentración inicial del adsorbato, la cantidad de adsorbente, etc.

Se calculó con la siguiente fórmula:

$$\%R = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \times 100 \quad (2.2)$$

Donde:

%R: porcentaje de remoción.

C₀: concentración inicial del adsorbato en el fluido.

C_e: concentración del adsorbato en el equilibrio.

2.1.4.4. Adsorción en columna

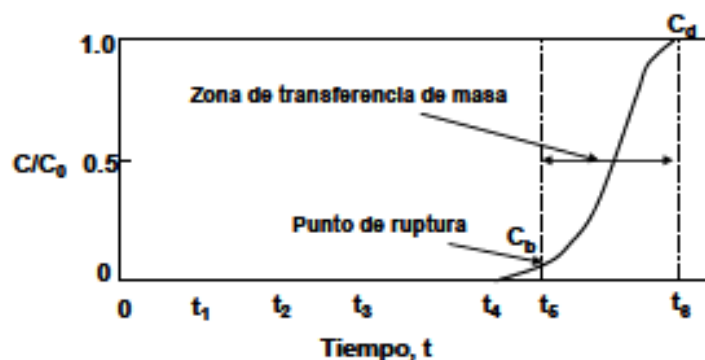
Empleando acetato de cadmio se prepara una solución de concentración 1000 ppm. Esta solución es necesaria para elaborar una solución de 100 ppm que se alimenta en las columnas. Se preparó la solución del organoclorado clorotalonil a partir del producto comercial BRAVO® 720, fungicida con concentración de 720 mg/ml, para una solución de alimentación de 1000 ppm.

Para los experimentos se utilizan columnas de cromatografía de 2.5 cm de diámetro y una longitud de 30 cm para la zeolita y quitina, para el carbón las dimensiones fueron de 1 cm de diámetro y longitud de 30 cm, como en la Figura 9. A cada columna, se añadió cada adsorbente, mencionados en la tabla 3. Para la contención de los sólidos se empleó algodón en la parte inferior de la columna y 2 mm de arena en la parte superior.

Figura 9. *Elaboración de columnas de lecho empacado*



Figura 10. *Curva de ruptura típica en columna de adsorción*



Fuente: Higuera Cobos, Arroyave Londoño, & Florez García, 2008.

Después de empaquetar la columna, utilizando un embudo de decantación, se alimenta a 6 mL/min las soluciones contaminantes. Se tomaron muestras de los efluentes en intervalos de tiempo de cada 20 minutos, hasta que la concentración del compuesto contaminante sea el mismo que la concentración inicial como se observa en la figura 10. Las muestras contenedoras de acetato de cadmio se midieron con un equipo de ICP Spectrometer Thermo Scientific® iCAP 7000 Series. Las muestras de organoclorados se analizaron con un cromatógrafo de gases Thermo Scientific® Trace GC Ultra, usando acetonitrilo para su evaluación. Todos estos ensayos se realizaron por duplicado y se emplearon los valores promedios como resultados.

2.1.5. Adsorción en lecho mixto

Se utilizaron columnas de 6 cm de altura, con altura de lecho de 2 cm y 0.8 cm de diámetro interno, a un flujo de 1.5 ml/min; se arma un lecho estratificado, colocando en orden descendente, primero la zeolita, luego la quitina, el carbón y por último más zeolita, el criterio de selección se dio por la capacidad de remoción de cada adsorbente, por la rápida saturación de la zeolita se optó por utilizarla dos veces, además de que ayuda como amortiguador en la base y el tope del lecho.

Tabla 4. *Diseño de experimento de adsorción por columnas de lecho mixto*

Experimento No.	Adsorbato			Adsorbente		
	Tipo	Volumen solución (ml)	Concentración (ppm)	Tipo	Tamaño	Peso (g)
33	Azul de metileno $C_{16}H_{18}ClN_3S$ +	1000	10 +	ZT	1mm-600 μ m	0.15
				CB	1mm-600 μ m	0.18
				CCT	600 μ m- 355 μ m	0.20
				ZT	1mm-600 μ m	0.15
				ZT	1mm-600 μ m	0.15
34	Acetato de cadmio $Cd(O_2CCH_3)_2(H_2O)_2$ +	1000	2 +	CB	1mm-600 μ m	0.18
				CCT	600 μ m- 355 μ m	0.20
				ZT	1mm-600 μ m	0.15
				ZT	1mm-600 μ m	0.15
				ZT	1mm-600 μ m	0.15

2.1.6. Modelamiento y simulación

Se realizó un diagrama de proceso en los programas computacionales Aspen Plus® y Aspen Adsorption®, versión 12.1, con licencia referente al sistema con nombre LSYS51586, de servidor asociado ggtiwrks001@espol.edu.ec. En el programa Autodesk Inventor Professional® con licencia de estudiante se realizó el modelamiento del prototipo de lecho mixto. En la herramienta ANSYS® con licencia estudiantil y versión 2023R1 se hicieron esfuerzos en las piezas contenedoras de adsorbentes para cumplir con factores de seguridad y calidad.

CAPÍTULO 3

3.1.Resultados y análisis

3.1.1. Caracterización de adsorbentes por FTIR

3.1.1.1. Análisis FTIR de quitina

Tabla 5. Análisis FTIR de quitina

FTIR-Quitina	
Señales (cm ⁻¹)	Grupos funcionales y enlaces
3459	Aminos N-H (Quitina)
3556	Hidroxilos O-H
2922	C-H
1636	C=O
1020	Carbonato C-O (Cáscara camarón)

En la Tabla 5, se observó el análisis FTIR de la cáscara de camarón (quitina) empleada para las pruebas de adsorción. La banda 1020 cm⁻¹ se debe a la vibración de estiramiento de los enlaces C-O en el grupo carbonato, perteneciente al CaCO₃, que está presente en gran medida en la composición de la cáscara de camarón (Esquerra Brauer, 1988).

3.1.1.2. Análisis FTIR de zeolita

Tabla 6. Análisis FTIR de zeolita

FTIR-Zeolita	
Señales (cm ⁻¹)	Grupos funcionales y enlaces
3650-2500	O-H (Agua)
1200-1000	Si-O (Zeolita)
798	Si-O-Al (Zeolita)
779	Al-O (Zeolita)

La caracterización de la zeolita mediante FTIR se mostró en la Tabla 6. En la región de 1200cm⁻¹ a 1000cm⁻¹ se puede identificar un pico de gran intensidad, perteneciente a bandas de estiramiento de enlaces Si-O. Mientras que los picos 779 cm⁻¹ y 798 cm⁻¹ representan enlaces Al-O y Si-O-Al. Estos enlaces son propios de la zeolita, ya que está compuesta por tetraedros

formados por un catión (Si o Al) y átomos de oxígeno. Los enlaces Si-O son predominantes (Quintero, Pérez, Meléndez, Rondon, & Imbert, 2012).

3.1.1.3. Análisis FTIR de carbón de raquis de banano

Tabla 7. Análisis FTIR de carbón activado a partir de raquis de banano

FTIR-Carbón activado	
Señales (cm ⁻¹)	Grupos funcionales y enlaces
3530, 3519, 3419	Hidroxilos O-H
3000	C-H
1700-1500	C=C

En la Tabla 7, se presentan los estiramientos de los grupos O-H y C-H, estos pertenecen a carbohidratos estructurales propios de la celulosa y la hemicelulosa. El pico presentado en el intervalo de 1700 cm⁻¹ a 1500 cm⁻¹ indica enlaces C=C pertenecientes a la hemicelulosa y la lignina (Jiménez Fallas, Charpentier Alfaro, & Méndez Arias, 2021).

3.1.2. Adsorción por lotes de azul de metileno

Los datos obtenidos se ajustaron a modelos de isotermas de adsorción como Freundlich y Langmuir. Se escogió las isotermas que presentan la menor raíz del error cuadrático medio entre los datos experimentales y teóricos.

Figura 11. Isoterma de Adsorción Azul de metileno

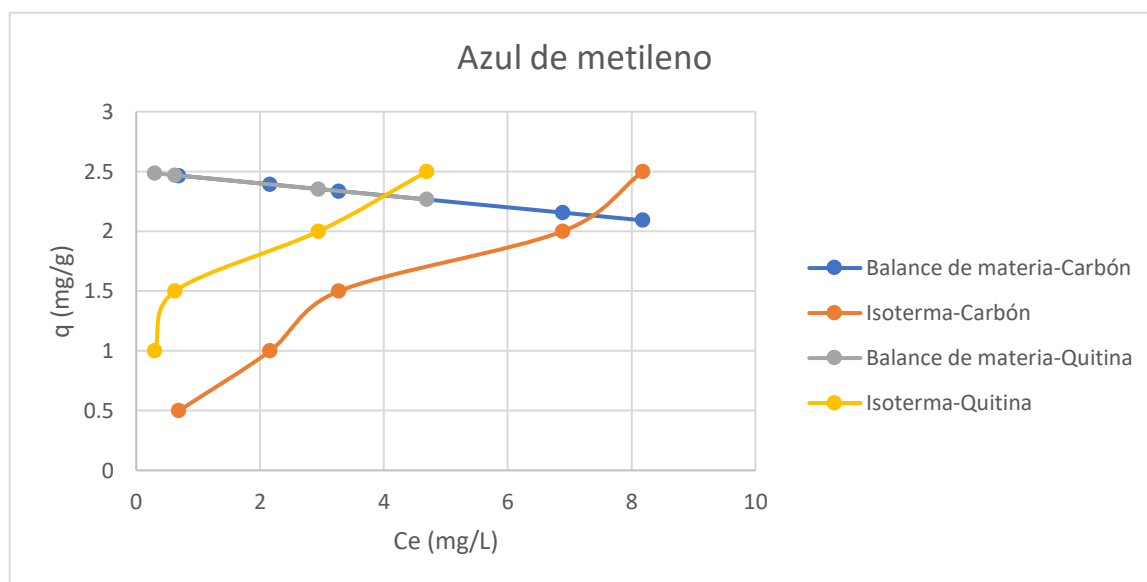


Tabla 8. Modelos de los adsorbentes en Azul de metileno

Adsorbente en Azul de metileno	Modelo Langmuir $q_e = \frac{q_{max}(k_L C_e)}{1 + (k_L C_e)}$	Modelo Freundlich $q_e = k_L \left(C_e^{\frac{1}{n}} \right)$
Quitina	$q_e = \frac{2.2763(1.6944C_e)}{1 + (1.6944C_e)}, R^2 = 0.981$	$q_e = 1.5385 \left(C_e^{\frac{1}{3.3333}} \right), R^2 = 0.952$
Carbón activado	$q_e = \frac{2.1233(0.1876C_e)}{1 + (0.1876C_e)}, R^2 = 0.928$	$q_e = 0.6378 \left(C_e^{\frac{1}{1.5753}} \right), R^2 = 0.988$

En la Figura 11, se presenta la isoterma de adsorción de azul de metileno utilizando quitina. La adsorción es favorable, siendo de tipo II (Apéndice B) con una monocapa hasta el punto 2, seguida de una multicapa sin restricciones (Romero Hermida, 2012). Al ajustar los datos con el modelo de Freundlich, se obtiene una correlación superior ($R^2 = 0.95$). El 91% de remoción destaca

la alta capacidad de adsorción debido a propiedades químicas y la estructura molecular con grupos amino que interactúan electrostáticamente con el azul de metileno.

La zeolita mostró una baja capacidad de adsorción para Azul de metileno en ensayos por lotes (Apéndice B), sin variación significativa entre la concentración inicial y la de equilibrio. Dada esta limitación, no se pudo establecer una isoterma, lo que indica que la zeolita no es un buen adsorbente para compuestos orgánicos. En consecuencia, se excluyó su evaluación en los siguientes ensayos con adsorbatos orgánicos.

La isoterma de adsorción de azul de metileno con carbón activado de raquis de banano muestra una adsorción favorable. La isoterma, de tipo II, indica adsorción en monocapa y multicapa iniciando en el punto 3 de la traza azul. El modelo de Freundlich se ajusta bien ($R^2=0.99$), sugiriendo mayor adsorción con mayor concentración de azul de metileno. El porcentaje de remoción, determinado por el balance de materia, es del 87%, similar al de carbones activados convencionales, ya que, para moléculas orgánicas, su porcentaje es igual o mayor al 80% (Caviedes Rubio & Espinosa Pastrana, 2020). Se debe considerar que el carbón producido ha sido sintetizado desde cero con un enfoque metodológico orientado a la obtención fuera del laboratorio y de manera artesanal, cumpliendo así con el objetivo de ser un material de fácil acceso a la comunidad agrícola.

3.1.3. Adsorción por lotes de cadmio

En la parte experimental se definió la sal de acetato de cadmio como fuente de cadmio, es de suponer que al disolver en agua se disocian en cadmio y acetato, la adsorción que se evaluó es de cadmio y no de acetato de cadmio.

Figura 12. *Isoterma de Adsorción Cadmio*

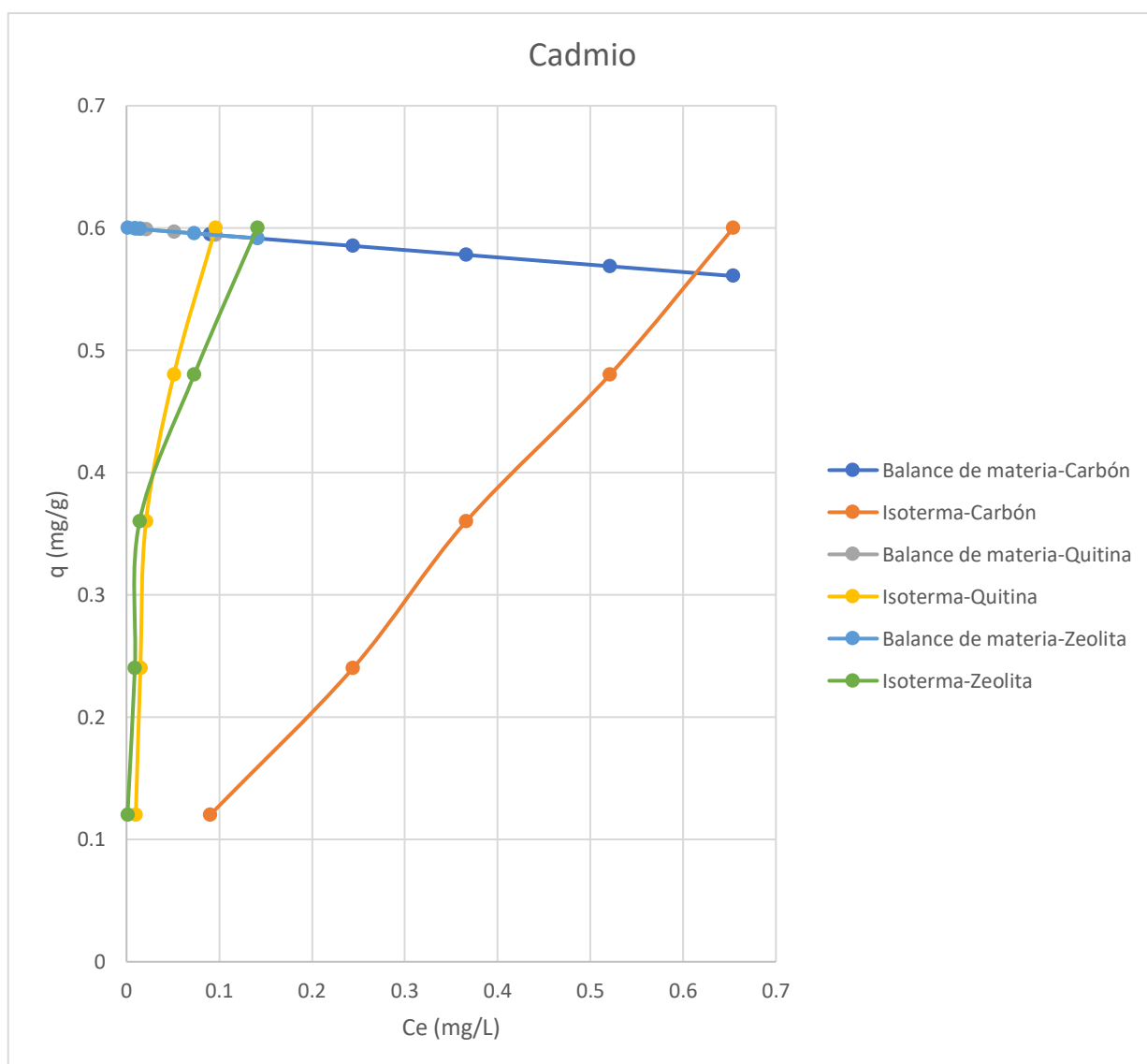


Tabla 9. Modelos de los adsorbentes en Cadmio

Adsorbente en Cadmio	Modelo Langmuir $q_e = \frac{q_{max}(k_L C_e)}{1 + (k_L C_e)}$	Modelo Freundlich $q_e = k_L \left(C_e^{\frac{1}{n}} \right)$
Quitina	$q_e = \frac{2.4952(21.124C_e)}{1 + (21.124C_e)}, R^2 = 0.893$	$q_e = 3.0917 \left(C_e^{\frac{1}{1.599}} \right), R^2 = 0.856$
Zeolita	$q_e = \frac{2.4929(87.967C_e)}{1 + (87.967C_e)}, R^2 = 0.986$	$q_e = 1.1698 \left(C_e^{\frac{1}{3.1017}} \right), R^2 = 0.969$
Carbón activado	$q_e = \frac{0.5627(0.6824C_e)}{1 + (0.6824C_e)}, R^2 = 0.735$	$q_e = 0.8143 \left(C_e^{\frac{1}{1.2326}} \right), R^2 = 0.994$

En la Figura 12 la isoterma de adsorción de cadmio con quitina indica una adsorción favorable, tipo I (Apéndice B), por quimisorción en una sola capa en una superficie porosa homogénea (Romero Hermida, 2012). El modelo de Langmuir se ajusta mejor ($R^2=0.89$), contrastando con investigaciones previas (Pacheco Serrano & Tapia Marcos, 2022). El porcentaje de remoción es del 99% desde 10 ppm inicial, destacando la capacidad de la quitina para adsorber iones metálicos mediante interacciones electroestáticas con sus grupos amino.

Se visualizó la isoterma de adsorción de cadmio con zeolita. Tipo II (Apéndice B), indica adsorción favorable en monocapa hasta el punto 3, luego en multicapas por su estructura macro porosa con fisorción (Romero Hermida, 2012). El modelo de Langmuir se ajusta mejor ($R^2=0.99$). La remoción es del 99% desde 10 ppm inicial, comparado con otros estudios que indican 91%-98% (Carbonel Ramos, 2018). La adsorción se debe a cationes intercambiables en la zeolita, reemplazados por iones de Cd, formando enlaces coordinados en la superficie.

La isoterma de adsorción de cadmio con carbón activado de raquis de banano muestra tendencia lineal, indicando una alta favorabilidad con $K < 1$. El modelo de Freundlich se ajusta mejor ($R^2=0.99$, $K=0.81$) debido a fisisorción por fuerzas de Van der Waals. La remoción es del 93% desde 10 ppm, comparable con carbones activados comerciales (Carbonel Ramos, 2018), demostrando eficacia. La alta estructura porosa y área superficial retienen los iones de Cd, y la presencia de grupos funcionales podría facilitar enlaces coordinados (Leyva Ramos, Díaz Flores, Guerrero Coronado, Mendoza Barrón, & Aragón Piña, 2004).

3.1.4. Adsorción por lotes de pesticidas

Empleando soluciones de 25 ml a diferentes concentraciones tal como se indica en la Tabla 2 se realizó la adsorción por lotes para establecer las isothermas de adsorción de pesticidas empleando quitina y carbón activado. La adsorción por lotes con zeolita fue descartada ya que mediante la adsorción con AM se determinó que no es un buen adsorbente de compuestos orgánicos.

