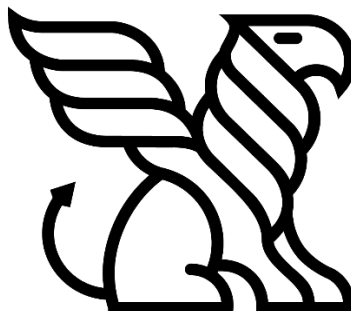


**EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE UN FILTRO A ESCALA PILOTO CON PLUMAS DE
POLLO PARA LA REMOCIÓN DE HIDROCARBUROS**



Uniautónoma
DEL CAUCA
Vigilado Mineducación

Julian Andrés Martínez España

Corporación Universitaria Autónoma del Cauca

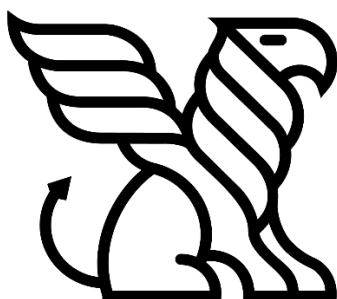
Facultad de Ingeniería y Ciencias Naturales

Programa de Ingeniería Ambiental y Sanitaria

Popayán, Cauca

2025

**EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE UN FILTRO A ESCALA PILOTO CON PLUMAS DE
POLLO PARA LA REMOCIÓN DE HIDROCARBUROS**



Uniautónoma
DEL CAUCA
Vigilado Mineducación

Julian Andres Martinez España

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Ambiental y Sanitario

Director:

Químico. Ph.D. Cesar Fernandez Morante

Codirector:

Ing. MSc(c) Edwin Fernando Sierra Gaviria

Corporación Universitaria Autónoma del Cauca

Facultad de Ingeniería y Ciencias Naturales

Programa de Ingeniería Ambiental y Sanitaria

Popayán, Cauca

2025

Nota de aceptación

Hacemos constar que el presente trabajo de grado titulado "***Evaluación del potencial de un filtro a escala piloto con plumas de pollo para la remoción de hidrocarburos***)." ha sido evaluado y aprobado por la Corporación Universitaria Autónoma del Cauca, como requisito para optar por el título de Ingeniero Ambiental y Sanitario.



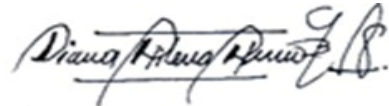
Edwin Fernando Sierra
Gaviria Codirector



Cesar Fernández Morantes
Director



Jurado



Jurado

Octubre del 2025

DEDICATORIA

Dedico este trabajo con profundo agradecimiento a Dios, por darme la fortaleza, la sabiduría y la paciencia necesarias para culminar esta etapa.

A mis padres, por su amor incondicional, apoyo constante y por ser mi mayor ejemplo de esfuerzo y dedicación. Sin ustedes, nada de esto habría sido posible.

A mi familia y amigos, por creer en mí incluso en los momentos en los que yo dudé. Gracias por sus palabras de aliento y compañía a lo largo del camino.

Y a quienes, de una u otra manera, me inspiraron a seguir adelante, esta meta también es de ustedes.

Julian Andrés Martínez España

Agradecimientos

En primer lugar, doy gracias a Dios, por ser mi guía, darme fortaleza en todo cada momento de debilidad.

Gracias a mis padres y hermano, les agradezco profundamente por su apoyo incondicional, por sus enseñanzas y por ser mi pilar en los momentos más difíciles. Cada sacrificio, palabra de aliento y muestra de su amor ha sido fundamental en este proceso. Enseñando el valor de la perseverancia para lograr cada propósito que se proponga.

Un agradecimiento muy especial a mis profesores Edwin Sierra y Cesar Fernández, por su invaluable ayuda, dedicación y por creer en mí, cada palabra de apoyo, orientación y compañía han marcado algo significativo en mi vida, tanto personal como profesionalmente.

Por último, a cada una de las personas que de una u otra forma ha contribuido a mi crecimiento, muchas gracias.