Figura 13. *Isoterma de Adsorción de Clorotalonil*

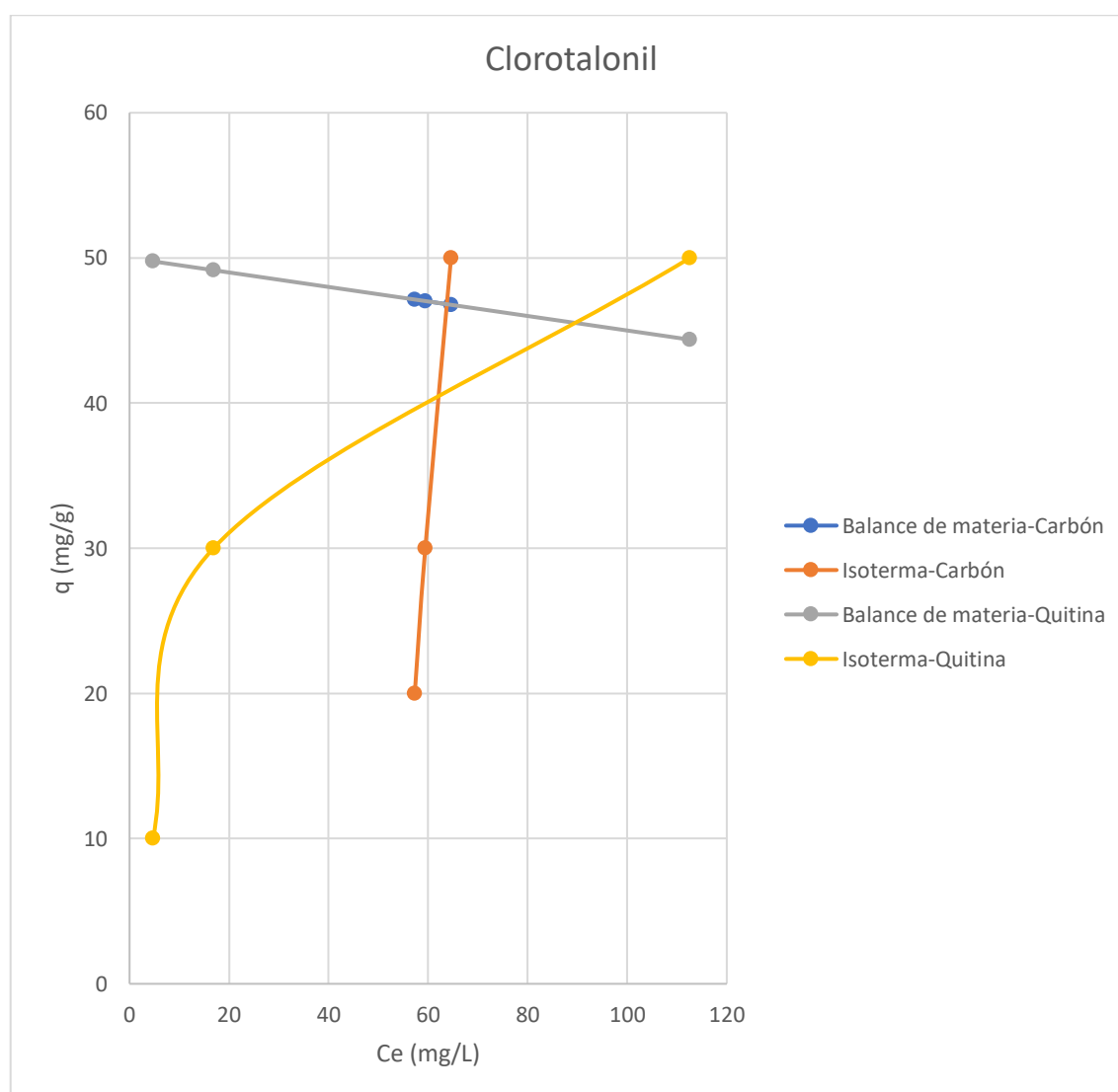


Tabla 10. Modelos de los adsorbentes en Clorotalonil

Adsorbente en Clorotalonil	Modelo Langmuir $q_e = \frac{q_{max}(k_L C_e)}{1 + (k_L C_e)}$	Modelo Freundlich $q_e = k_L \left(C_e^{\frac{1}{n}} \right)$
Quitina	$q_e = \frac{45.5(0.0502C_e)}{1 + (0.0502C_e)}, R^2 = 0.997$	$q_e = 5.6092 \left(C_e^{\frac{1}{2.0475}} \right), R^2 = 0.901$
Carbón activado	$q_e = \frac{46.8191(-0.0142C_e)}{1 + (-0.0142C_e)}, R^2 = 0.907$	$q_e = 2.12 \times 10^{-12} \left(C_e^{\frac{1}{0.1353}} \right), R^2 = 0.975$

En la Figura 13, la isoterma de adsorción del pesticida BRAVO® 720 (clorotalonil) con quitina muestra un comportamiento favorable, tipo II (Apéndice B) por adsorción en monocapa y multicapa (Romero Hermida, 2012). Las interacciones electrostáticas y afinidad química son claves por la estructura química y grupos funcionales de la quitina. Aunque el modelo de Langmuir se ajusta mejor ($R^2=0.99$), el modelo de Freundlich puede ser más apropiado a concentraciones altas (Santana Casiano, 1991). El porcentaje de remoción es del 89% desde 1000 ppm, indicando alta capacidad de adsorción. Las interacciones partícula-partícula son significativas, mediadas por interacciones hidrofóbicas y electrostáticas entre la quitina y el clorotalonil (Santana Casiano, 1991).

La isoterma de adsorción del pesticida clorotalonil con carbón activado de raquis de banano. Su forma casi lineal sugiere una proporcionalidad entre la cantidad adsorbida y la concentración, debido a la estructura porosa del carbón. Las fuerzas de Van der Waals y la interacción electrostática contribuyen a la adsorción. El modelo de Freundlich se ajusta bien ($R^2=0.98$). El porcentaje de remoción fue del 93% a 1000 ppm y del 86% a 400 ppm, similar al obtenido para AM. Aunque alto, puede mejorarse comparado con el 100% de remoción alcanzable

por carbones activados convencionales a 480 mg/L, indicando oportunidades de mejora en la capacidad de adsorción del nuevo carbón sintetizado (Caviedes Rubio & Espinosa Pastrana, 2020).

3.1.5. Estimación de masa de adsorbente

Para determinar la masa de adsorbente requerida fue necesario emplear las ecuaciones establecidas de los modelos de isotermas que mejor se ajustan al comportamiento de los datos obtenidos experimentalmente (Apéndice B). Primero se determinó la cantidad de adsorbato adsorbido por unidad de masa de adsorbente q (mg/g) empleando la ecuación del modelo establecido. Considerando que cada planta de banano requiere una cantidad de 15 a 20 litros diarios (Fundación Canarina, 2020) y estableciendo que una plantación pequeña posee 100 plantas de banano (Santacruz de León & Santacruz de León, 2020) se establece un volumen diario de 2000 L. Según estudios realizados en 2016 en 10 fincas bananeras, donde se mide la concentración de pesticidas, se obtienen concentraciones variables. Considerando la más alta de 0.0300 mg/L, se determina la cantidad de masa necesaria para alcanzar el LMP establecido en el TULSMA de 0.01 mg/L. La cantidad de cada adsorbente requerido para reducir la concentración de clorotalonil hasta el LMP se muestra en la Tabla 11.

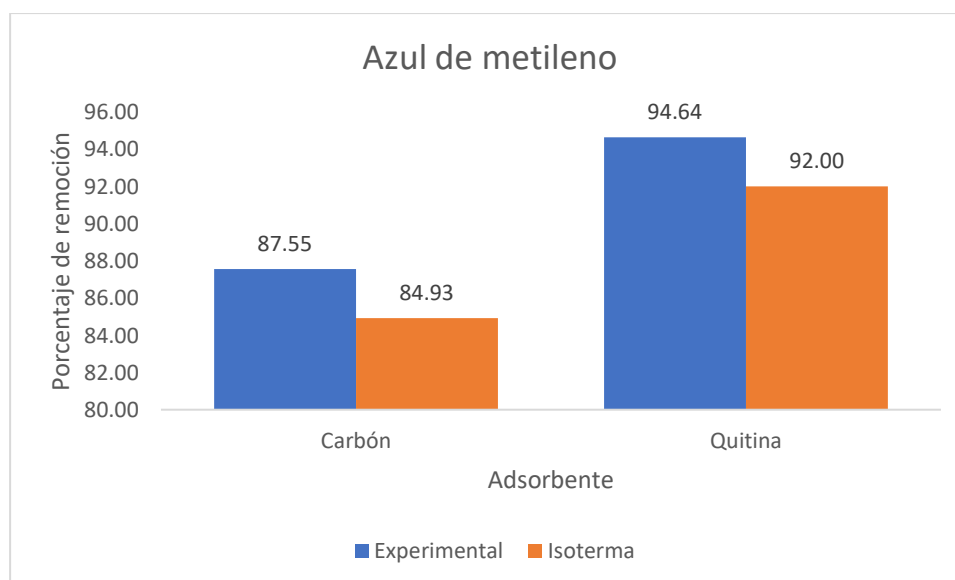
Como concentración inicial de cadmio en el agua se tomó como referencia los datos obtenidos en un estudio (Alcívar Tenorio & Castro Rendón, 2021) que indicó que la concentración más alta encontrada de cadmio es de 0.06 mg/L. Considerando que el LMP indicado en el TULSMA para cadmio es de 0.01 mg/L, la cantidad de masa requerida de un adsorbente se presenta en la Tabla 8. Las masas requeridas para quitina y zeolita son bajas comparadas a las requeridas para adsorber AM debido a la concentración inicial empleada y la capacidad de remoción. Los porcentajes de remoción altos obtenidos para la remoción de cadmio indican que se requiere una cantidad pequeña de adsorbente para remover el contaminante. En el caso de las moléculas orgánicas AM y clorotalonil, la cantidad de masa requerida es mucho mayor a comparación de la requerida para adsorber Cd. Pese a ello, la capacidad de remoción de los adsorbentes es alta para estas moléculas.

Tabla 11. Masa necesaria de adsorbentes según el contaminante utilizado para un volumen de 2000L

Adsorbato	Material adsorbente	Masa necesaria (g)
Azul de metileno	Carbón	290.44
Azul de metileno	Quitina	51.43
Cadmio	Carbón	240.72
Cadmio	Quitina	39.15
Cadmio	Zeolita	38.09
Clorotalonil	Carbón	468.29
Clorotalonil	Quitina	224.74

3.1.6. Porcentaje de remoción

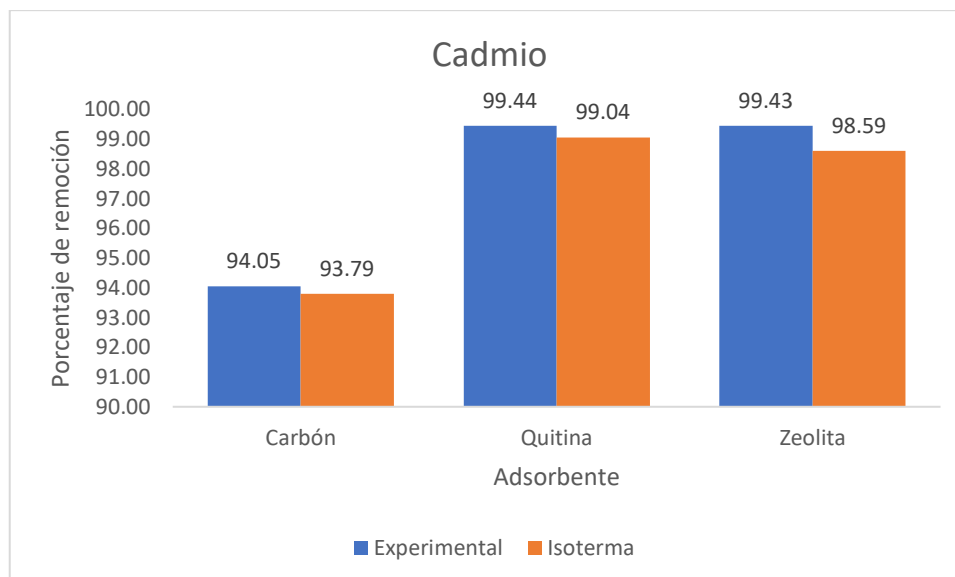
Figura 14. Porcentajes de remoción obtenidos para la adsorción de Azul de metileno



Las isotermas de adsorción en la experimentación por lotes permitieron determinar el porcentaje de remoción de quitina, zeolita y carbón activado para azul de metileno, cadmio y el pesticida BRAVO® 720. Estos resultados se contrastaron con los valores experimentales obtenidos. En la Figura 14 los porcentajes de remoción de azul de metileno con quitina y carbón se muestran. A una concentración inicial de 50 ppm, quitina alcanza un 95% de remoción debido

a sus grupos funcionales, mientras que el carbón logra un 87%. La adsorción en carbón se da en la interfaz con la solución mediante enlaces de hidrógeno y fuerzas de Van der Waals (fisisorción). No se pudo construir la isoterma de adsorción para AM con zeolita.

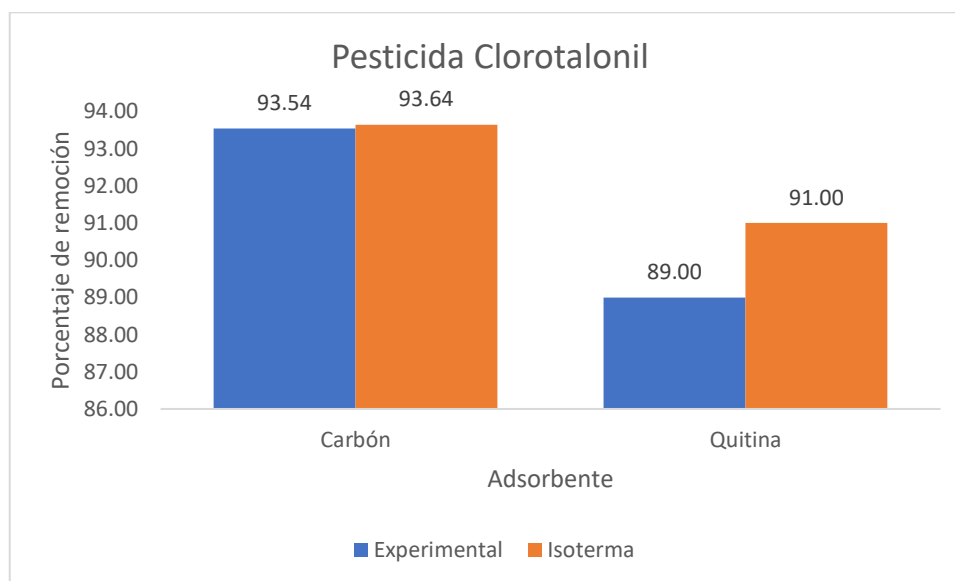
Figura 15. Porcentajes de remoción obtenidos para la adsorción de Cadmio



En la Figura 15 se presentó los porcentajes de remoción de cadmio empleando los 3 adsorbentes estudiados. La zeolita logró un 99% de remoción debido a su estructura porosa y superficie efectiva, basándose en intercambio iónico y atracción electrostática con cationes intercambiables en su composición. La quitina alcanzó un 99% de remoción gracias a sus grupos amino e hidroxilo, que interactúan con los iones de cadmio. El carbón activado obtuvo un 93% de remoción, aprovechando su amplia área superficial y un intercambio iónico con el cadmio.

Los resultados experimentales fueron mayores porque fue un promedio de las muestras recolectadas, por lo que siguen un comportamiento de una isoterma, los datos teóricos siguen una función lineal, considerando que se va a distribuir equitativamente la capacidad de remoción relacionada a la concentración y que es un sistema idealizado.

Figura 16. Porcentajes de remoción obtenidos para la adsorción de pesticida clorotalonil

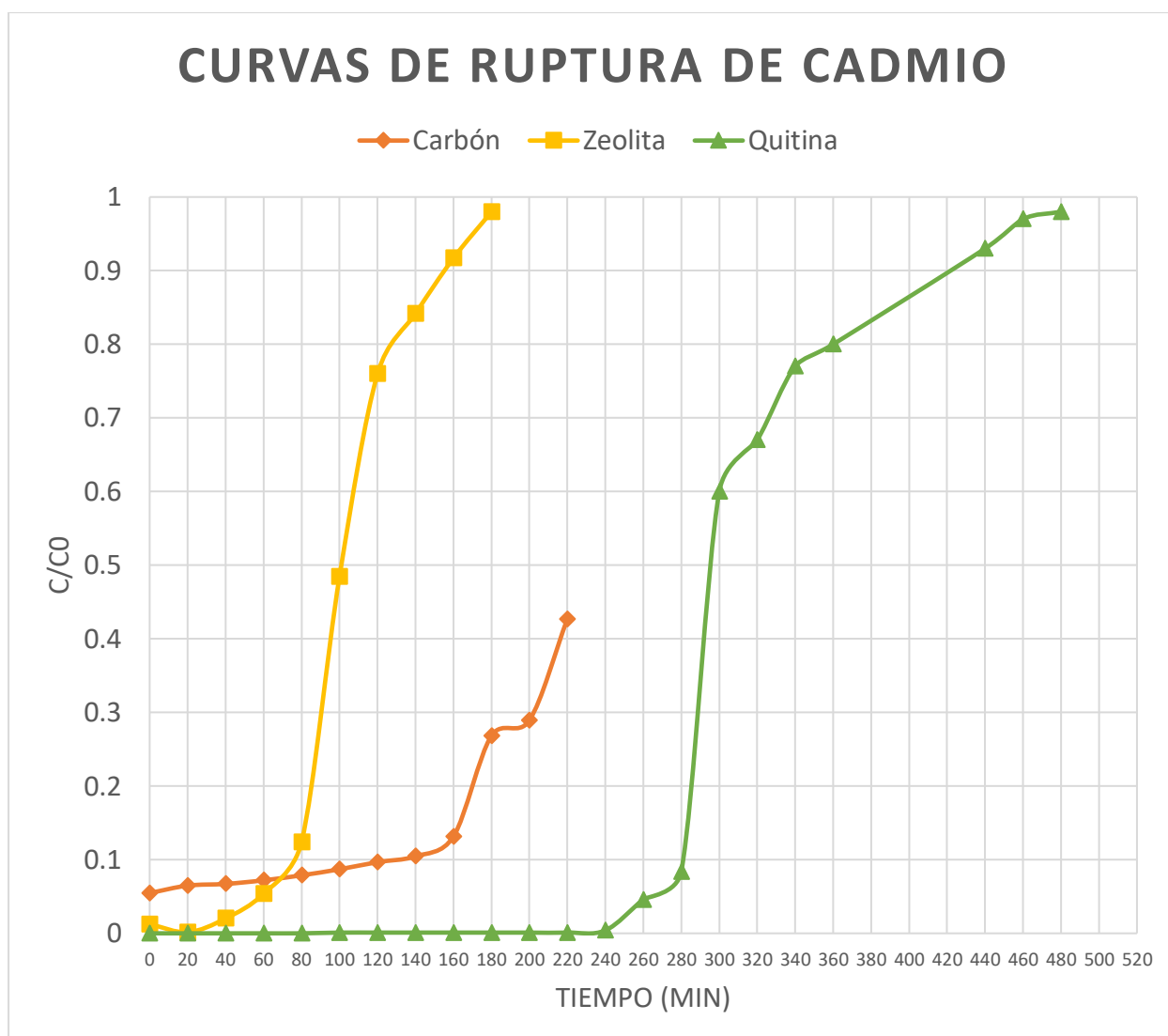


En la Figura 16, los porcentajes de remoción para el clorotalonil reflejan la alta capacidad de remoción del carbón debido a su estructura porosa. Este resultado se compara con un estudio anterior que logró el 100% de remoción con carbón convencional (Caviedes Rubio & Espinosa Pastrana, 2020). Los tres adsorbentes muestran una elevada eficacia en la remoción de contaminantes, especialmente en la extracción de cadmio con porcentajes superiores al 90%. Para AM y compuestos orgánicos, quitina y carbón activado son eficaces, pero no la zeolita, que podría usarse como parte estructural del filtro. Las interacciones entre grupos funcionales y adsorbentes, como enlaces de hidrógeno, estructura porosa y superficie interna permiten altos porcentajes de remoción.

3.1.7. Adsorción en columna de cadmio

En los experimentos de adsorción realizados en una columna de lecho fijo se logró disminuir la concentración inicial de la solución hasta el LMP establecido por la normativa ecuatoriana mediante los adsorbentes quitina y zeolita. Sin embargo, en el caso del carbón activado a partir de raquis de banano no fue posible obtener concentraciones tan bajas del contaminante debido a la concentración inicial del flujo de agua empleado para la práctica. Se fijó un valor estándar para el tiempo de ruptura, alcanzado cuando la C/C_0 es igual al 0.1, es decir, el 10% de la concentración inicial (McCabe, 2007).

Figura 17. Curva de ruptura de Cadmio en los adsorbentes



En la Figura 17, la curva de ruptura para la adsorción de cadmio con quitina muestra una pendiente elevada después del punto de ruptura, indicando que se utiliza la mayoría de la longitud del lecho hasta ese punto. La zona de transferencia, entre los minutos 280 y 480, tiene un área limitada debido a la pendiente. La ruptura ocurre en el minuto 281 con C/C_0 igual a 0.1, y la capacidad de adsorción hasta ese punto es de 5.983 mg/g, mayor que en otro estudio que variaba entre 4.2 y 1.8 mg/g (Rodríguez Martínez, 2011). La capacidad de adsorción de la quitina fue excelente, corroborada por el porcentaje de remoción de la isoterma de adsorción. La longitud de lecho utilizada fue de 2.86 cm, casi en su totalidad, respaldando el comportamiento de la curva de ruptura con su pendiente pronunciada.

La curva de ruptura para la adsorción de cadmio en zeolita tiene una pendiente menor que la de quitina. La zona de transferencia de masa es amplia ya que el sistema alcanza el punto de ruptura alrededor del minuto 78 y se satura completamente al minuto 180. El área hasta el punto de ruptura indica que parte del lecho no se utiliza, lo que implica una mayor longitud de lecho sin uso en comparación con la quitina. La capacidad de adsorción en el punto de ruptura es de 4.67 mg/g, superior al estudio anterior de 2.3 mg/g (Carbonel Ramos, 2018), demostrando buena capacidad de adsorción. Sin embargo, es menor que la quitina, posiblemente debido a su mayor densidad. La longitud de lecho utilizada es de 2.29 cm, menor que la de la quitina, lo que implica una cantidad adsorbida menor, aunque la pendiente también es menor, sugiriendo una mayor área de transferencia de masa.

Se muestra la curva de ruptura para la adsorción de cadmio en carbón activado de raquis de banano. A diferencia de otras curvas, la concentración inicial es más alta, indicando menor capacidad de adsorción, aunque el porcentaje de remoción es significativo. La amplia zona de transferencia de masa, entre los minutos 120 y 200, sugiere que gran parte del lecho no se utiliza. La ruptura ocurre en el minuto 120, con capacidad de adsorción de 5.67 mg/g hasta ese punto. Aunque presenta buena capacidad de adsorción, es menor que la quitina. La longitud de lecho

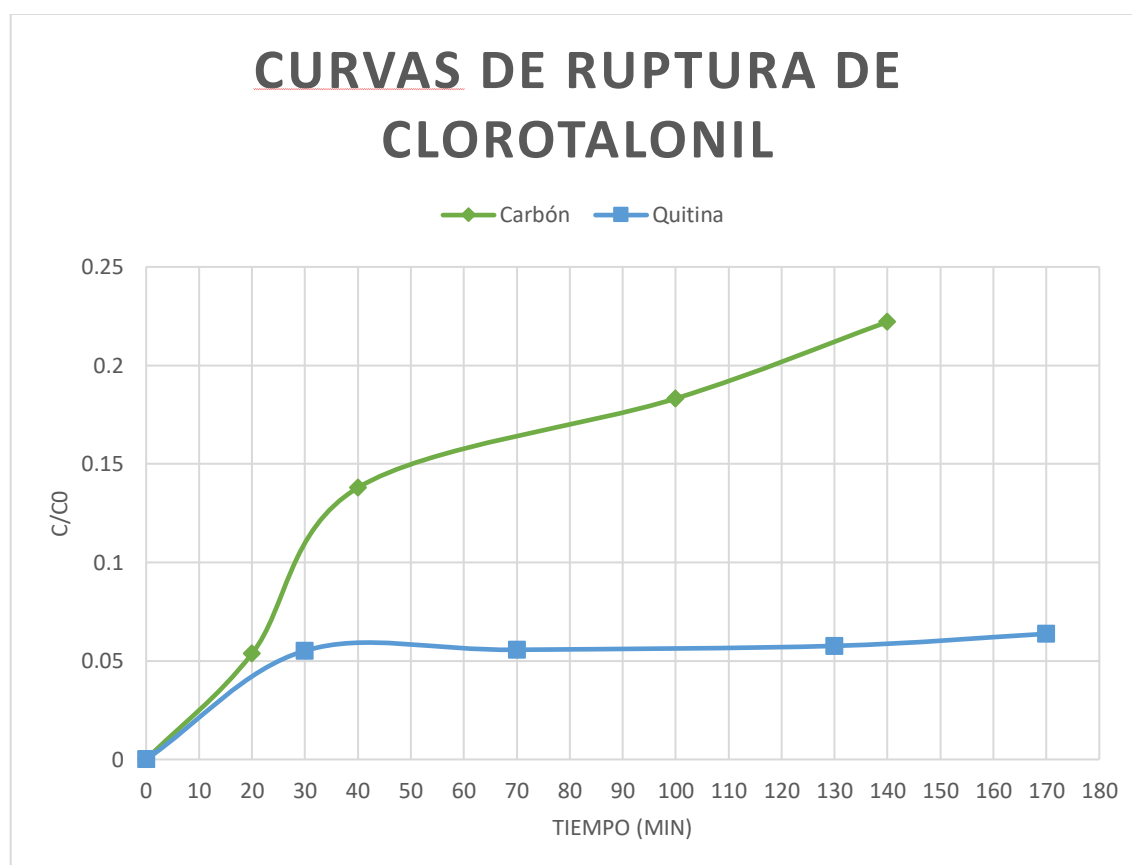
utilizada es de 1.5 cm, menor que en quitina y zeolita, indicando menor uso de lecho y una pendiente menos pronunciada.

En conclusión, el mejor adsorbente para el cadmio fue la quitina por el mayor tiempo que toma para saturarse.

3.1.8. Adsorción en columna de pesticida organoclorado

Se llevó a cabo la prueba en columna de flujo continuo, empleando una solución de 1000 ppm del pesticida seleccionado. Como la cantidad de datos disponible no permite establecer una gráfica exacta de la adsorción con respecto al tiempo, se tomó como referencia una relación de C/C_0 de 0.05 para determinar el punto de ruptura, ya que solo la última porción de fluido tratado posee la mayor concentración, la fracción media de soluto separado desde el comienzo hasta el punto de ruptura es 0.99 o superior (McCabe, Smith, & Harriott, 2007).

Figura 18. Curva de ruptura de pesticida Clorotalonil



En la Figura 18, la curva de ruptura del pesticida con quitina como adsorbente no reveló todo el comportamiento de adsorción debido al tiempo de operación limitado. Al establecer C/C_0 en 0.05 (McCabe, 2007), la capacidad de adsorción hasta la ruptura es de 208.30 mg/g, notablemente alta en comparación con el carbón activado. Esto destaca la eficacia de la quitina para remover compuestos orgánicos. Aunque la concentración inicial fue 1000 ppm, superior a las muestras reales de agua, la quitina demostró un alto porcentaje de remoción. También se observa la curva de ruptura con carbón activado de raquis de banano, con una capacidad de adsorción de 171.23 mg/g, mejor que otro carbón activado de espárrago con 111.35 mg/g (García Castañeda, Maya Sánchez, & Andrade Espinosa, 2020). El carbón activado reduce la concentración de 1000 ppm a 53 ppm en 20 minutos, indicando una amplia área de transferencia de masa y la posibilidad de no utilizar completamente el lecho a concentraciones elevadas.

3.1.9. Adsorción en columna de lecho mixto

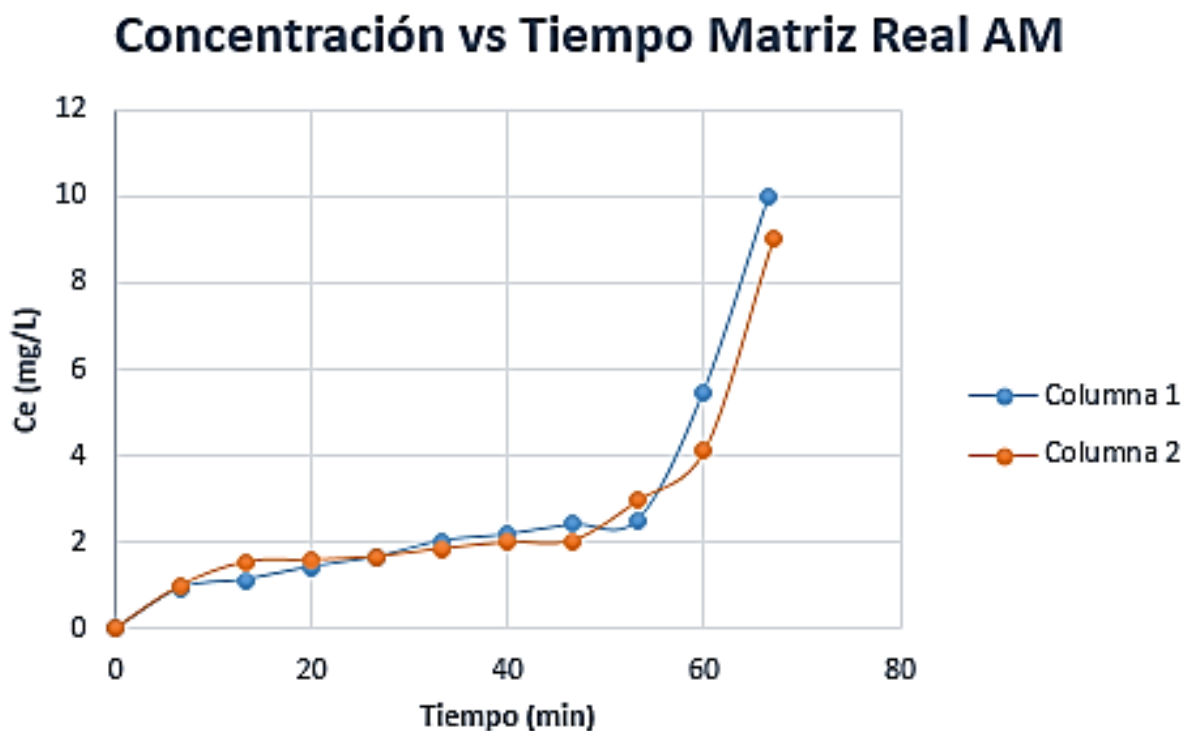
Se realizaron 3 pruebas en un lecho empacado mixto que contiene una masa específica de cada adsorbente mostrada en la Tabla 12. Se estableció un flujo de agua contaminada aproximado de 1.5 ml/min, con una longitud total del lecho de 2 cm. Con una solución mixta de los 3 contaminantes a diferentes concentraciones indicadas en la Tabla 4. Con un tiempo de operación de 70 minutos, se determinó la concentración de los contaminantes AM y pesticida BRAVO® 720 (Clorotalonil).

Tabla 12. Modelo empleado de lecho mixto

Adsorbente	Masa (g)
Quitina	0.200
Zeolita	0.300
Carbón activado de raquis de banano	0.180

3.1.9.1. Adsorción en columna de azul de metileno en lecho mixto

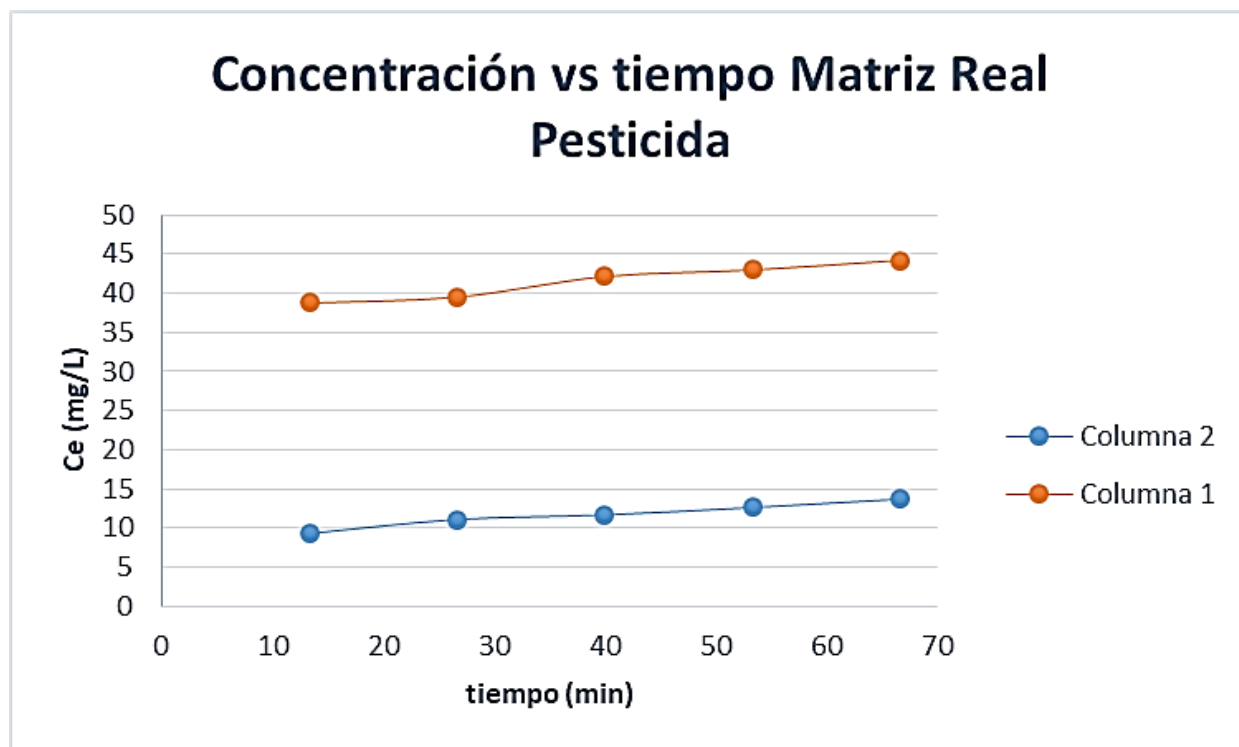
Figura 19. Curva de concentración de lecho mixto – Azul de metileno



En la Figura 19, se observó la variación de la concentración de AM en la matriz real a lo largo del tiempo. Inicialmente, la concentración es inferior a 1 y aumenta de manera casi exponencial, alcanzando la concentración inicial de 10 ppm, indicando saturación completa del material debido a otros contaminantes adsorbidos simultáneamente. La zeolita no adsorbe AM, y los porcentajes de remoción para carbón activado y quitina son del 87% y 95%, respectivamente. Estos valores son similares a los obtenidos en los primeros minutos, superiores al 90%, pero disminuyen a medida que fluye el agua contaminada. El porcentaje promedio para el tiempo de operación de 70 minutos fue del 73% para la columna 1 y 75% para la columna 2, cercanos y validando los datos al emplearse el mismo flujo y cantidad de masa.

3.1.9.2. Adsorción en columna de pesticida Clorotalonil en lecho mixto

Figura 20. Curva de concentración de lecho mixto – Pesticida



En la Figura 20 se mostró la variación de concentración del pesticida en la matriz real, con una concentración inicial de 200 ppm. La columna 2 logra reducir su concentración por debajo de los 10 ppm, representando un porcentaje de remoción mayor al 90%. En el ensayo 1, el porcentaje de remoción es ligeramente menor, alcanzando un 83%, pero sigue siendo elevado, especialmente considerando la presencia de tres contaminantes diferentes adsorbidos simultáneamente en el flujo de agua. Con un tiempo de operación de 70 minutos, la reducción de la concentración es significativa, validando así la eficaz capacidad de remoción del carbón y la quitina para compuestos orgánicos.

3.1.10. *Diseño de lecho empacado mixto*

El lecho empacado mixto consistió en la quitina, la zeolita y el carbón activado en proporciones detalladas en la Tabla 13.

Tabla 13. *Propuesta de diseño escalado de lecho mixto*

Material	Tiempo de ruptura (h)	Longitud del lecho (cm)	Diámetro de la columna (cm)	Masa de adsorbente (g)	Flujo (L/día)	Flujo (L/h)	Capacidad de adsorción (mg/g)	C ₀ (mg/L)
Carbón	24	8.4	10	352.53	2000	83,8	5,67	1
Zeolita	24	5.2	10	428.11	2000	83,8	4,67	1
Quitina	24	14.3	10	334.25	2000	83,8	5,98	1

Tabla 14. Intervalos típicos de diseño para columnas GAC en el tratamiento de aguas residuales

Parámetro	Valor	Comentario
Tamaño del carbón	8x30 mesh (0.595-2.38 mm)	Lechos de flujo descendente y lechos empaquetados de flujo ascendente
Carga hidráulica Flujo descendente	5-12 m ³ /m ² -h	
EBCT (tiempo de contacto en lecho de vacío)	10-50 min	Son necesarios ensayos en planta piloto para su determinación
Tasa de uso de carbón	24-72 g/m ³	Las tasas de uso de carbón inferiores se asocian a mayores EBCT
Altura de la columna	≤ 18 m	Máximo tamaño para transporte de las unidades prefabricadas
Diámetro	≤ 3.6 m	Máximo tamaño para transporte de las unidades prefabricadas
Relación altura:diámetro	1.5:1 a 4:1	Sin redistribución de líquido, usar >4:1 para una adecuada distribución del líquido

Tasa de retrolavado	20-50 m ³ /m ² -h
Expansión del lecho en el retrolavado	10-50%
Duración del retrolavado	10-15 min

Fuente: Mackenzie, 2010.

Tabla 15. *Datos de diseño escalado de lecho mixto*

Variable	Valor
Tiempo de operación	24 h
Altura total	28 cm
Flujo de agua	83.83 L/h
Diámetro	10 cm
Volumen	700 cm ³
Relación altura:diámetro	2.8:1

Para el diseño, se considera la capacidad de adsorción más baja de cada material con respecto al contaminante. Dado que la capacidad de adsorción de quitina y carbón es mayor para pesticidas que para cadmio, se toma la capacidad de adsorción respecto al cadmio en el diseño. Esto se justifica por la mayor masa de adsorbente requerida para eliminar cadmio, como se refleja en los porcentajes de remoción. A concentraciones elevadas de pesticida, tanto carbón como quitina removieron el 90% de una concentración inicial de 1000 ppm.

La concentración inicial de los contaminantes es de 1 ppm en todos los casos. Aunque las concentraciones varían entre contaminantes en las fuentes hídricas y están por debajo de este valor, se debe considerar que no se utiliza completamente el lecho, ya que habrá una longitud no utilizada. El tiempo de ruptura se considera para 24 horas de operación debido al flujo diario determinado. La longitud total del lecho es de 28 cm, dividido en 3 segmentos de volumen que contienen cada adsorbente. Este volumen es variable y depende de la masa requerida de cada

material. La zeolita, que se necesita en mayor cantidad debido a su densidad y capacidad de adsorción para metales pesados, se coloca en dos segmentos diferentes, en la entrada y en la salida del flujo, distribuyendo su masa en dos partes.

Se utilizó una relación de 2.8:1 entre el diámetro y la longitud del lecho empacado; la elección de estas dimensiones depende de la aplicación, factores del proceso y del adsorbente utilizado; para ello son necesarios varios experimentos.

3.1.11. *Modelado y simulación*

En el programa computacional Aspen Plus® versión 12.1 se presentó un diagrama del proceso en la Figura 25 con los equipos involucrados en la Tabla 16. Este sistema de adsorción en lecho empacado mixto se diseñó para ser aplicado en zonas agrícolas, en donde el flujo de agua saliente de una bomba se dirige a un conector T en donde se separa hacia dos columnas de lecho empacado mixto, las cuales tienen válvulas para abrir una y dejar la otra cerrada, para así cuando una columna se sature, se pueda regenerar y la otra columna continúe con la filtración, siendo esta de manera continua.

Figura 21. Modelado en Aspen Plus®

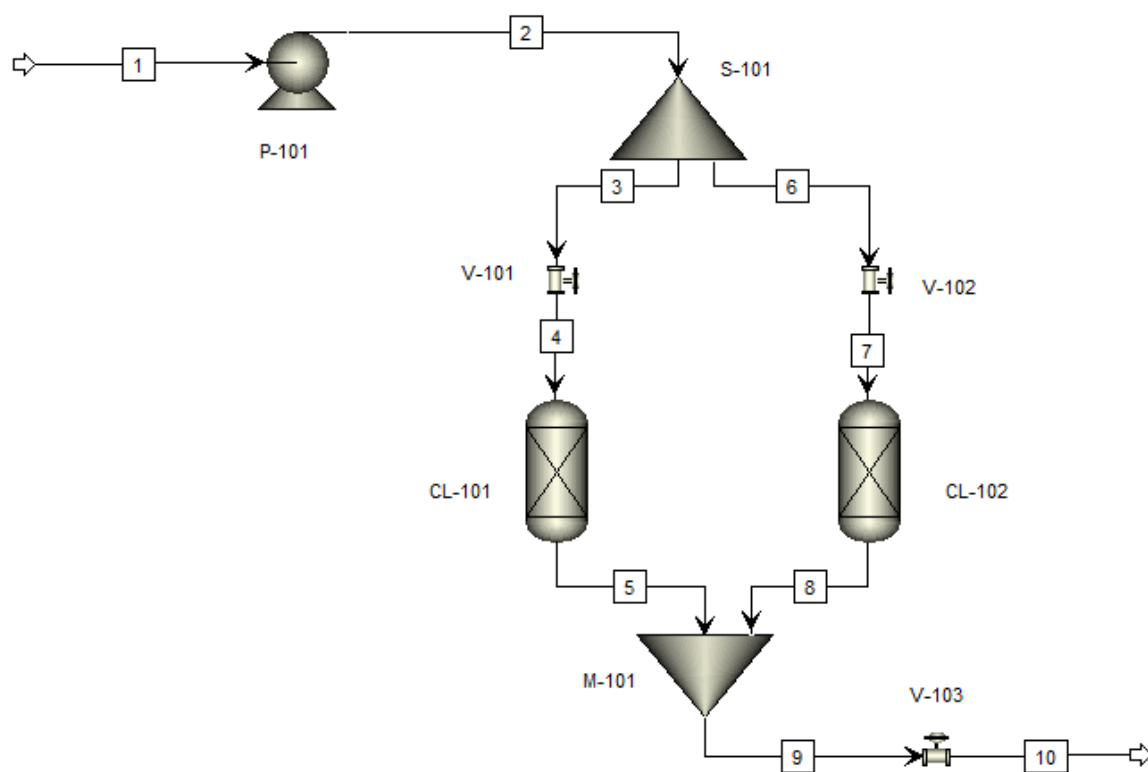


Tabla 16. Identificación de los principales equipos

Identificación	Equipo
P-101	Bomba
S-101	Separador
V-101, V-102, V-103	Válvula
CL-101, CL-102	Columnas de lecho empacado mixto
M-101	Mezclador

En la herramienta de simulación Aspen Adsorption® se realizó una prueba en estado estacionario del lecho mixto, con el fin de corroborar los datos obtenidos experimentalmente en las isothermas de adsorción obtenidas en lotes de capacidad de adsorción, se cumplió con la concentración límite de los contaminantes detallados en el Apéndice A. De la literatura se tomaron

datos referenciales de coeficientes de masa de los adsorbentes (Brosillon, Manero, & Foussard, 2001) (Yeşim & Yücel, 2000) (Inglezakis, Balsamo, & Montagnaro, 2020).