Tabla de contenido

Resumen.....	12
Abstract	13
Introducción	14
Capítulo 1. Problema de investigación	15
1.1 Planteamiento del problema.....	15
1.2 Justificación	16
1.3 Objetivos.....	17
1.3.1 Objetivo general.....	17
1.3.2 Objetivos específicos	17
Capítulo 2: Marco teórico o referentes conceptuales.....	18
2.1 Antecedentes	18
2.2 Bases teóricas.....	20
2.2.1. Plumas de pollo.....	20
2.2.2 Adsorción	20
2.2.3 Cinética	20
2.2.4. Isotermas de adsorción.....	21
2.3 Bases legales	23
Capítulo 3. Metodología	24
3.1 Fase I: Caracterización de las propiedades fisicoquímicas de las plumas	25
3.1.1 Recolección de muestras y tratamiento previo	25
3.1.2 Humedad de las plumas de pollo	25
3.1.3 Densidad del material.....	26

3.1.4 Composición química de las plumas.....	26
3.1.5 Propiedades fisicoquímicas del hidrocarburo	27
3.2 Fase II: Comportamiento en equilibrio.....	27
3.2.1 Estudios de sorción	27
3.2.2 Isotermas de adsorción.....	28
3.2.3 Freundlich	28
3.2.4 Langmuir.....	28
3.2.5 Sips.....	29
3.2.6 Temkim	29
3.2.2 Estudio cinético.....	30
3.2.3 Ajustes cinéticos	30
3.2.4 Pseudo primer orden	30
3.2.5 Pseudo segundo orden.....	31
3.2.6 Difusión intraparticular	31
3.2.7 Elovich	32
3.3 Fase III: Estimación de la remoción del hidrocarburo usando un filtro.	32
3.3.1 Mapeo sistemático.....	32
3.3.2 Metodología de búsqueda	32
3.4 Pruebas piloto y análisis de resultados.....	34
Capítulo 4. Resultados y Discusión	36
4.1 Caracterización fisicoquímica de las plumas de pollo	36
4.2 Análisis de comportamiento en equilibrio	37
4.2.1 Adsorción.....	37
4.2.2 Estudio de isotermas de adsorción	39
4.2.3 Estudio de cinética	41

4.2.4 Ajustes cinéticos	42
4.3 Estimación de la remoción de crudo de petróleo en un filtro a escala piloto	45
4.3.1 Resultados de la búsqueda documental.....	45
4.3.2 Análisis de la información documental.....	46
4.3.3 Diseño y montaje a escala piloto.....	48
Capítulo 5. Conclusiones y Recomendaciones	52
5.1 Conclusiones	52
5.2 Recomendaciones.....	54

Lista de tablas

Tabla 1. Marco normativo ambiental colombiano	23
Tabla 2. Componentes de la búsqueda documental	33
Tabla 3. Categorías de análisis búsqueda documental	33
Tabla 4. Definición de ecuaciones de búsqueda	34
Tabla 5. Parámetros fisicoquímicos de las plumas	36
Tabla 6. Parámetros de los modelos indicados	40
Tabla 7. Constantes cinéticas y coeficientes de transferencia de masa para la sorción de petróleo en plumas de pollo	43
Tabla 8. Constantes cinéticas	44
Tabla 9. Caudales hallados en la revisión bibliográfica.....	48
Tabla 10. Parámetros del filtro.....	49
Tabla 11. Filtración del crudo	50

Lista de figuras

Figura 1. Esquema metodológico de las fases del proyecto	24
Figura 2. Remoción de petróleo	38
Figura 3. Isoterma de adsorción de petróleo en plumas de pollo	39
Figura 4. Cinética de adsorción de crudo de petróleo con plumas de pollo.....	41
Figura 5. Cinética de Pseudo primer orden figura (A), cinética de Pseudo segundo orden figurB)	42
Figura 6. Modelo de Weber-Morris A, Modelo de Elovich figura B	44
Figura 7. Aplicación de exclusión para las bases de datos	46
Figura 8. Materiales utilizados en la revisión	47
Figura 9. Diagrama del efluente para la remoción de hidrocarburos	48

Lista de anexos

Anexo 1 Peso de las muestras en balanza analítica	62
Anexo 2 Determinación de carbono orgánico por mufla.....	62
Anexo 3 Pruebas en batch en el shaker.....	63

Resumen

En la actualidad los procesos industriales de extracción y transformación del petróleo y sus derivados pueden ocasionar daños ambientales debido a sucesos asociados a derrames en matrices ambientales, como la hídrica, que tiene efectos nocivos para los seres vivos. Estas situaciones reflejan una necesidad en la búsqueda de alternativas tecnológicas que contribuyan a los procesos de remediación para mitigar y restaurar los ecosistemas afectados.

Otra de las problemáticas de gran interés se centra en las grandes cantidades de residuos generados en los procesos industriales. La creciente producción avícola genera una cantidad significativa de residuos orgánicos, como las plumas, que a menudo son dispuestos en rellenos sanitarios. Sin embargo, estos residuos pueden ser valorizados a través de procesos de remediación. Las plumas de pollo, por sus características físicas y químicas, presentan un alto potencial para adsorber hidrocarburos presentes en el agua, esta alternativa no solo contribuye a la limpieza de ambientes contaminados, sino que también promueve una economía circular al transformar un residuo en un recurso valioso, generando beneficios ambientales y económicos.

En este contexto, la presente investigación busca la determinar la capacidad de sorción de crudo mediante un filtro con plumas de pollo. Las isotermas de adsorción en batch mostraron una fuerte interacción entre el adsorbato/adsorbente. Los datos experimentales presentaron un mayor ajuste al modelo de Sips ($R^2 = 0.98$), indicando una alta heterogeneidad del material. La capacidad máxima determinada por el modelo fue de 2236 ± 93 mg/g y un factor de heterogeneidad de 3.5 ± 0.4 . Con base en la revisión bibliográfica y en los estudios de cinética y equilibrio, se diseñó e implementó un filtro a escala a piloto en PVC utilizando barbillas de plumas de pollo como material adsorbente, el cual alcanzó una eficiencia de remoción del 76% de crudo de petróleo.

Los resultados evidencian que las plumas de pollo, residuo de la producción avícola, presenta un gran potencial para la remoción de hidrocarburos, el cual es un contaminante frecuente en algunas fuentes hídricas.

Palabras clave: Hidrocarburos, Filtro, Adsorción, plumas, aprovechamiento de biomateriales biorremediación

Abstract

At present, the industrial processes of extraction and transformation of oil and its derivatives can cause environmental damage due to events associated with spills in environmental matrices, such as water, which have harmful effects on living beings. These situations reflect a need in the search for technological alternatives that contribute to bioremediation processes to mitigate and restore the affected ecosystems.

Another problem of great interest today is the large quantities of waste generated in industrial processes. The growing poultry production generates a significant amount of organic waste, such as feathers, which are often disposed of in landfills. However, these wastes can be valorized through bioremediation processes. Chicken feathers, due to their physical and chemical characteristics, have a high potential to adsorb hydrocarbons present in water; this alternative not only contributes to the cleaning of contaminated environments, but also promotes a circular economy by transforming a waste into a valuable resource, generating environmental and economic benefits.

In this context, the present research aimed to determine the crude oil sorption capacity using a filter packed with chicken feathers. Batch adsorption isotherms revealed strong interactions between adsorbent and adsorbate. Experimental data showed a better fit to the Sips model ($R^2 = 0.98$), indicating high heterogeneity of the material. The maximum adsorption capacity determined by the model was 2236 ± 93 mg/g, with a heterogeneity factor of 3.5 ± 0.4 . Based on the literature review and kinetic and equilibrium studies, a pilot-scale PVC filter was designed and implemented using chicken feather barbules as adsorbent material, achieving a crude oil removal efficiency of 76%.

The results demonstrate that chicken feathers, a residue from poultry production, present great potential for the removal of hydrocarbons, which are frequent contaminants in some water sources.

Key words: Hydrocarbons, Filter, Adsorption, plumes, waste utilization, bioremediation.

Introducción

La economía de numerosos países en todo el mundo se beneficia considerablemente de la exploración, extracción y distribución de petróleo, convirtiéndolas en actividades cruciales para su crecimiento. La actividad del petróleo en la vida cotidiana hace que sea prácticamente imposible para individuos o naciones desenvolverse sin recurrir, directa o indirectamente, a productos derivados del mismo. No obstante, estas operaciones petroleras han dejado una huella negativa en el entorno a lo largo del tiempo. Su legado incluye derrames de crudo, emisión de sustancias nocivas al aire, contaminación de aguas y suelos, así como la desaparición de especies [1].