Figura 22. Simulación en Aspen Adsorption®

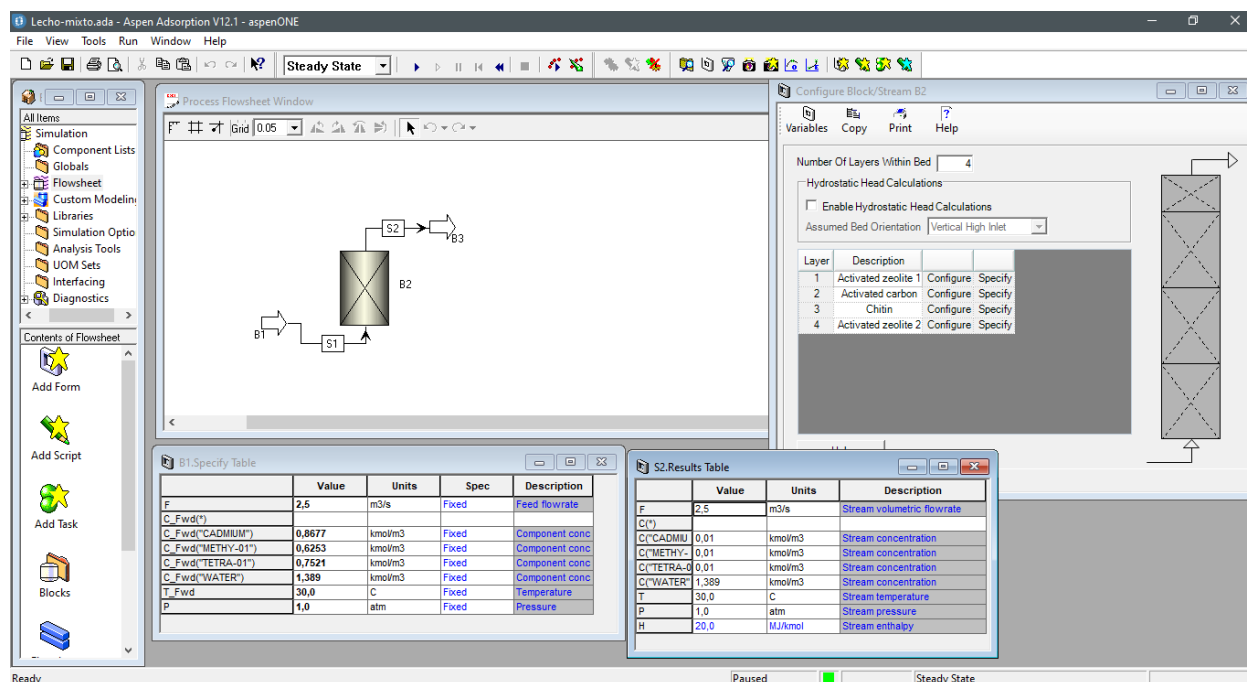


Tabla 17. Datos de alimentación

Variable	Valor	Descripción
F	2.5 m ³ /s	Flujo de alimentación
C_Fwd(Cadmio)	0.8677 kmol/m ³	Concentración del componente
C_Fwd(Azul de metileno)	0.6253 kmol/m ³	Concentración del componente
C_Fwd(Clorotalonil)	0.7521 kmol/m ³	Concentración del componente
C_Fwd(Agua)	1.389 kmol/m ³	Concentración del componente
T_Fwd	30.0 °C	Temperatura
P	1.0 atm	Presión

Tabla 18. Datos de salida

Variable	Valor	Descripción
F	2.5 m ³ /s	Flujo volumétrico
C_Fwd(Cadmio)	0.01 kmol/m ³	Concentración del componente
C_Fwd(Azul de metileno)	0.01 kmol/m ³	Concentración del componente
C_Fwd(Clorotalonil)	0.01 kmol/m ³	Concentración del componente
C_Fwd(Agua)	1.389 kmol/m ³	Concentración del componente
T_Fwd	30.0 °C	Temperatura
P	1.0 atm	Presión

La simulación en Aspen Adsorption®, replicando las condiciones reales de flujo de agua, longitud de lecho y concentraciones de contaminantes, reproduce el proceso experimental de adsorción. Logra un 99% de remoción de cadmio, equiparable a los valores experimentales para zeolita y quitina mediante la isoterma de adsorción, validando así los resultados experimentales. Además, la simulación indica un 96% de remoción para AM, comparado con los porcentajes experimentales del 95% y 87% para quitina y carbón activado, respectivamente. La remoción de AM se asemeja al valor experimental de quitina, confirmando la eficacia superior de este adsorbente en la eliminación de compuestos orgánicos y respaldando el resultado experimental con la simulación.

Para el pesticida clorado, la simulación arroja un 98% de remoción, en comparación con porcentajes experimentales de 89% a 93%, evidenciando una discrepancia entre la capacidad de adsorción ideal y la medida experimental. Esto podría atribuirse al comportamiento del clorotalonil en el agua, donde la simulación muestra un comportamiento más ideal que la experimentación, afectada por moléculas sin disolver. Aunque el porcentaje de remoción real es alto, considerando concentraciones de 200 ppm, superando el 95%. La capacidad de adsorción simulada del carbón activado fue de 5.915 mg/g, mientras que la experimental, tomando el valor más bajo, fue de 5.67 mg/g. La capacidad de adsorción de zeolita en simulación y experimental fue de 4.67 mg/g, contrastando con los porcentajes de remoción obtenidos. La capacidad de adsorción de quitina fue de 5.98 mg/g en la prueba experimental y de 6.589 mg/g en simulación. La discrepancia en la capacidad de adsorción podría deberse a la presencia de otros compuestos orgánicos como AM, interactuando con las moléculas de quitina durante la adsorción. Además, iones de Cd podrían generar interacciones que desplacen las moléculas de clorotalonil.

Por medio del paquete de modelado Autodesk Inventor Professional® se realizaron renderizados, como se muestra en las Figuras Figura 23 y Figura 24, del diseño de lecho empacado mixto propuesto para escala laboratorio con las medidas detalladas en la Tabla 12.

Figura 23. *Renderizado con vista isométrica lateral de lecho empacado mixto*

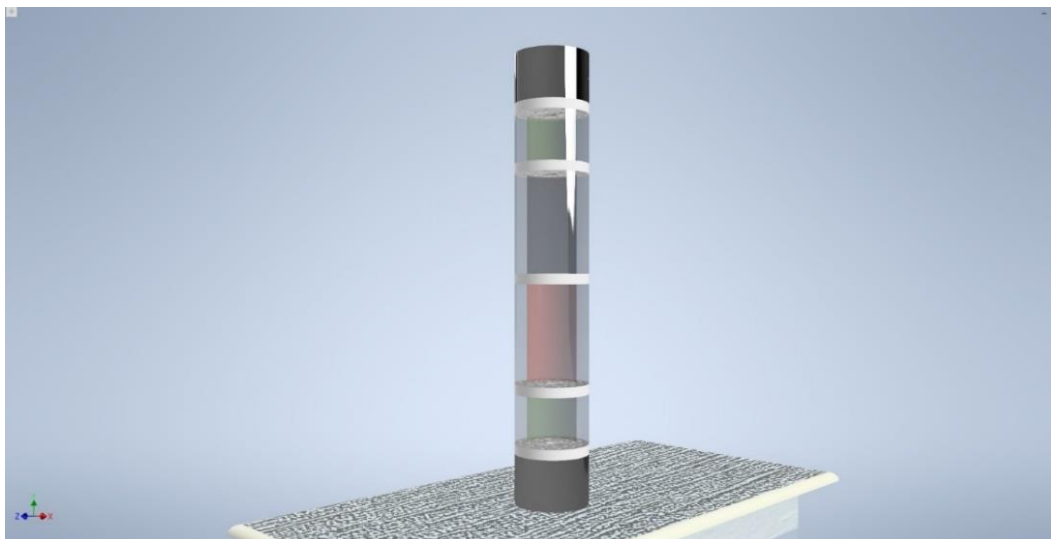
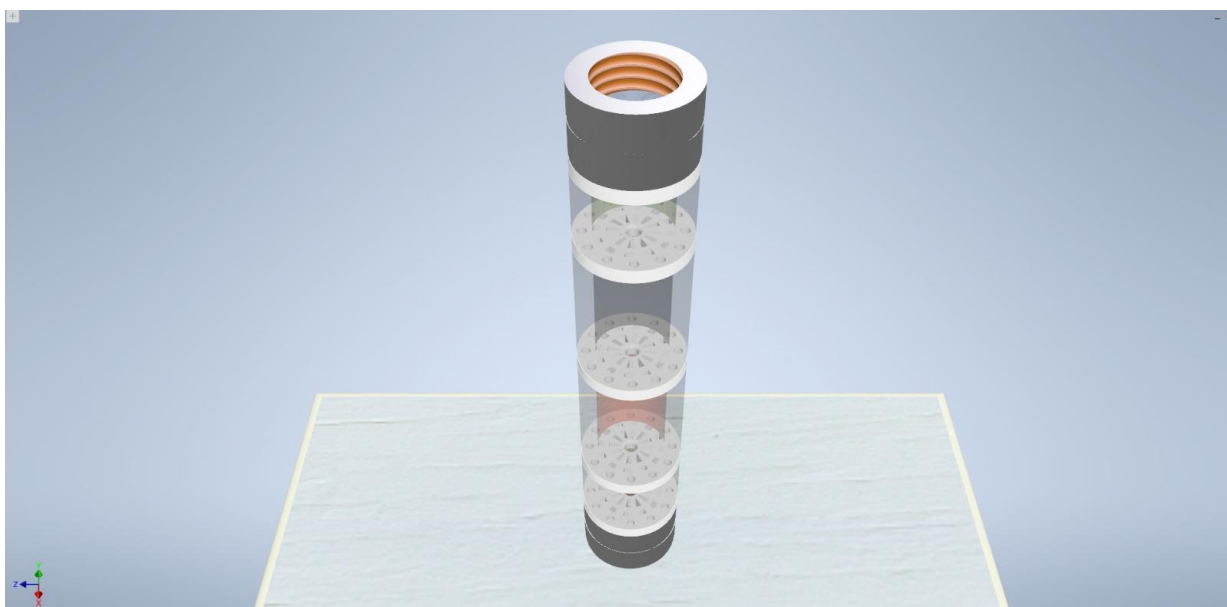


Figura 24. *Renderizado con vista isométrica frontal-superior de lecho empacado mixto*



En ANSYS® se llevó a cabo una simulación utilizando la técnica FEM con el propósito de realizar un análisis estructural del filtro propuesto, para mayor detalle revisar Apéndice E.

CAPÍTULO 4

4.1. Conclusiones y recomendaciones

4.1.1. Conclusiones

Se construyó un lecho mixto estratificado a partir de varios adsorbentes quitina, zeolita y carbón activado a partir del raquis de banano, obteniendo como resultado una adsorción mayor, con un porcentaje de remoción de los adsorbentes de entre 83% a 99%. Considerando estos porcentajes de remoción se puede aseverar que los adsorbentes poseen la capacidad suficiente para remover contaminantes del agua hasta las concentraciones límites establecidas en el TULSMA de 0.1 ppm para pesticidas clorados y de 0.01 ppm para cadmio, referidas en el Apéndice A, debido a que las concentraciones presentes en las fuentes de agua subterráneas están muy por debajo de las empleadas para el estudio.

A partir de las capacidades de adsorción determinadas de cada material respecto a los contaminantes tratados se pudo establecer un diseño de lecho empacado que contenga los 3 materiales adsorbentes con la capacidad de eliminar contaminantes hasta los límites permisibles establecidos en el TULSMA. Por lo que para el tratamiento de un flujo de 2000 L/día se debe construir un lecho empacado estratificado con una longitud de 28 cm y un diámetro de 10 cm, que contenga una masa de 352.53 g de carbón activado, 428 gramos de zeolita y 334.25 gramos de quitina. Este lecho tiene la capacidad suficiente para reducir la concentración de los compuestos no deseados de 1 ppm hasta 0.01 ppm.

Se determinó los porcentajes de remoción de cada material para los contaminantes cadmio y pesticida clorado. Obteniendo que para el cadmio los porcentajes de remoción de quitina, zeolita y carbón son del 99% y 93%. Mientras que, para el pesticida clorado, el porcentaje de remoción es de 83% para quitina y 95% para carbón. Mediante experimentación por lotes se estableció las isotermas de adsorción de cada material respecto al contaminante, estableciendo que, para los contaminantes AM, pesticida clorado y Cd, la quitina y el carbón activado son excelentes

adsorbentes con porcentajes de remoción mayores al 90%. En el caso de la zeolita, es un buen adsorbente para Cd con un porcentaje de remoción del 99%, sin embargo, no lo es para los compuestos orgánicos. Por tanto, los materiales adsorbentes principales del lecho construido son la quitina y el carbón activado.

Se establecieron las curvas de ruptura mediante flujo continuo que permitieron determinar las capacidades de adsorción de los materiales y, a partir de ello, establecer un criterio de diseño para el dimensionamiento del lecho empacado. La capacidad de adsorción varía en función del adsorbente. El adsorbente con mejor capacidad de adsorción es la quitina, por lo que se lo considera como el adsorbente principal del lecho. El carbón activado de raquis de banano posee una capacidad de adsorción y un porcentaje de remoción similar a los carbones comerciales, por lo que su implementación como adsorbente de uso común puede generar buenos resultados. Sin embargo, aun requiere un proceso de optimización para establecer un adsorbente estándar a partir de la materia prima empleada con porcentaje de remoción invariables.

El análisis FTIR verificó la presencia de grupos funcionales, como hidroxilos y carbonilos, en cada uno de los adsorbentes utilizados, favoreciendo así la adsorción de metales pesados y pesticidas orgánicos.

En términos de la adsorción de cadmio en equilibrio, se observó un rendimiento superior con CCT, ya que mantuvo una remoción del 99% incluso al aumentar la concentración inicial de 2 a 10 ppm con 0.5 g de CCT. Además, se logró una capacidad máxima de adsorción de 5.98 mg/g.

En el contexto de columnas de lecho fijo, se destacó que CCT fue el único material entre los examinados capaz de reducir la concentración de azul de metileno por debajo del límite máximo permisible durante un período operativo de 6 horas, utilizando 1.64 g.

Altos porcentajes de remoción en el caso de metales pesados, arriba del 90% para todos los adsorbentes. Menor porcentaje de remoción para el carbón con AM, 83%, mientras que quitina

es el mejor adsorbente en ambos casos, con porcentajes de remoción arriba del 90% en ambos casos. La zeolita con AM no es favorable en la adsorción.

Para construir un modelo real, se puede emplear quitina y carbón como principales adsorbentes debido a su elevada eficiencia de remoción. Sin embargo, la quitina requiere menor masa que el carbón activado por su capacidad de adsorción. La zeolita se puede emplear en adsorción de metales pesados, más no, para compuestos orgánicos.

El carbón activado producido a partir de raquis de banano posee altos porcentajes de remoción para AM, Cd y clorotalonil. Su capacidad de adsorción es similar los carbones activados comerciales, por lo que es factible su implementación como agente adsorbente para tratar agua contaminada. El proceso de producción puede replicarse en un ambiente cotidiano fuera de laboratorio y poseer un alto grado de remoción.

El porcentaje de eliminación de cadmio en la simulación para la matriz real fue del 99%. Este valor es comparable al obtenido para zeolita y quitina mediante isoterma de adsorción, ya que en ambos casos se obtiene el mismo porcentaje de eliminación. Mientras tanto, el porcentaje de eliminación de AM en la simulación fue del 96%, mientras que el porcentaje de eliminación de quitina y carbón activado fue del 95% y 87%. El porcentaje de eliminación de AM fue comparable a los valores experimentales de quitina, lo que indica que este adsorbente mostró una mayor tendencia a eliminar compuestos orgánicos y a su vez diferenció los valores experimentales de los valores simulados.

Se determinó la capacidad de adsorción en simulación obteniendo que los adsorbentes carbón, zeolita y quitina poseen un valor de 5.91 mg/g, 4.67 mg/g y 6.59 mg/g respectivamente. Estos valores son similares a los obtenidos experimentalmente. Por lo que se puede asegurar que los adsorbentes tienen capacidades lo suficientemente buenas para reducir la contaminación del agua subterránea hasta concentraciones inferiores a los límites permisibles establecidos en la

norma TULSMA. Esto es validado con los porcentajes de remoción obtenidos en simulación y comparables con los experimentales, ya que son mayores al 90% en la mayoría de los casos.

Para los plaguicidas clorados el porcentaje de remoción mediante simulación fue del 98%, mientras que experimentalmente el porcentaje de remoción fue del 89 al 93%, es decir, hubo una diferencia entre la capacidad de adsorción ideal y la medida experimentalmente.

4.1.2. Recomendaciones

A partir de los resultados, se sugiere ampliar los experimentos de adsorción en columna de lecho mixto, implicados en este trabajo en distintas composiciones en peso y flujos volumétricos para determinar en cual sistema se obtiene el mejor punto de ruptura, es decir, el que dure el mayor tiempo y obtenga la mejor remoción, en soluciones multicomponentes.

Para el escalado de la columna se sugiere determinar la porosidad de los adsorbentes, para ello se debería complementar los análisis con caracterización con el método BET.

Sería conveniente utilizar el programa computacional Aspen Adsorption® en conjunto con sistemas dinámicos para la simulación a varias condiciones de temperatura, caudales de agua y dimensiones de columna a partir de datos experimentales de tiempo de ruptura. Para ello, se requiere experimentaciones más avanzadas con el fin de ajustar los parámetros de iteración y determinar las características de los adsorbentes para su correcta elaboración.

Realizar varios análisis de concentraciones iniciales y finales en equipos de espectrometría de masas y cromatografía de gases para asegurarse que el ensayo da los resultados esperados.

Modelar la cinética de las posibles reacciones químicas involucradas en la adsorción de los contaminantes según las temperaturas y los tiempos de isoterma de adsorción empleados.

REFERENCIAS

- Alcívar Tenorio, M., & Castro Rendón, R. (20 de Mayo de 2021). Concentración de metales pesados (CR total, Pb, CD) en agua superficial y sedimentos en el estero salado (Guayaquil). *Revista Científica Ciencias Naturales y Ambientales*, 5(1), 28-40. doi:10.53591/cna.v5i1.280
- Antúnez Sánchez, A., & Guanoquiza Tello, L. (2019). *La contaminación ambiental en los acuíferos de Ecuador*. Medellín: Revisión Visión Contable .
- ATSDR. (6 de Mayo de 2016). *ToxFAQs™ - Cadmio (Cadmium)*. Obtenido de Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades: https://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts5.html#:~:text=Ingerir%20alimentos%20o%20tomar%20agua,riñones%20y%20posiblemente%20enfermedad%20renal.
- Ayuda en acción Ecuador. (17 de Junio de 2021). *Gestión social del agua*. Obtenido de <https://ayudaenaccion.ec/gestion-social-del-agua/>
- Brosillon, S., Manero, M.-H., & Foussard, J.-N. (2001). Mass Transfer in VOC Adsorption on Zeolite: Experimental and Theoretical Breakthrough Curves. *Environmental Science & Technology*, 35(17), 3571-3575. doi:10.1021/es010017x
- Carbonel Ramos, D. (18 de Septiembre de 2018). Adsorción de Cadmio, Cobre y Plomo en Bentonita, Caolín y Zeolita Naturales y Modificadas: Una Revisión de los Parámetros de Operación, Isotermas y Cinética. *Ingeniería*, 23(3), 252-273. doi:10.14483/23448393.13418
- Caviedes Rubio, D. I., & Espinosa Pastrana, N. L. (2020). *Tratamientos para la remoción de pesticidas presentes en aguas residuales*. Universidad Cooperativa de Colombia, Investigación en Administración de Operaciones y Producción, Medellín. Obtenido de <https://repository.ucc.edu.co/server/api/core/bitstreams/3f4d6e94-d4c4-4df9-9206-9dcaff9be0e2/content>

- Cisneros Pérez, P. A., Intriago-Mendoza, A. S., & Ramos-Galarza, J. P. (5 de Diciembre de 2018). Colorimetría mediante fotografía digital para la determinación de azul de metileno en experimentos de fotodegradación utilizando TiO₂ como catalizador. *ACI Avances en Ciencias e Ingenierías*, 10(1). doi:10.18272/aci.v10i1.834
- Curi, A., Granda, W., Lima, H., & Sousa, W. (2006). Las Zeolitas y su Aplicación en la Descontaminación de Efluentes Mineros. *Información tecnológica*, 17(6), 111-118. Obtenido de https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642006000600017
- Diario La Hora. (30 de Mayo de 2017). 20.7% del agua que se consume en Ecuador está contaminada. Obtenido de <https://reliefweb.int/report/ecuador/207-del-agua-que-se-consume-en-ecuador-est-contaminada>
- Esquerria Brauer, I. R. (1988). *Aislamiento, caracterización y aplicación de quitina a partir de cáscara de camarón (Penaeus Sp)*. Universidad de Sonora, Departamento de Ciencias químico-biológicas, Sonora. Obtenido de <http://www.bidi.uson.mx/TesisIndice.aspx?tesis=920>
- Ferrer, A. (2003). Intoxicación por plaguicidas. *Anales Sis San Navarra*, 26(1), 155-171. Obtenido de https://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1137-66272003000200009
- Fundación Canarina. (Agosto de 2020). *El plátano de Canarias*. Obtenido de <https://fundacioncanarina.org/el-platano-de-canarias/>
- García Castañeda, C. D., Maya Sánchez, A., & Andrade Espinosa, G. (2020). *Remoción de plaguicidas organoclorados mediante carbón activado utilizando el residuo agrícola de espárrago como precursor*. Valle de Morelia: Centro de Investigaciones en Óptica, A.C. Obtenido de https://congresos.cio.mx/17_enc_mujer/cd_congreso/archivos/resumenes/S2/S2-BYQ12.pdf

- Geankoplis, C. (1998). *Procesos de transporte y operaciones unitarias* (Tercera ed.). México, D.F., México: Compañía Editorial Continental, S.A. de C.V.
- Gualteros Díaz, L., & Chacón Rodríguez, M. A. (2015). *Estudio de la eficiencia de lechos filtrantes para la potabilización de agua proveniente de la quebrada la despensa en el municipio Guaduas Cundinamarca vereda La Yerbabuena*. Universidad de La Salle, Ingeniería Ambiental y Sanitaria, Bogotá D.C. Obtenido de https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1550&context=ing_ambiental_sanitaria
- Guzhñay Lozano, C. G. (2022). *Evaluación de la eficiencia de extracción de quitina de la cáscara de camarón, obtenida enzimáticamente papaína y quimotripsina*. Universidad Politécnica Salesiana, Ingeniería en biotecnología de los recursos naturales, Cuenca. Obtenido de <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/21665/1/UPS-CT009516.pdf>
- Higuera Cobos, Ó. F., Arroyave Londoño, J. F., & Florez García, L. C. (10 de Octubre de 2008). *DISEÑO DE UN BIOFILTRO PARA REDUCIR EL ÍNDICE DE CONTAMINACIÓN POR CROMO GENERADO EN LAS INDUSTRIAS DEL CURTIDO DE CUEROS*. Universidad Nacional de Colombia, Pereira. Obtenido de <https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/13589/14381>
- IANAS. (2021). *Calidad del agua en las Américas Una sinopsis*. Córdoba: Soluciones Gráficas SRL.
- INEC. (2020). *Censo Ecuador Población Rural de la Provincia del Guayas*. Obtenido de <https://censoecuador.ecudatanalytics.com>
- Inglezakis, V., Balsamo, M., & Montagnaro, F. (6 de Diciembre de 2020). Liquid–Solid Mass Transfer in Adsorption Systems—An Overlooked Resistance? *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 59(50), 22007–22016. Obtenido de <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.iecr.0c05032>

- Jiménez Fallas, M., Charpentier Alfaro, C., & Méndez Arias, J. (2021). *Aprovechamiento de raquis de banano como fuente de carbono para producción de celulosas*. Universidad de Costa Rica, Instituto de Investigaciones en Ingeniería, San Pedro de Montes de Oca. Obtenido de <https://jornadas.fing.ucr.ac.cr/documentos/Ponencia/2019/Aprovechamiento-de-raquis-de-banano-como-fuente-de-carbono-para-produccion-de-celulosas.pdf>
- Jurado Delgado, J. F. (2019). *Reducción de costos mediante el uso de agua purificada a base de cáscara de camarón y responsabilidad social empresarial Camaronera Fincas Marinas S.A.* Universidad Ecotec, Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales, Guayaquil. Obtenido de <https://repositorio.ecotec.edu.ec/bitstream/123456789/92/1/JURADO%20%20JOSE.pdf>
- Leyva Ramos, R., Díaz Flores, P. E., Guerrero Coronado, R. M., Mendoza Barrón, J., & Aragón Piña, A. (Septiembre de 2004). Adsorción de Cd(II) en solución acuosa sobre diferentes tipos de fibras de carbón activado. *Revista de la Sociedad Química de México*, 48(3), 196-202. Obtenido de https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0583-76932004000300003
- McCabe, W., Smith, J., & Harriott, P. (2007). *Operaciones Unitarias en Ingeniería Química* (Séptima ed.). México, D.F., México: McGraw-Hill.
- Méndez Verduga, R. A. (2019). *Producción de carbón activado con raquis de banano y su efecto en el tratamiento de agua destinada al consumo humano*. Quevedo: Universidad Técnica Estatal de Quevedo. Obtenido de <https://repositorio.uteq.edu.ec/items/5e517540-4ff1-418c-833e-dcc3d2ca3e06>
- Méndez Verduga, R. A. (2019). *Producción de carbón activado con raquis de banano y su efecto en el tratamiento de agua destinada al consumo humano, Quevedo. Año 2018*. Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Unidad de Posgrado en Gestión Ambiental. Quevedo: Universidad Técnica Estatal de Quevedo. Obtenido de

<https://repositorio.uteq.edu.ec/server/api/core/bitstreams/18f44908-0a87-46d4-b0fe-74c9e28c421e/content>

Oracle. (s.f.). *RMSE (Error cuadrático medio)*. Obtenido de https://docs.oracle.com/cloud/help/es/pbcs_common/PFUSU/insights_metrics_RMSE.htm#PFUSU-GUID-FD9381A1-81E1-4F6D-8EC4-82A6CE2A6E74

Pabón Guerrero, S. E., Benítez Benítez, R., Sarria Villa, R. A., & Gallo Corredor, J. A. (15 de Enero de 2020). Contaminación del agua por metales pesados, métodos de análisis y tecnologías de remoción. Una revisión. *Entre Ciencia e Ingeniería*, 14(27), 9-18. Obtenido de <http://www.scielo.org.co/pdf/ecei/v14n27/1909-8367-ecei-14-27-9.pdf>

Pacheco Serrano, F. A., & Tapia Marcos, R. M. (2022). *Diseño de un sistema adsorbente de lecho mixto para remoción selectiva de contaminantes en una matriz acuosa*. Escuela Superior Politécnica del Litoral, Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas, Guayaquil. Obtenido de <https://www.dspace.espol.edu.ec/retrieve/805fb943-b3a3-4160-aa21-7720e8184ac3/T-110494%20FANNY%20PACHECO-%20ROMINA%20TAPIA.pdf>

Presidencia de la República de Ecuador. (2008). Norma de calidad ambiental y de descarga de efluentes: recurso agua. *TULSMA Libro VI Anexo 1*, (págs. 286-336). Quito. Obtenido de Libro VI Anexo 1: <https://faolex.fao.org/docs/pdf/ecu112180.pdf>

Quintero, M., Pérez, M., Meléndez, H., Rondon, J., & Imbert, F. (12 de Diciembre de 2012). Síntesis y caracterización de la zeolita Beta. *Avances en Química*, 7(3), 223-226. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/933/93325703010.pdf>

Rodríguez Martínez, M. L. (2011). *Adsorción de metales pesados mediante biocompositos con base en quitina de diferentes grados de acetilación*. Instituto Potosino de investigación científica y tecnológica, A.C., Ciencias aplicadas, San Luis Potosí. Obtenido de <https://ipicyt.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1010/619/3/TMIPICYTR6A32011.pdf>

- Romero Hermida, M. I. (2012). *Efecto de la composición de los gases de combustión en la captura de CO₂ por nanotubos de carbono: Un estudio de simulación*. Universidad de Sevilla, Departamento de Ingeniería Química y Ambiental, Sevilla. Obtenido de <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/70358/fichero/CAPITULO2.pdf>
- Santacruz de León, G., & Santacruz de León, E. E. (29 de Abril de 2020). Evaluación del desempeño del riego por aspersión en lotes con cultivo de banana en Chiapas, México. *Siembra*. doi:10.29166/siembra.v7i2.1712
- Santana Casiano, J. M. (Diciembre de 1991). *Procesos de adsorción-desorción de pesticidas organoclorados en quitina en agua de mar. Efecto de las variables fisicoquímicas del medio*. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, Departamento de química, Las Palmas de Gran Canaria. Obtenido de <https://accedacris.ulpgc.es/bitstream/10553/1861/8/815.pdf>
- Secretaría del Agua Ecuatoriana. (26 de Diciembre de 2019). *Plan nacional de riego y drenaje*. Obtenido de https://prefecturadeesmeraldas.gob.ec/docs/8_plan_nacional_de_riego_y_drenaje.pdf
- Solver Global. (5 de Octubre de 2021). *Informe de Análisis de Costos de Materiales para Plantas Manufactureras*. Obtenido de <https://www.solverglobal.com/es/glosario-de-plantillas-de-informes-presupuestos-previsiones-y-dashboards/informe-de-analisis-de-costos-de-materiales-para-plantas-manufactureras/>
- Tapia Miranda, L. M. (2013). *Manejo de agro químicos para la producción de banano y su efecto en la calidad de vida de los trabajadores de las bananeras BANSOL y CAROLINA del cantón Baba. Propuesta de disminución de riesgos*. Quevedo: UTEQ. Obtenido de <https://repositorio.uteq.edu.ec/items/8bdc0bde-4405-4d0d-bf53-74bf9eb2e3b6>
- Tutivén Ramón, B. A. (2020). *Evaluación de la eficiencia del carbón activado procedente del pseudotallo de plátano para su uso en remoción de contaminantes en agua de pozo*. Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, Facultad de educación técnica para el

desarrollo, Guayaquil. Obtenido de
<http://repositorio.ucsg.edu.ec/bitstream/3317/15510/1/T-UCSG-PRE-TEC-CIA-67.pdf>

Universidad para la Cooperación Internacional. (1 de Octubre de 2020). *El estudio técnico.*

Obtenido de https://www.ucipfg.com/Repositorio/MIA/MIA-01/BLOQUE-ACADEMICO/Unidad2/lecturas/Capitulo_del_Estudio_Tecnico.pdf

Yeşim, S., & Yücel, A. (27 de Mayo de 2000). Mass transfer and equilibrium studies for the sorption of chromium ions onto chitin. *Process Biochemistry*, 36, 157-173. Obtenido de https://web.iitd.ac.in/~arunku/files/CEL311_Y13/Mass%20transfer%20and%20equilibrium%20studies%20for%20the%20sorption%20of%20chromium%20ions%20onto%20chitin_sag.pdf

APÉNDICE A

A.1. Límite máximo permisible de cadmio (PRESIDENCIA DE LA REPÚBLICA DE ECUADOR, 2008).

Tabla 19. *Límite máximo permisible de cadmio en agua*

Parámetro	Expresado como	Unidad	Límite Máximo Permisible
Cadmio	Cd	mg/L	0.01

A.2. Límite máximo PERMISIBLE DE PESTICIDAS ORGANOFOSFORADOS TOTALES (PRESIDENCIA DE LA REPÚBLICA DE ECUADOR, 2008).

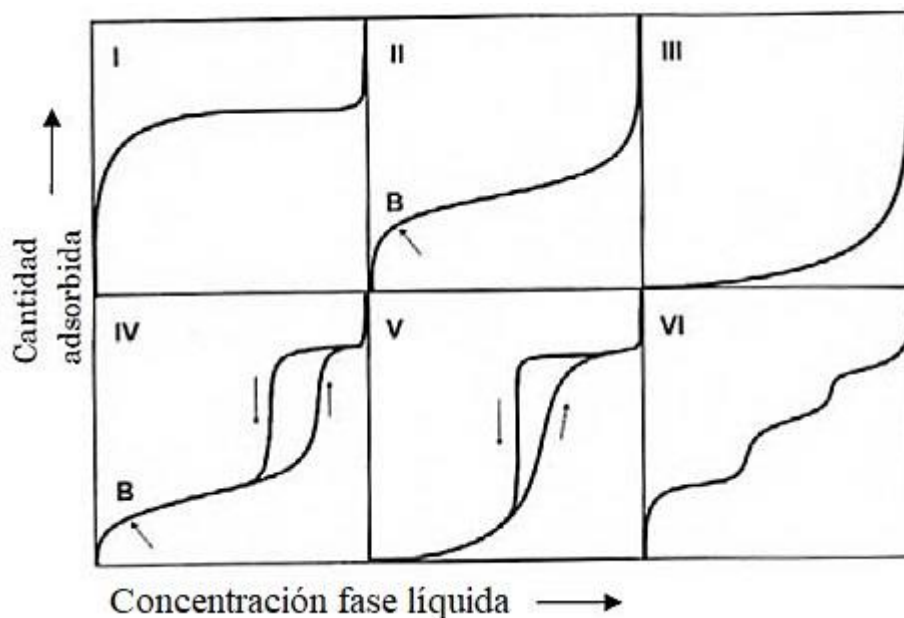
Tabla 20. *Límite máximo permisible para organoclorados totales*

Parámetro	Expresado como	Unidad	Límite Máximo Permisible
Organoclorados totales	Concentración de organoclorados totales	mg/L	0.1

APÉNDICE B

B.1. TIPOS DE ISOTERMAS

Figura 25. Clasificación de las isotermas según la IUPAC



Fuente: Romero Hermida, 2012.

B2. BALANCE DE MATERIA

La ecuación de equilibrio teórica fue empleada como la función lineal que corta con la isoterma para hallar el punto de equilibrio (McCabe, Smith, & Harriott, 2007).

$$q = \frac{C_0V - CV}{M} \quad (5.1.)$$

En donde:

q: Capacidad del adsorbente, g soluto/g adsorbente.

C_0 : Concentración inicial, mg soluto/ L agua.

C: Concentración final, mg soluto/ L agua.

V: Volumen del adsorbato, L.

M: Masa del adsorbente, g.

B3. RESULTADOS DE ADSORCIÓN POR LOTES

Tabla 21. Datos experimentación batch Azul de metileno - Carbón

Azul de metileno-Carbón				
Concentración inicial (Co) (ppm)	Concentración equilibrio (Ce) (ppm)	Absorbancia	Absorbancia promedio	%Remoción
10	0,692170022	0,409	0,408666667	93,07829978
		0,409		
		0,408		
20	2,164205817	0,518	0,518333333	89,17897092
		0,518		
		0,519		
30	3,278299776	0,6	0,601333333	89,07233408
		0,603		
		0,601		
40	6,889038031	0,87	0,870333333	82,77740492
		0,87		
		0,871		
50	8,182102908	0,966	0,966666667	83,63579418
		0,967		
		0,967		
				87,54856078

Figura 26. Ajuste con el modelo de Freundlich de Azul de metileno - Carbón

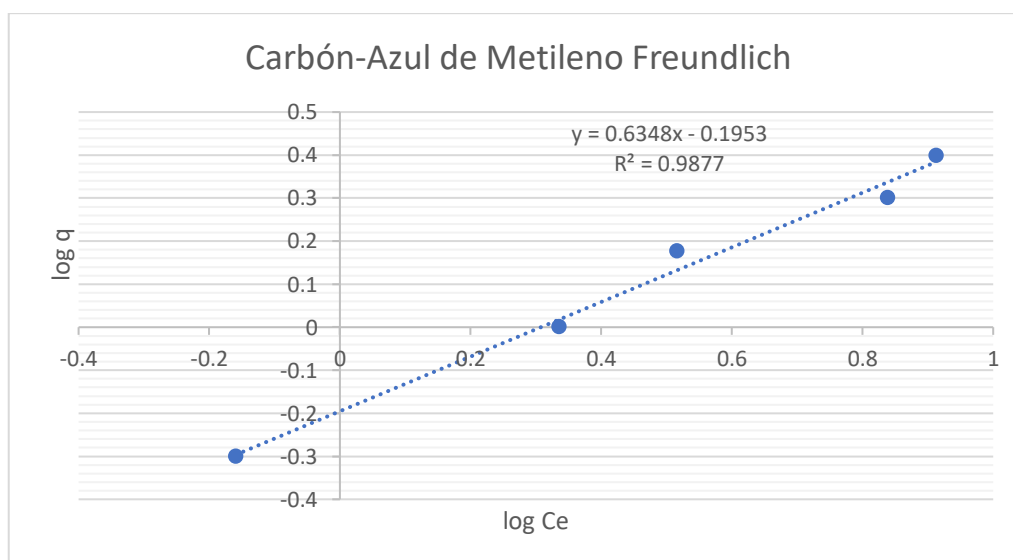


Figura 27. Ajuste con el modelo de Langmuir de Azul de metileno - Carbón

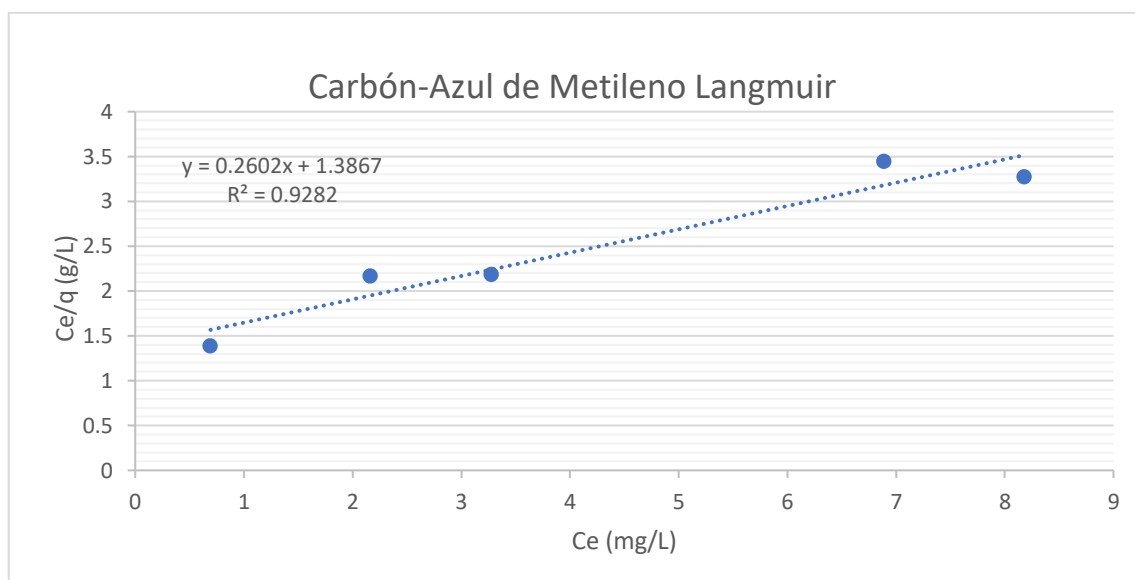


Tabla 22. Datos experimentación batch Azul de metileno - Zeolita

Azul de metileno-Zeolita				
Concentración inicial (Co) (ppm)	Concentración equilibrio (Ce) (ppm)	Absorbancia	Absorbancia promedio	%Remoción
10	-3,495749441	0,097	0,096666667	134,9574944
		0,097		
		0,096		
20	-3,446532438	0,1	0,100333333	117,2326622
		0,1		
		0,101		
30	-3,428635347	0,101	0,101666667	111,4287845
		0,102		
		0,102		
40	-3,370469799	0,106	0,106	108,4261745
		0,106		
		0,106		
50	-3,343624161	0,108	0,108	106,6872483
		0,108		
		0,108		
				115,7464728

Tabla 23. Datos experimentación batch Azul de metileno - Quitina

Azul de metileno-Quitina				
Concentración inicial (Co) (ppm)	Concentración equilibrio (Ce) (ppm)	Absorbancia	Absorbancia promedio	%Remoción
10	0,641163311	0,309	0,309333333	93,58836689
		0,308		
		0,311		
20	0,302908277	0,378	0,379666667	98,48545861
		0,38		
		0,381		
30	0,629530201	0,402	0,404	97,901566
		0,405		
		0,405		
40	2,947203579	0,577	0,576666667	92,63199105
		0,576		
		0,577		
50	4,696644295	0,707	0,707	90,60671141
		0,707		
		0,707		
				94,64281879

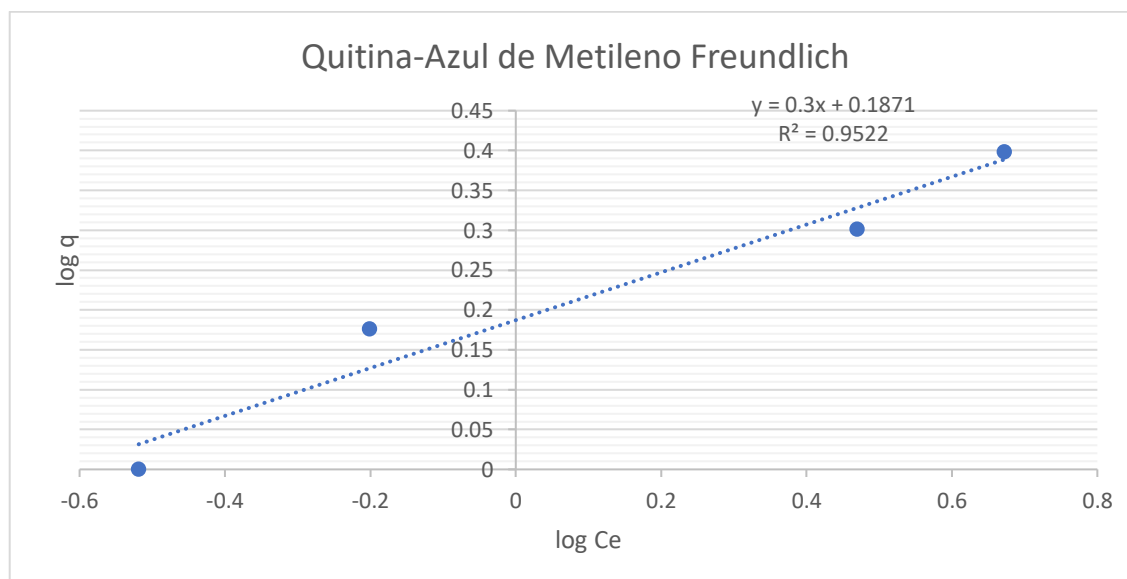
Figura 28. Ajuste con el modelo de Freundlich de Azul de metileno - Quitina

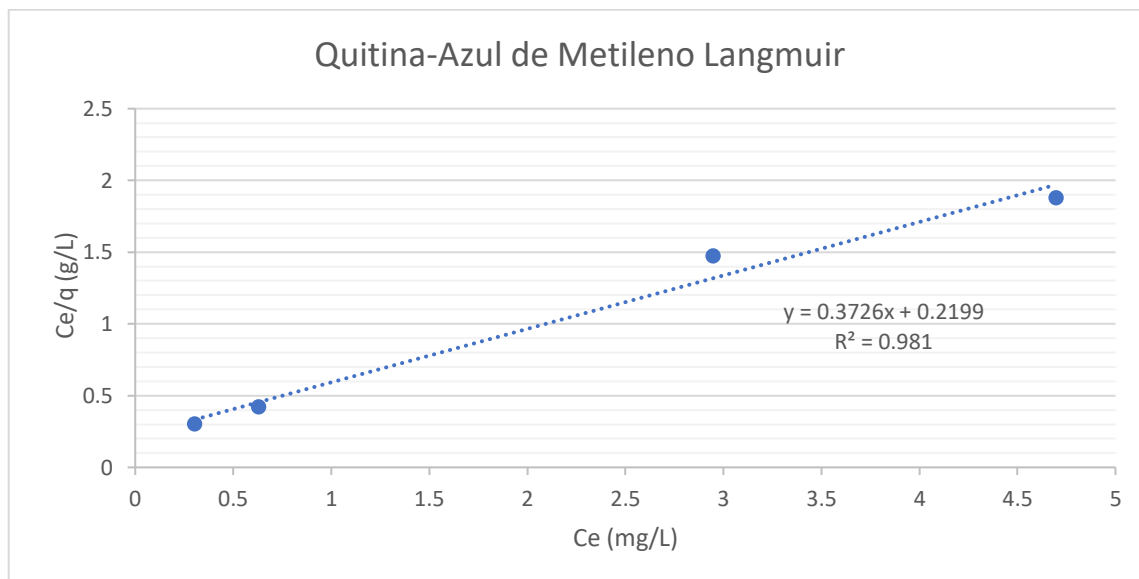
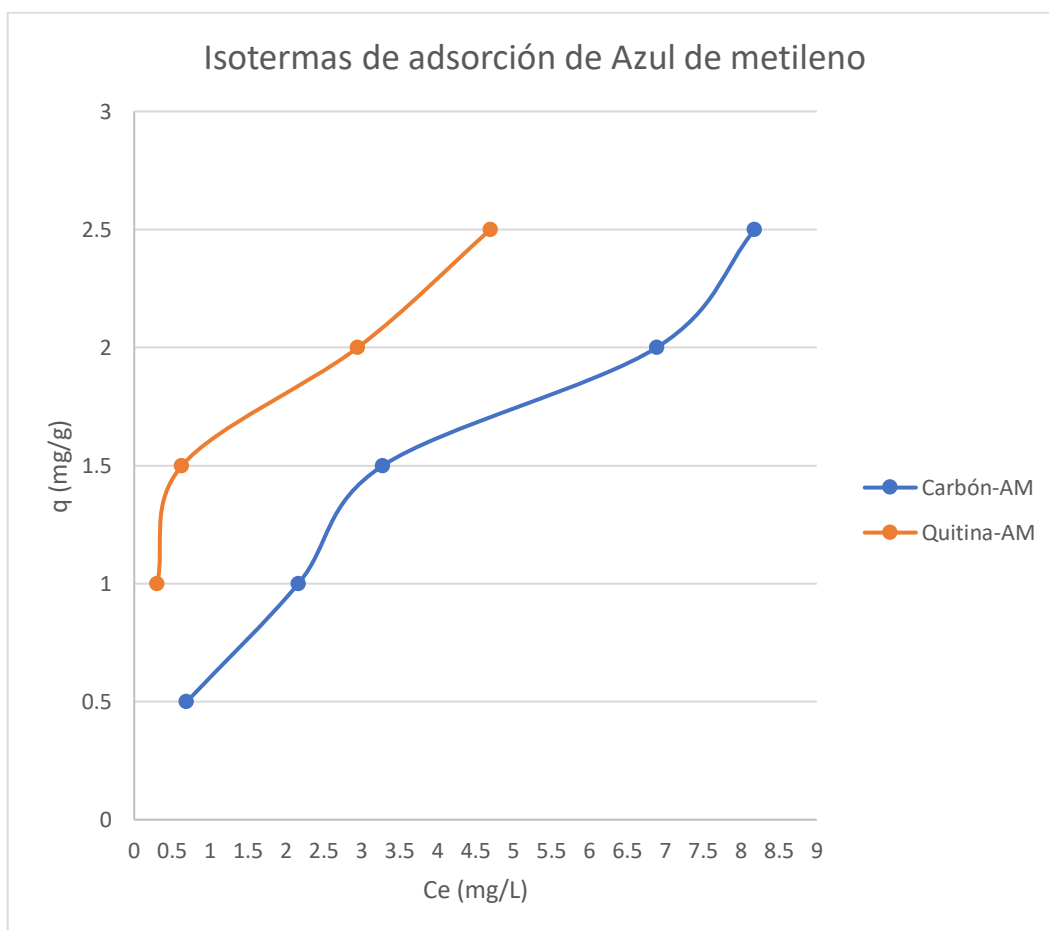
Figura 29. Ajuste con el modelo de Langmuir de Azul de metileno - Quitina**Figura 30.** Isotermas de Azul de metileno

Tabla 24. Datos experimentación batch Cadmio - Carbón

Cadmio-Carbón			
Concentración inicial (Co) (ppm)	Concentración equilibrio (Ce) (ppm)	%Remoción	q (mg/g)
2	0,09	95,5	0,5946
4	0,244	93,9	0,58536
6	0,366	93,9	0,57804
8	0,521	93,4875	0,56874
10	0,654	93,46	0,56076
		94,0495	

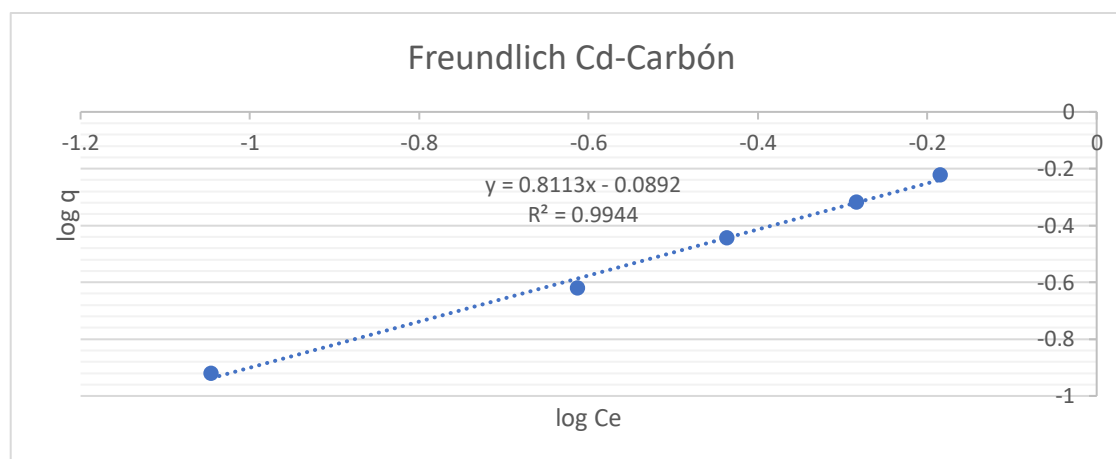
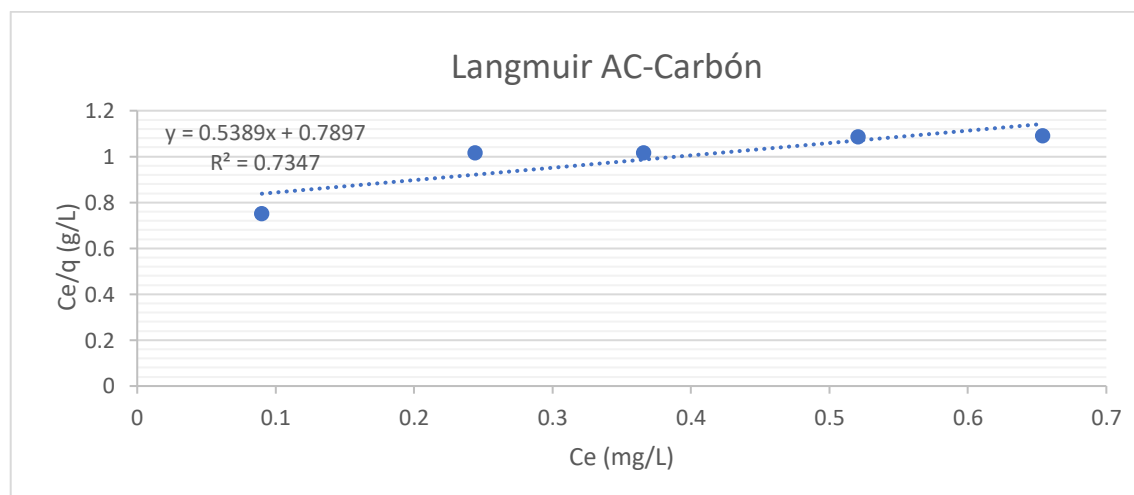
Figura 31. Ajuste con el modelo de Freundlich de Cadmio-Carbón**Figura 32.** Ajuste con el modelo de Langmuir de Cadmio-Carbón

Tabla 25. Datos experimentación batch Cadmio - Zeolita

Cadmio-Zeolita			
Concentración inicial (Co) (ppm)	Concentración equilibrio (Ce) (ppm)	%Remoción	q (mg/g)
2	0,001	99,95	0,59994
4	0,009	99,775	0,59946
6	0,014	99,76666667	0,59916
8	0,073	99,0875	0,59562
10	0,141	98,59	0,59154
		99,43383333	

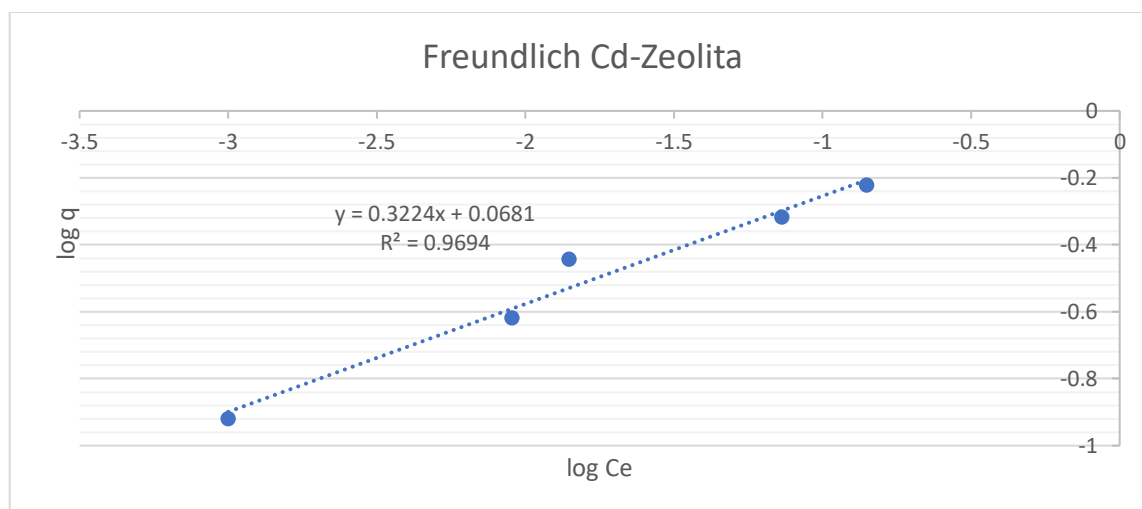
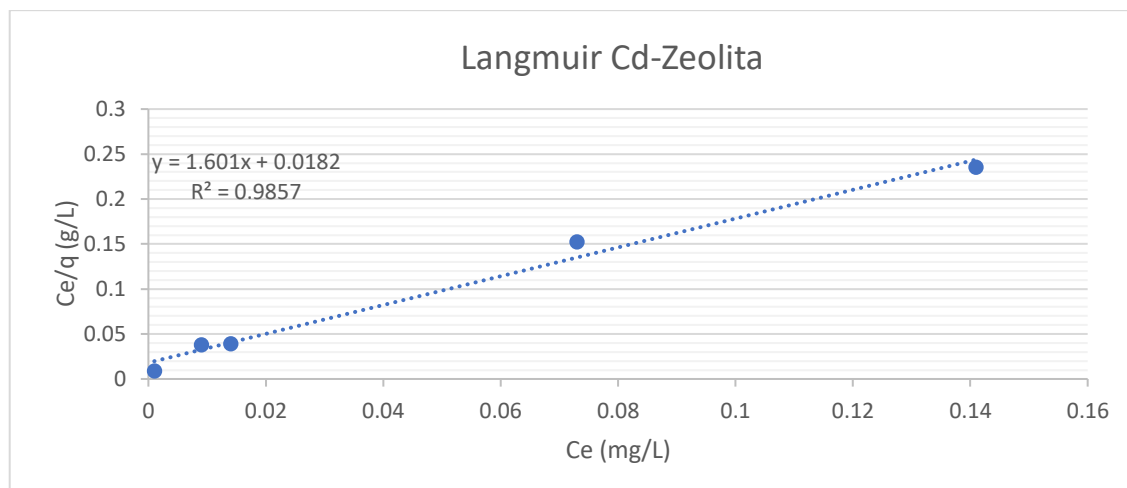
Figura 33. Ajuste con el modelo de Freundlich de Cadmio-Zeolita**Figura 34.** Ajuste con el modelo de Langmuir de Cadmio-Zeolita

Tabla 26. Datos experimentación batch Cadmio - Quitina

Cadmio-Quitina			
Concentración inicial (Co) (ppm)	Concentración equilibrio (Ce) (ppm)	%Remoción	q (mg/g)
2	0,010	99,5	0,5994
4	0,015	99,625	0,5991
6	0,021	99,65	0,59874
8	0,051	99,3625	0,59694
10	0,096	99,04	0,59424
		99,4355	

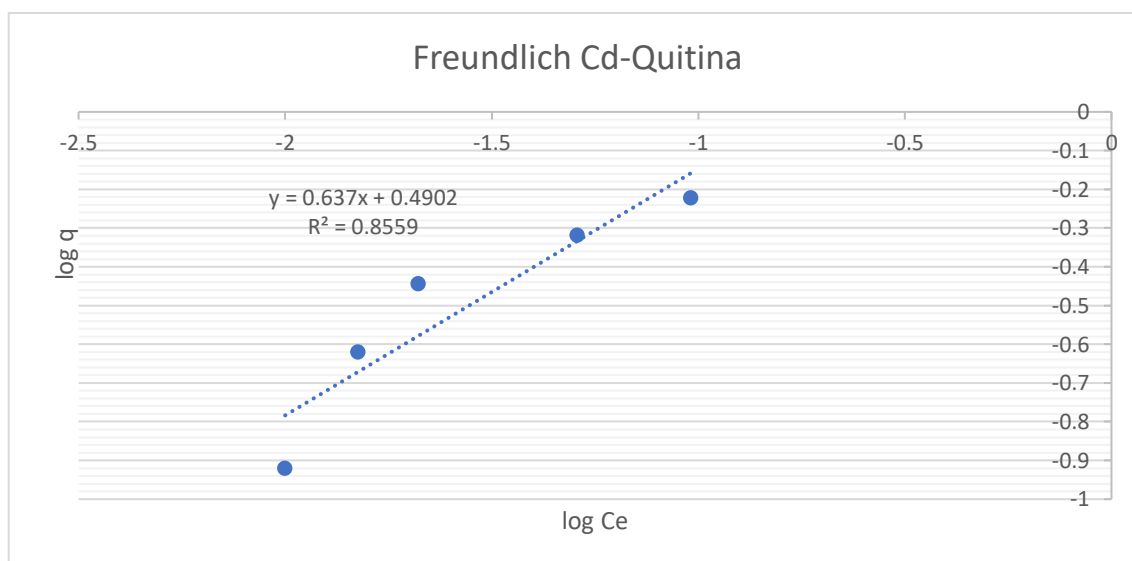
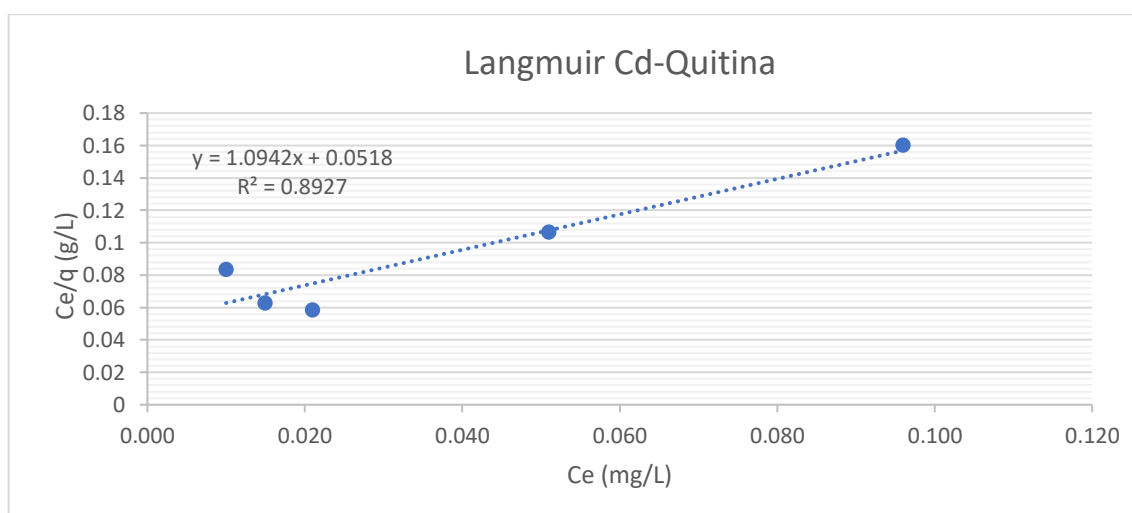
Figura 35. Ajuste con el modelo de Freundlich de Cadmio-Quitina**Figura 36.** Ajuste con el modelo de Langmuir de Cadmio-Quitina

Tabla 27. Datos experimentación batch Pesticida - Carbón

Pesticida-Carbón				
Concentración (mg/L)	Masa (mg)	q (mg/g)	Ce (mg/L)	Porcentaje de remoción
400	10	20	57,31	85,6725
600	15	30	59,42	90,0966667
1000	25	50	64,59	93,541
				89,7700556

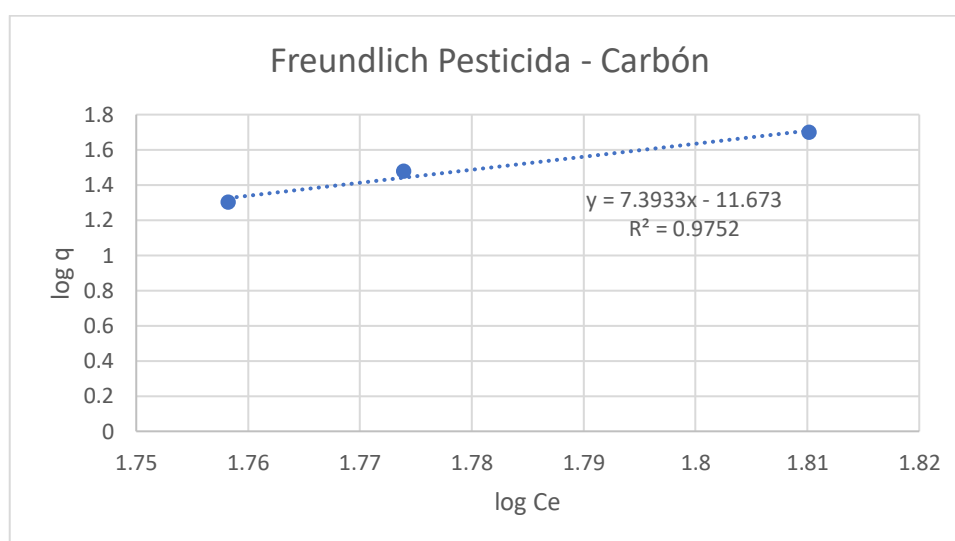
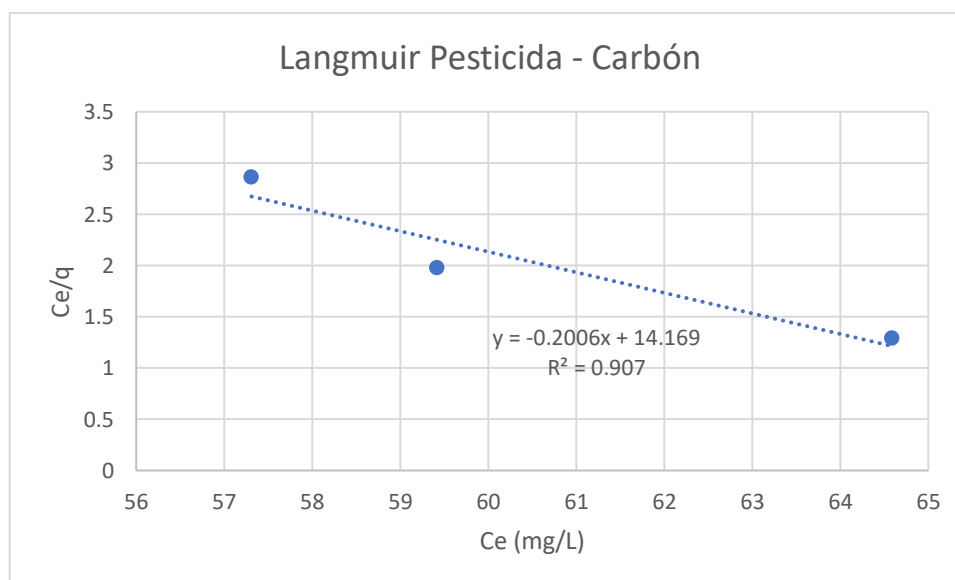
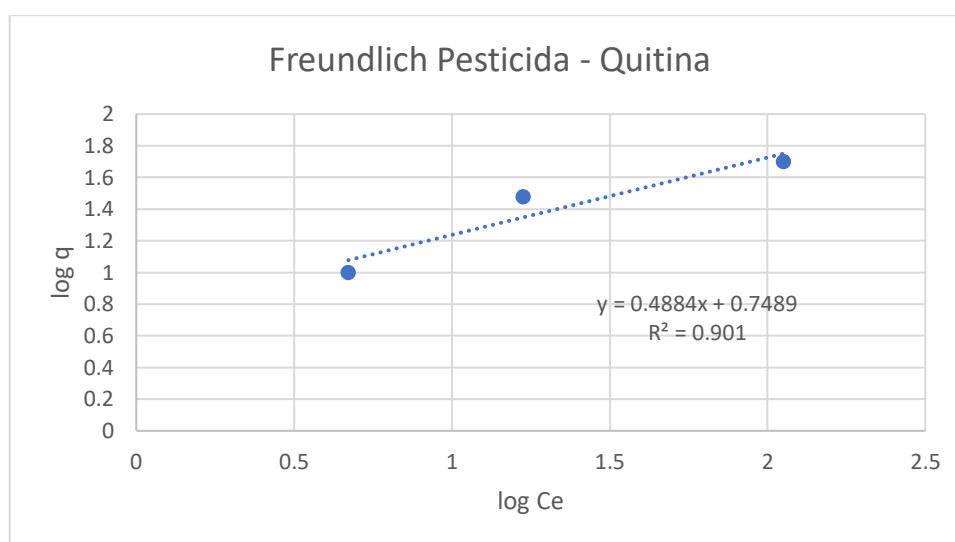
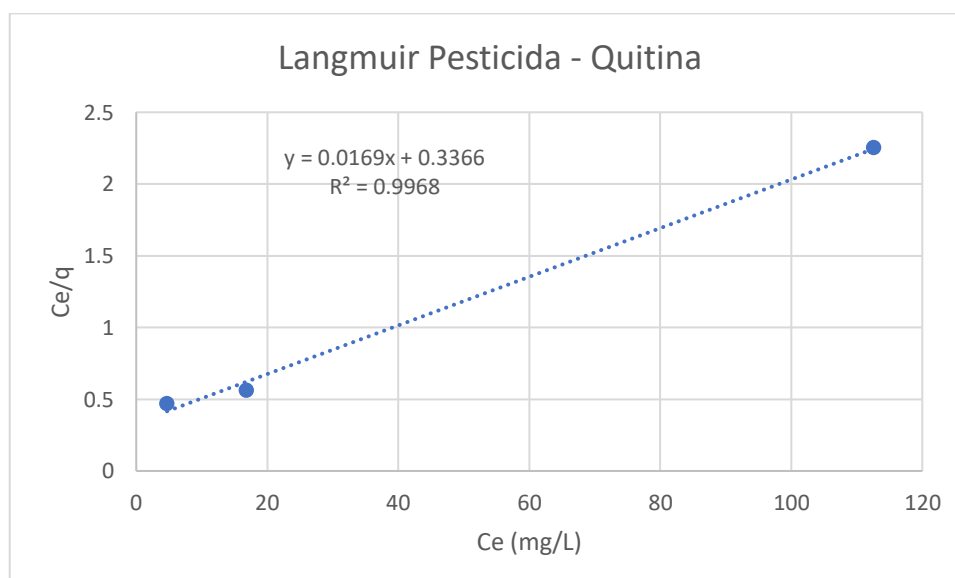
Figura 37. Ajuste con el modelo de Freundlich de Pesticida-Carbón**Figura 38.** Ajuste con el modelo de Langmuir de Pesticida-Carbón

Tabla 28. Datos experimentación batch Pesticida - carbón

Pesticida-Quitina				
Concentración (mg/L)	Masa (mg)	q (mg/g)	Ce (mg/L)	Porcentaje de remoción
200	5	10	4,697	97,6515
600	15	30	16,866	97,189
1000	25	50	112,588	88,7412
				94,527233

Figura 39. Ajuste con el modelo de Freundlich de Pesticida-Quitina**Figura 40.** Ajuste con el modelo de Langmuir de Pesticida-Quitina

APÉNDICE C

C.1. CURVAS DE CALIBRACIÓN EMPLEADAS

Figura 41. Curva de calibración de Azul de metileno del equipo Thermo Scientific® Spectronic 200

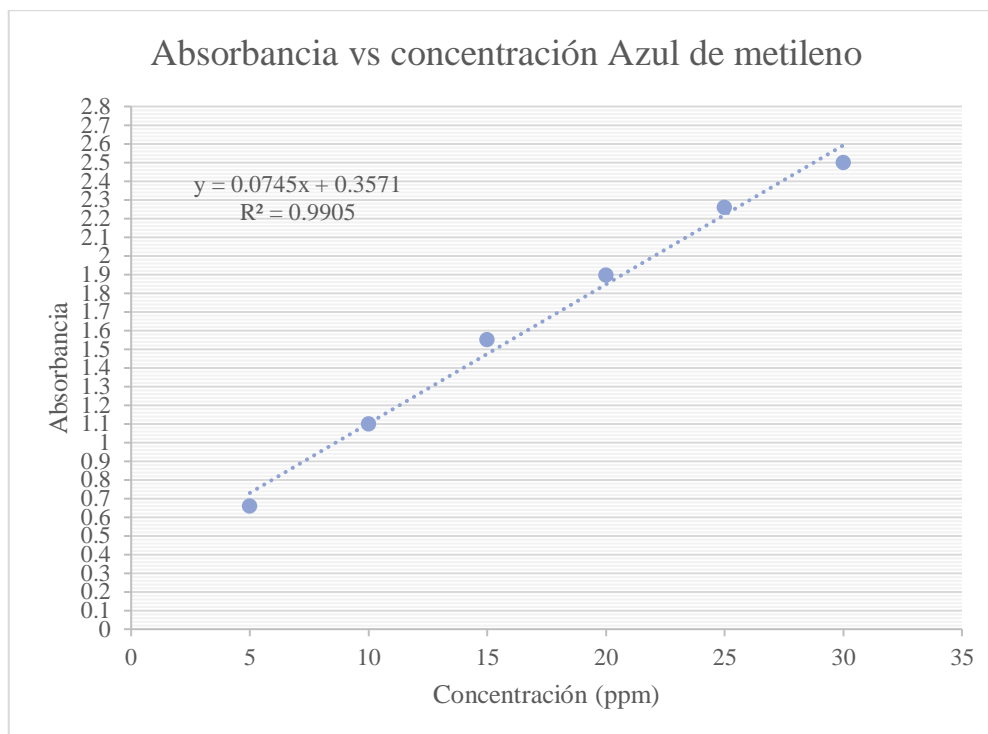
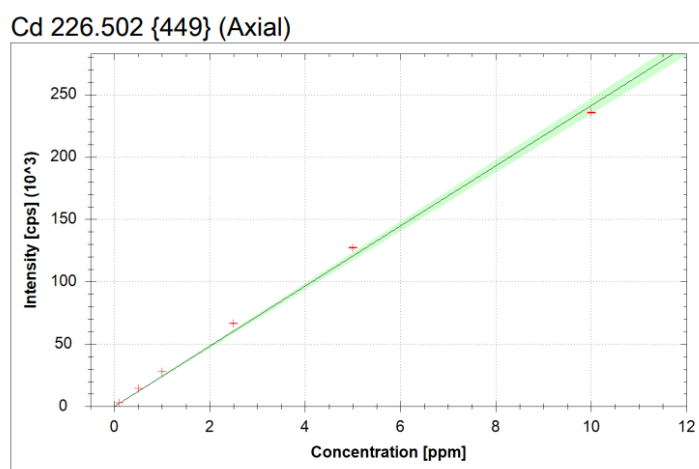


Figura 42. Curva de calibración de Cadmio del equipo Thermo Scientific® iCAP 7000 SERIES



$$f(x) = 24099.1078 \cdot x + 16.8178$$

$$R^2 = 0.9970$$

$$\text{BEC} = 0.001 \text{ ppm}$$

$$\text{LoD} = 0.0003 \text{ ppm}$$

Figura 43. Curva de calibración a partir de la mezcla de contaminantes: Azul de metileno

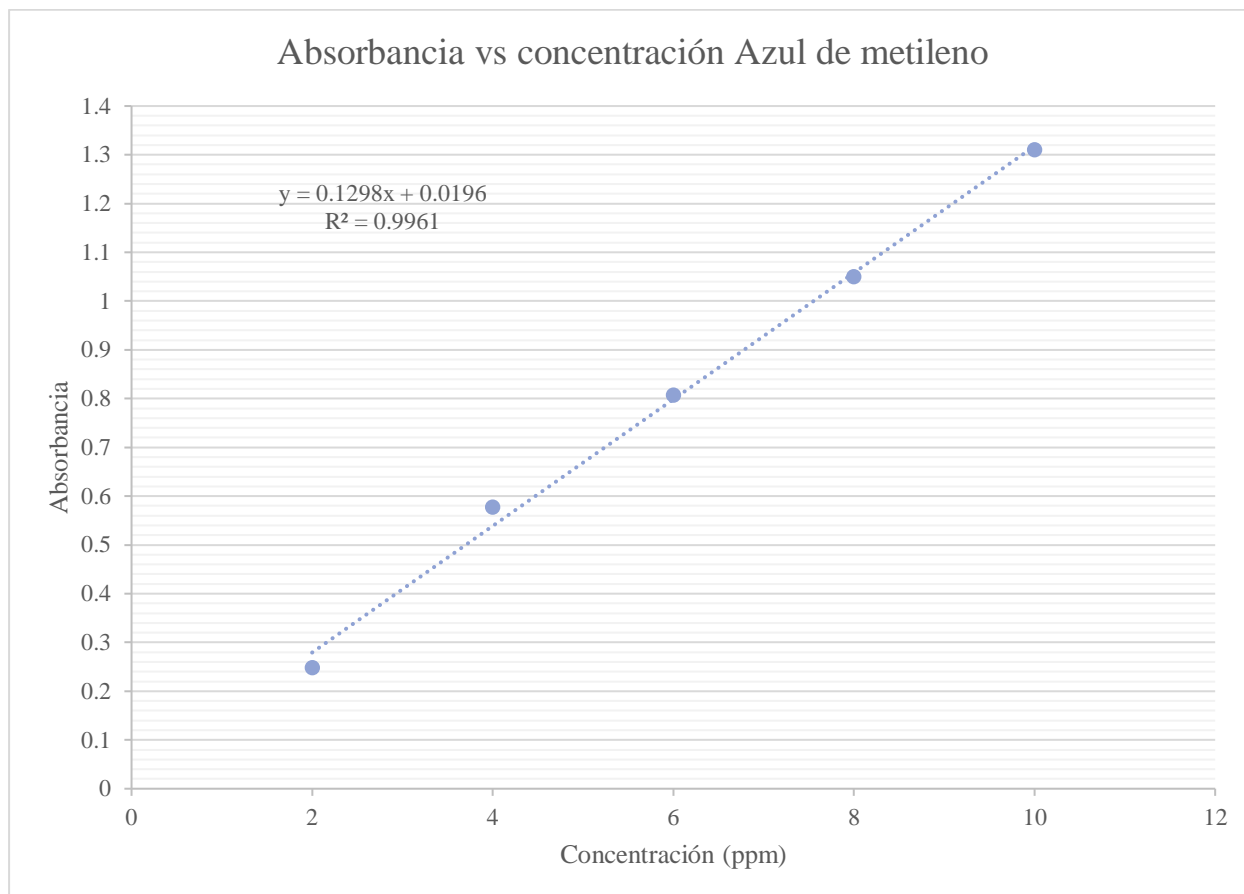


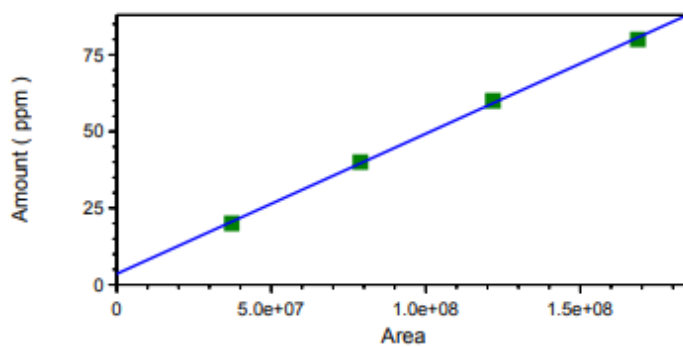
Figura 44. Curva de calibración a partir de la mezcla de contaminantes: Clorotalonil

Fit Type: Linear

$$y = 4.57025e-007x + 3.55308$$

Goodness of fit (r^2): 0.999222

Peak: CLOROTALONILO -- ESTD -- TRACE GC-ECD



	Level 1	Level 2	Level 3	Level 4	Level 5
Amount	20	40	60	80	100
Area	37235169	78835441	121760130	168684259	
RF	5.371266073 74872e-007	5.07386011831 912e-007	4.927721414226 48e-007	4.742588340741 38e-007	

APÉNDICE D

D.1. RESULTADOS DE ADSORCIÓN EN COLUMNAS: CADMIO

Tabla 29. *Datos experimentación curva de ruptura Cadmio-Carbón*

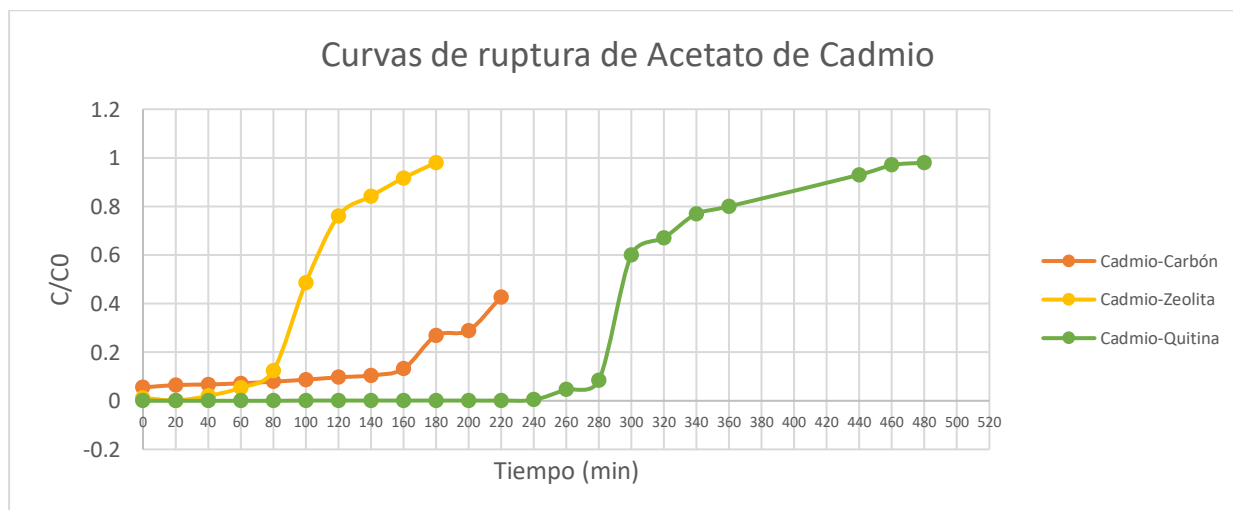
Cadmio-Carbón		
Concentración (ppm)	Tiempo (min)	C/C ₀
0,547	0	0,0547
0,648	20	0,0648
0,671	40	0,0671
0,720	60	0,072
0,788	80	0,0788
0,870	100	0,087
0,967	120	0,0967
1,046	140	0,1046
1,315	160	0,1315
2,682	180	0,2682
2,893	200	0,2893
4,270	220	0,427

Tabla 30. *Datos experimentación curva de ruptura Cadmio-Zeolita*

Cadmio-Zeolita		
Concentración (ppm)	Tiempo (min)	C/C ₀
0,062	0	0,0124
0,008	20	0,0016
0,101	40	0,0202
0,27	60	0,054
0,62	80	0,124
2,424	100	0,4848
3,799	120	0,7598
4,208	140	0,8416
4,585	160	0,917
4,899	180	0,9798

Tabla 31. Datos experimentación curva de ruptura Cadmio-Quitina

Cadmio-Quitina		
Concentración (ppm)	Tiempo (min)	C/C ₀
0	0	0
0	20	0
0	40	0
0	60	0
0	80	0
0,001	100	0,001
0,001	120	0,001
0,001	140	0,001
0,001	160	0,001
0,001	180	0,001
0,001	200	0,001
0,001	220	0,001
0,004	240	0,004
0,046	260	0,046
0,084	280	0,084
0,6	300	0,6
0,67	320	0,67
0,77	340	0,77
0,8	360	0,8
0,93	440	0,93
0,97	460	0,97
0,98	480	0,98

Figura 45. Curvas de ruptura de los adsorbentes con Cadmio

D.2. RESULTADOS DE ADSORCIÓN EN COLUMNAS: CLOROTALONIL

Tabla 32. *Datos experimentación curva de ruptura Pesticida-Carbón*

Pesticida-Carbón		
Concentración (ppm)	Tiempo (min)	C/C₀
0	0	0
53,717	20	0,053717
137,96	40	0,13796
183,188	100	0,183188
222,095	140	0,222095
231,578	180	0,231578

Tabla 33. *Datos experimentación curva de ruptura Pesticida-Quitina*

Pesticida-Quitina		
Concentración (ppm)	Tiempo (min)	C/C₀
0	0	0
55,19	30	0,05519
55,66	70	0,05566
57,64	130	0,05764
63,77	170	0,06377

Figura 46. Curvas de ruptura de los adsorbentes con Pesticida

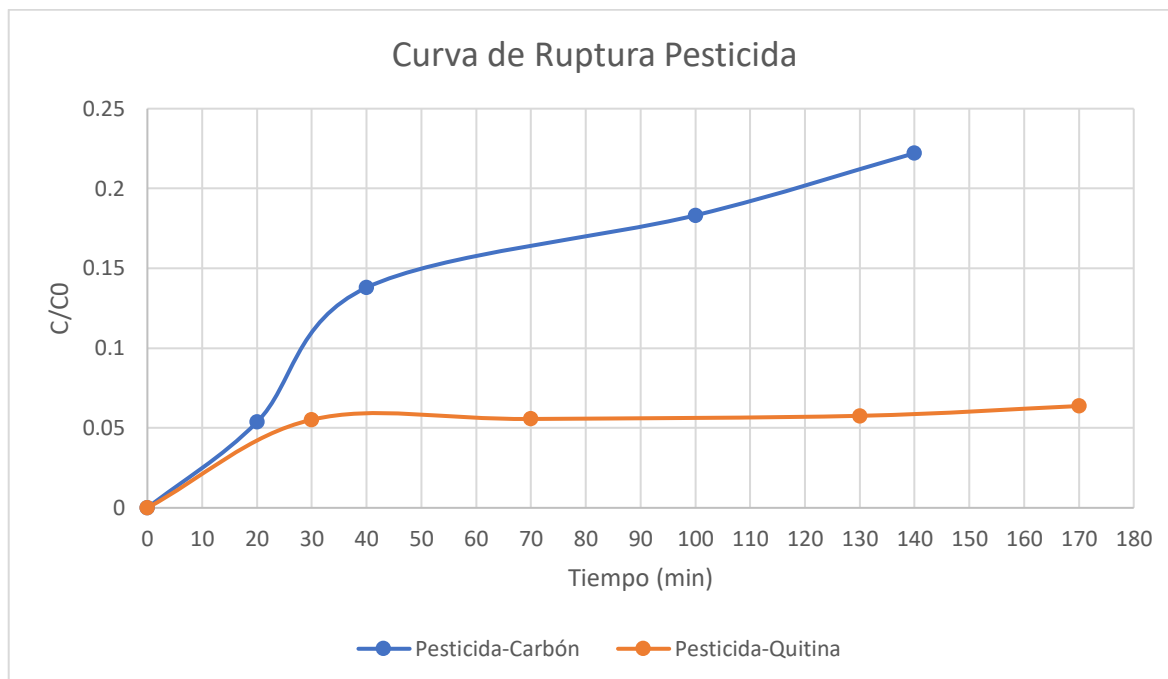


Tabla 34. Datos de la columna 1 de matriz real con pesticida

Columna 1- Matriz real		
Concentración equilibrio (Ce) (ppm)	Tiempo estimado (min)	Porcentaje de remoción
0	0	100,000
9,301	13	95,350
11,097	27	94,452
11,687	40	94,157
12,624	53	93,688
13,693	67	93,154
Porcentaje de remoción promedio		95,133167

Tabla 35. *Datos de la columna 2 de matriz real con pesticida*

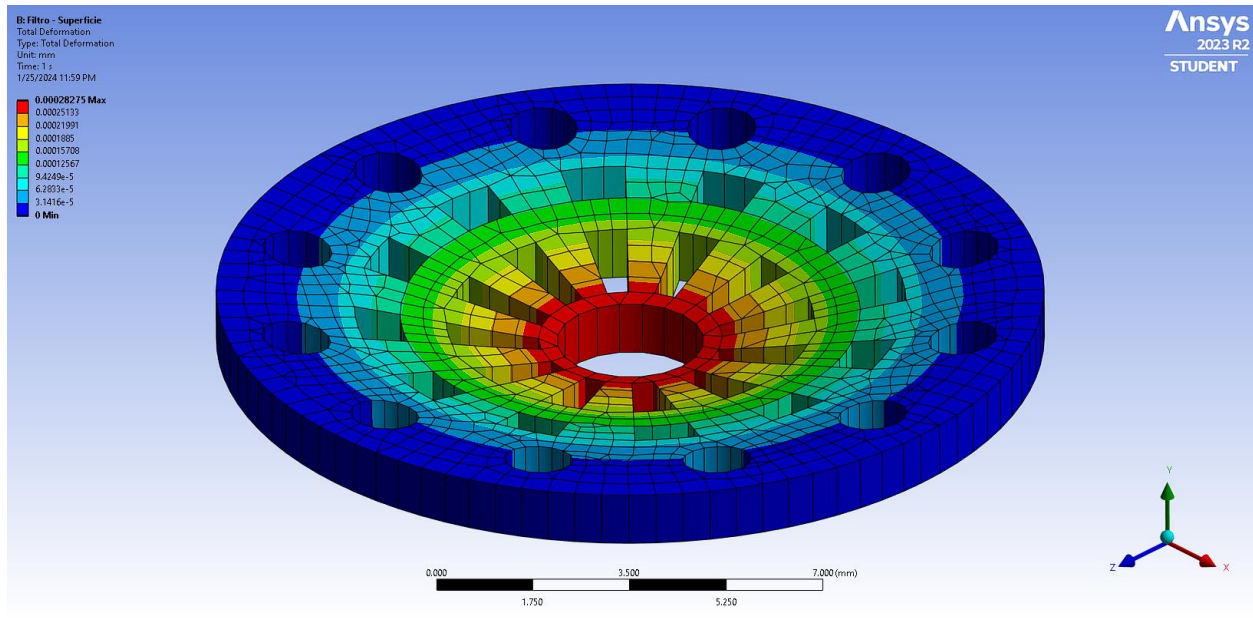
Columna 2 - Matriz real		
Concentración equilibrio (Ce) (ppm)	Tiempo estimado (min)	Porcentaje de remoción
0	0	100,000
38,756	13	80,622
39,521	27	80,240
42,152	40	78,924
42,987	53	78,507
44,235	67	77,883
Porcentaje de remoción promedio		82,69575

APÉNDICE E

E.1. RESULTADOS EN ANSYS

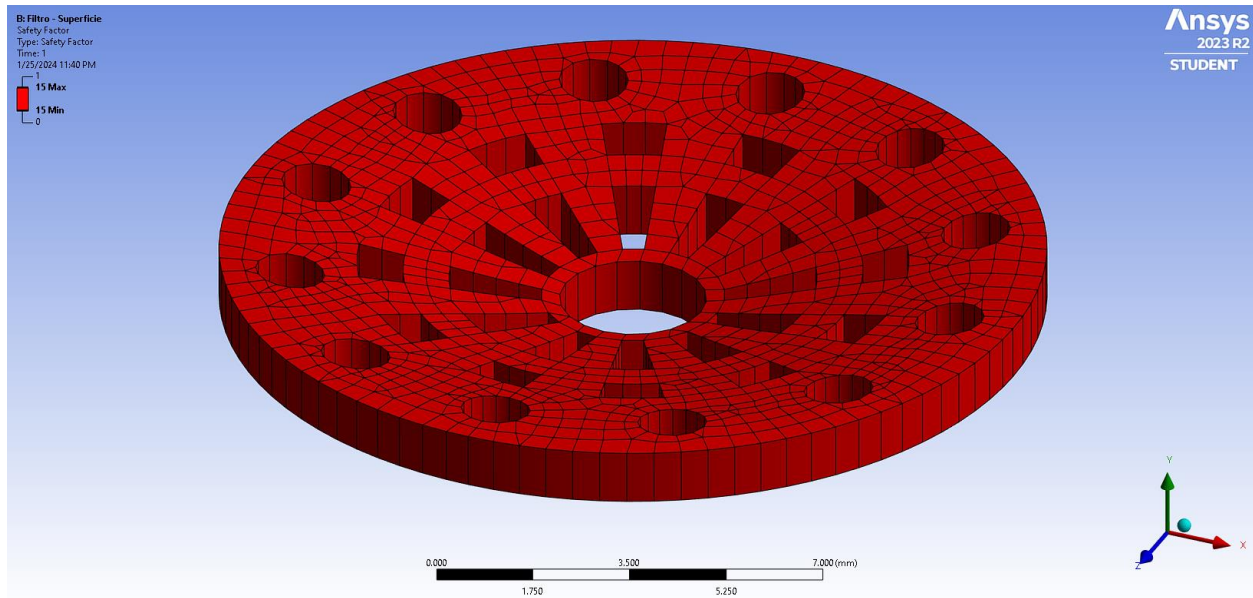
Entre los resultados más destacados, se observa en la Figura 47 una deformación máxima de 0.00028 mm, prácticamente insignificante.

Figura 47. Deformación total del filtro obtenida de análisis FEM



Adicionalmente, la Figura 48 presenta un factor de seguridad de 15 unidades para el filtro propuesto de material plástico PET estándar; indicando un sobredimensionamiento considerable a un espesor de 2 mm.

Figura 48. Factor de seguridad obtenido de la herramienta de esfuerzos utilizando FEM



Los resultados obtenidos demuestran que el filtro diseñado, el cual representa el componente crítico debido a su gran cantidad de concentradores de esfuerzos, puede resistir sin problemas las presiones internas de flujo y el peso de los demás adsorbentes a pesar de estar sometido a la mayor cantidad de tensiones dentro del ensamble.

E.2. MODELADO EN ANSYS

Se empezó modelando el sólido por analizar en el entorno de INVENTOR y posteriormente, fue exportado en formato .STP a la interfaz del espacio de trabajo en ANSYS. Estos pasos son visualizados en la Figura 49 y Figura 50.

Figura 49. Modelado del sólido en Autodesk INVENTOR

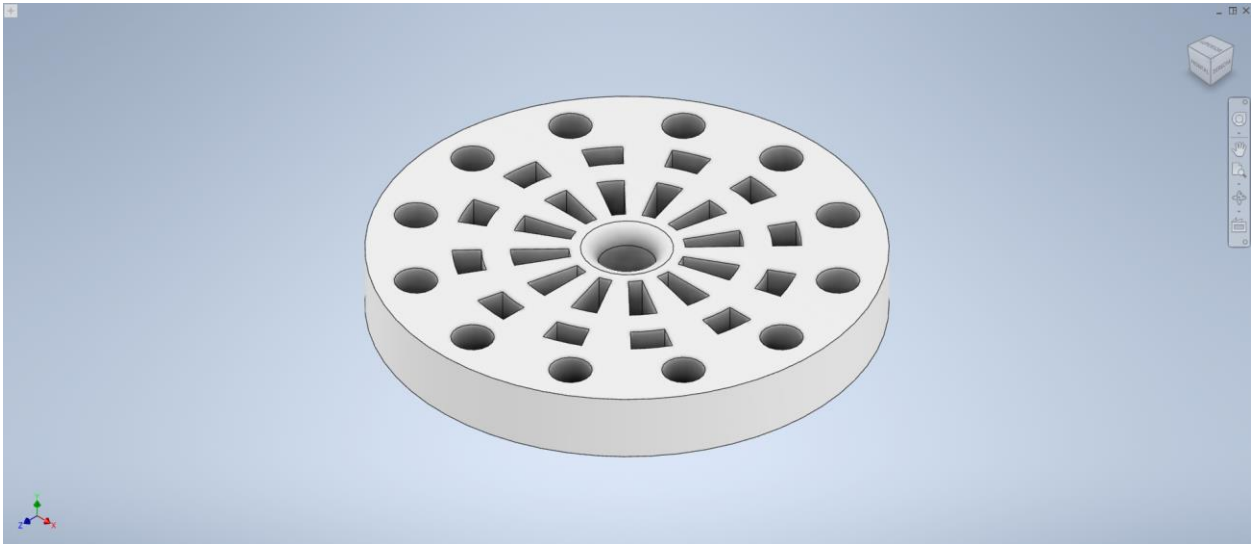
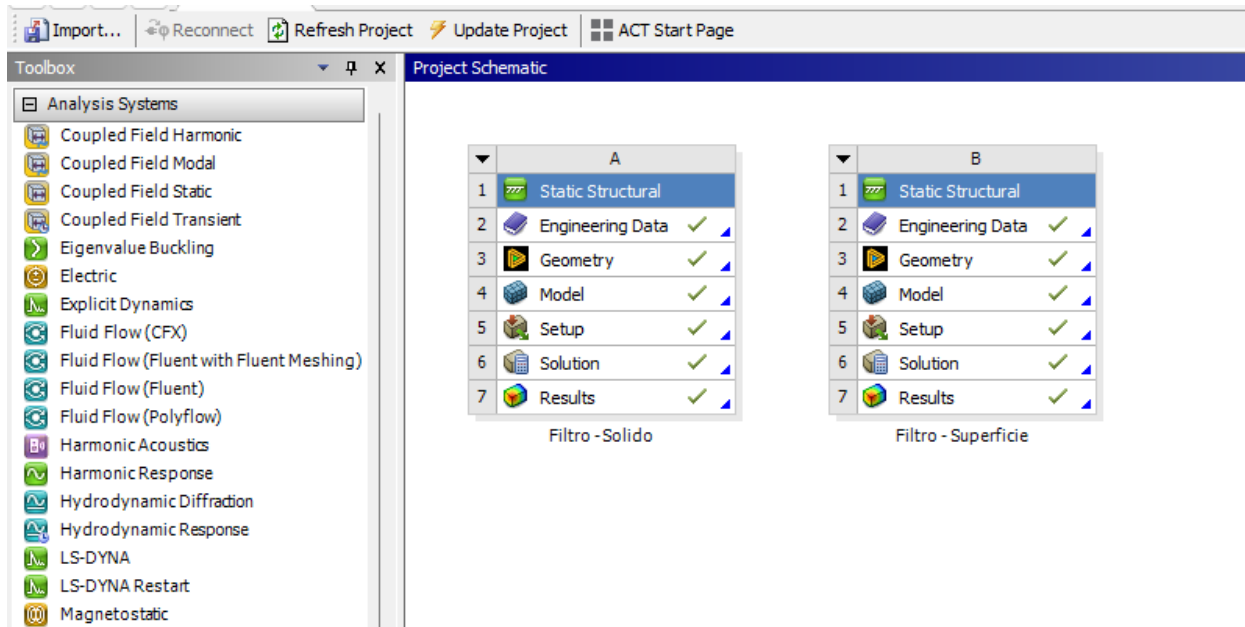


Figura 50. Entorno de trabajo en ANSYS WORKBENCH



El siguiente paso fue configurar las condiciones de frontera utilizando la herramienta de MECHANICAL dentro del entorno de estudio STATIC STRUCTURAL. Para ello fue esencial asignar el material de trabajo, luego realizar el mallado del sólido utilizando tanto métodos MULTIZONE agregando elementos prismáticos triangulares y cuadráticos de orden dos como SIZING con el propósito de aumentar el número de elementos en los contornos de las circunferencias las cuales son nuestras regiones críticas de interés. La Figura 51 presenta el sólido mallado y la Figura 52 la calidad de elementos obtenidas que en promedio es de 0.85.

Figura 51. Mallado del sólido utilizando elementos prismáticos

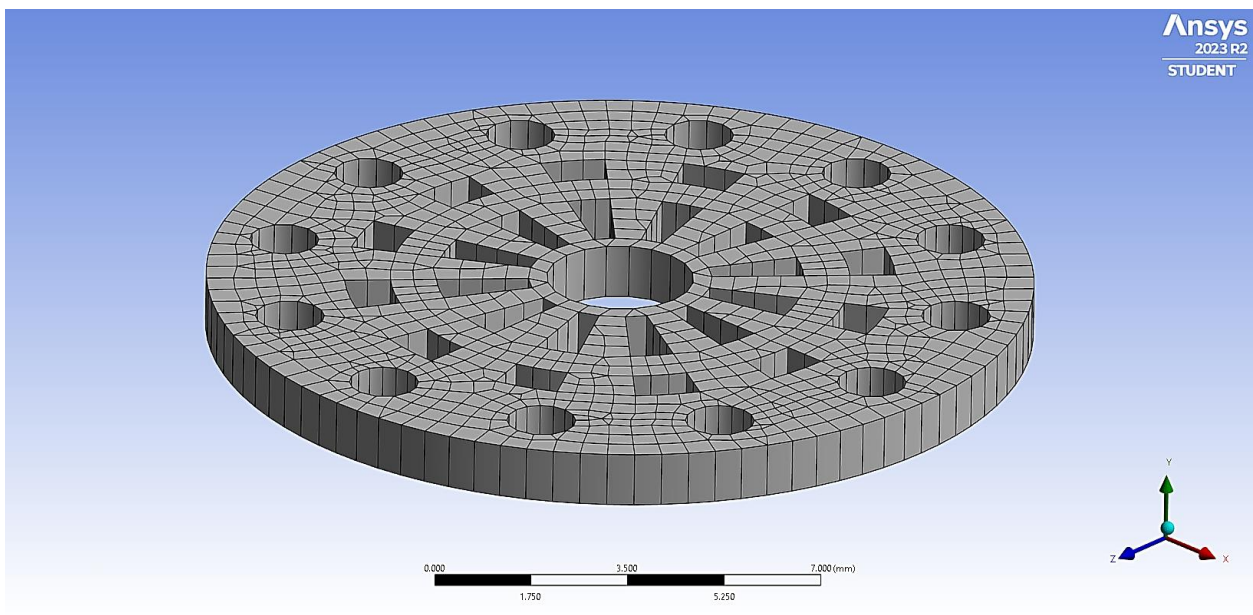
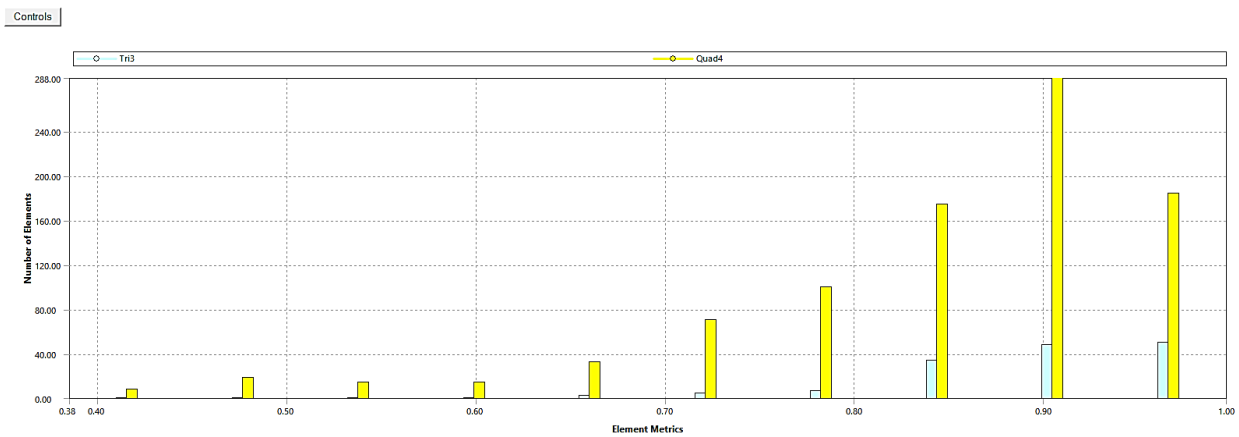
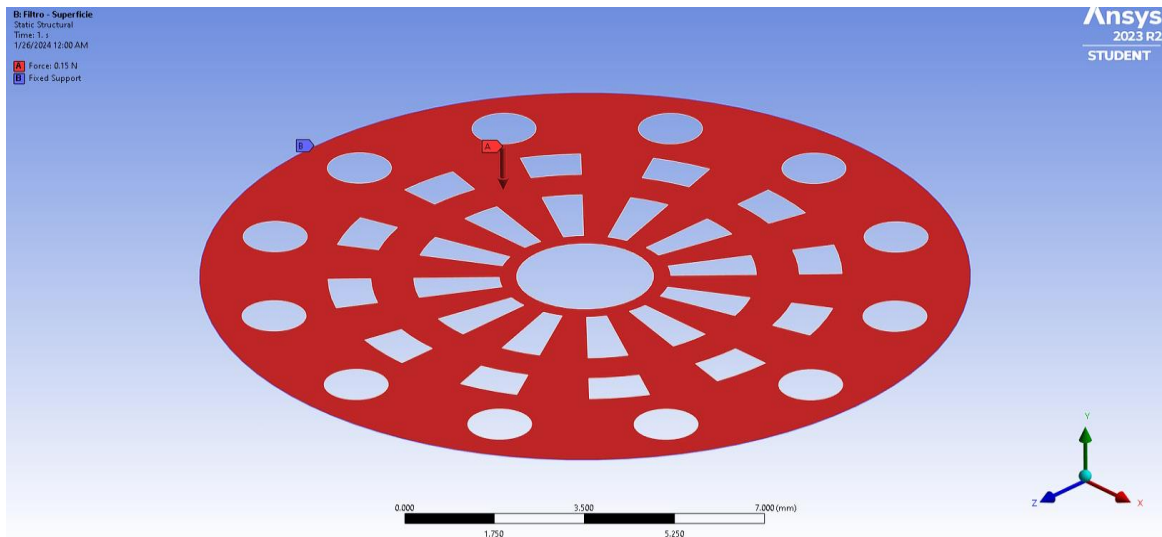


Figura 52. Calidad de elementos utilizados para el mallado



Luego, se definió la física del problema para las iteraciones. Para ello se asignó una restricción de movimiento en el borde del filtro y la asignación de una fuerza distribuida en toda la superficie superior del sólido, el cual simularía un empotramiento de las paredes y el peso de todos los elementos como el resto de filtros y adsorbentes respectivamente. La Figura 53 ilustra estas asignaciones.

Figura 53. Asignación de condiciones de frontera en la superficie



Posteriormente, los parámetros Total Deformation, Equivalent Elastic Strain, Equivalent Stress y Safety Factor fueron calculados utilizando la ventana Solution dentro del editor de propiedades de la herramienta MECHANICAL. Los resultados son presentados a continuación en las Figuras Figura 54, Figura 55, Figura 56 y Figura 57.

Figura 54. Deformación total resultante en el filtro

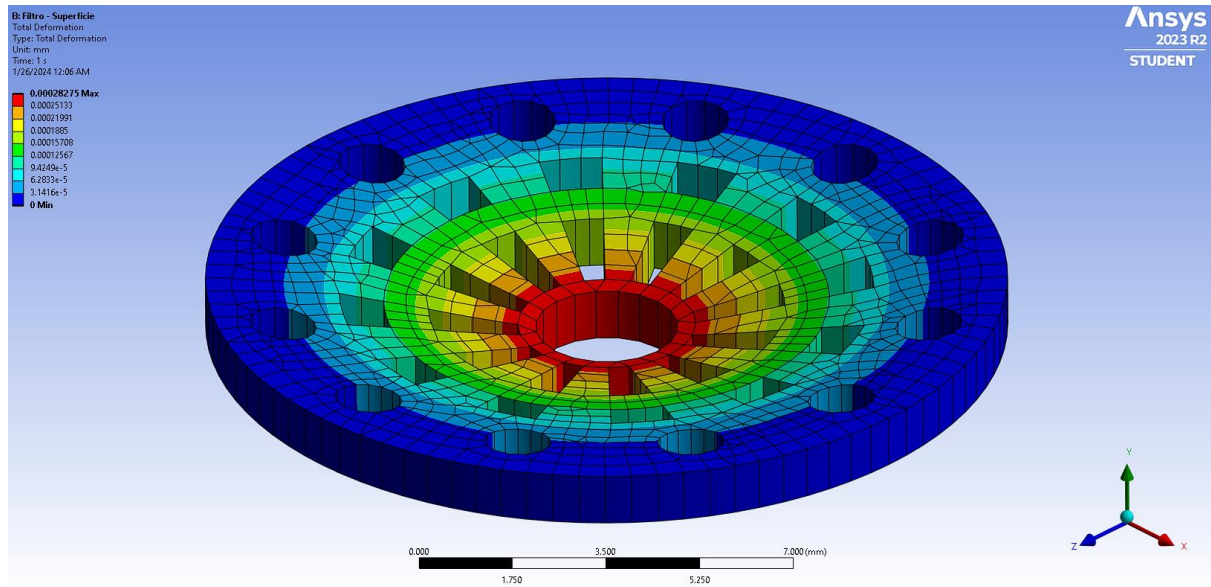


Figura 55. Deformación unitaria equivalente en el filtro

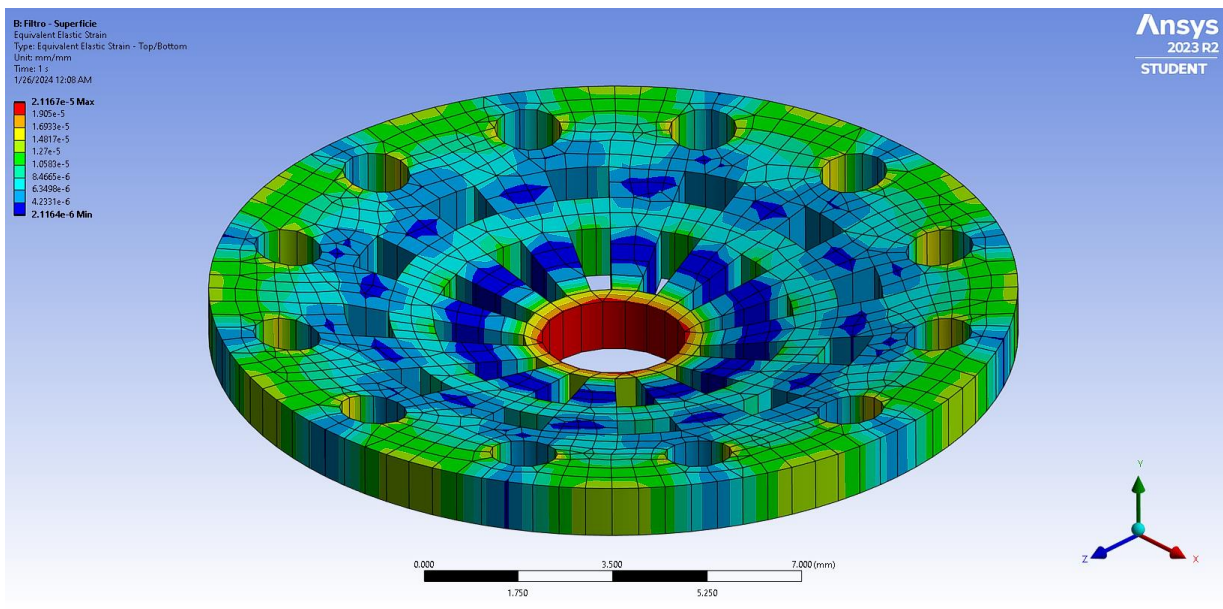
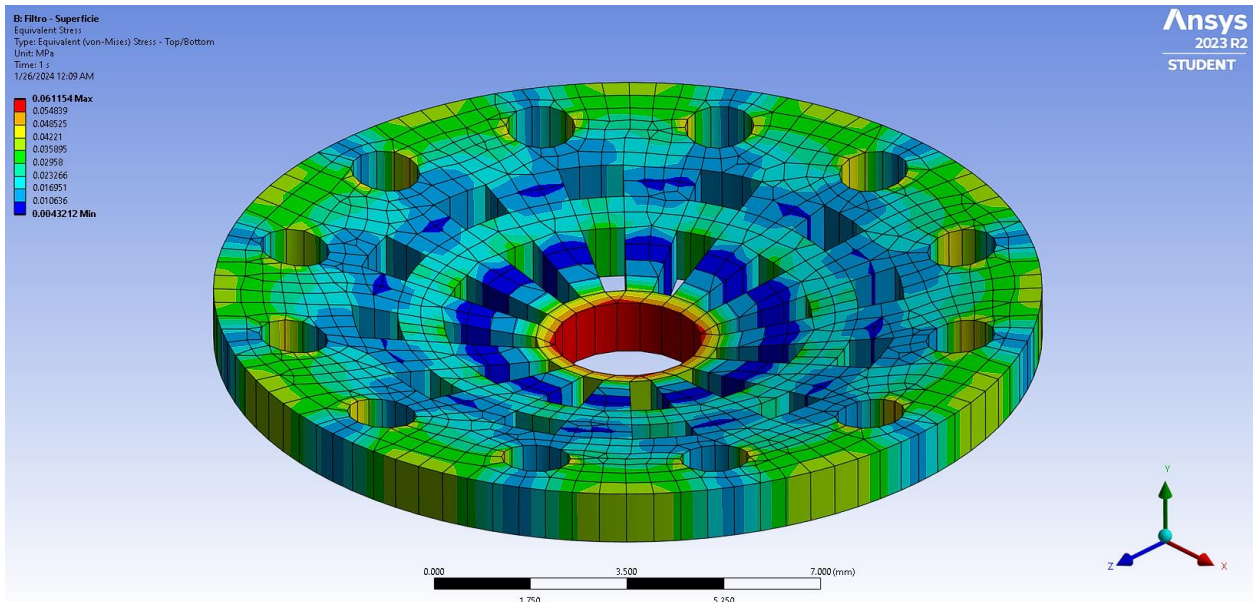


Figura 56. Distribución de esfuerzos a lo largo del filtro**Figura 57.** Factor de seguridad en el filtro