Esta actividad ha generado un impacto ambiental significativo. Las operaciones petroleras, tanto en tierra como en mar, están asociadas con la emisión de compuestos tóxicos, alteración de ecosistemas y, especialmente, con derrames de crudo que contaminan cuerpos de agua, suelos y costas. Estos eventos ya sean accidentales o resultados de prácticas inadecuadas, han causado una degradación ambiental considerable, afectando la biodiversidad marina, las fuentes de agua potable y la salud humana [2].

A lo largo de las últimas décadas, derrames como el de Exxon Valdez (1989) y otros de menor escala, han evidenciado la fragilidad de los ecosistemas ante este tipo de contaminante. En respuesta se ha llevado a una intensificación en la búsqueda de soluciones innovadoras para mitigar su impacto. El aprovechamiento de residuos de la industria avícola, específicamente las plumas de pollos representan una alternativa prometedora debido a su estructura rica en queratina, un polímero natural con características hidrofóbicas que facilita la adsorción de compuestos orgánicos como los hidrocarburos. Esta alternativa ofrece una solución potencialmente más económica y sostenible al aprovechar un residuo agrícola abundante, reduciendo así el impacto ambiental asociado con su eliminación [3].

Con el desarrollo de este trabajo de investigación se busca ofrecer una nueva tecnología para la remoción de aguas contaminadas con petróleo mediante la utilización de un filtro con plumas de pollo, que se pretende reducir los impactos a través de estudios de adsorción y el diseño de un prototipo a escala piloto funcional.

Capítulo 1. Problema de investigación

1.1 Planteamiento del problema

La contaminación provocada por los derrames de crudo, cada día se vuelven más frecuentes en los diferentes ecosistemas, lo cual genera efectos e impactos negativos al ambiente [4]. Uno de los mayores desastres ambientales provocados por la explosión de la plataforma petrolera Deep water Horizon (DWH) con casi 800 millones de litros de crudo de petróleo derramados, generando que múltiples especies se vieran afectadas y más de 20 millones de hectáreas del Golfo de México quedaran cerradas a la pesca [5].

Colombia es un país que tiene un gran potencial para la explotación de hidrocarburos con yacimientos que cubren aproximadamente el 40% de su superficie. Para su transporte cuenta con una red de oleoductos, los cuales transportan el crudo a las refinerías. Esta red de conducción de hidrocarburos ha sido objeto de atentados, debido a la presencia de conflictos armados en el territorio, lo cual supone un riesgo latente para la contaminación, principalmente del recurso hídrico afectando ecosistemas estratégicos y medios de vida [6].

Por otro lado, la industria avícola en Colombia produce anualmente 1.8 millones de toneladas de carne de pollo, indicadores que generan una preocupación ambiental, puesto que el 39% del total de los residuos pertenecen a plumas, subproducto que en muchas ocasiones es dispuesto sin ningún tipo de tratamiento [7]. Diversos autores han utilizado este residuo para obtener un subproducto como la queratina, sin embargo, tan solo el 70% es aprovechada y el restante es dispuesta en rellenos sanitarios [8].

Este residuo se presenta como una alternativa prometedora para los procesos de remediación, debido a que es un material de bajo costo y que, dada sus propiedades compuestas mayormente por queratina, puede utilizarse para la remoción de hidrocarburos. Esto se convierte en una alternativa para el aprovechamiento de este desecho avícola, reduciendo por un lado la cantidad de material enviado al relleno sanitario y por otro la implementación de tecnologías no convencionales para el tratamiento de hidrocarburos. Por ello es necesario un estudio oportuno que con lleve a la determinación de la capacidad de sorción de las plumas de pollo con respecto al crudo de petróleo.

1.2 Justificación

La contaminación por petróleo es un problema global de gran magnitud que afecta negativamente a los ecosistemas, así como a la salud y economía de las comunidades que viven cerca de áreas contaminadas por derrames. Estos vertidos, sean accidentales o intencionados, causan daños devastadores a la biodiversidad marina y a las comunidades costeras, generando impactos socioambientales a corto, mediano y largo plazo [6]. En este contexto, surge la necesidad urgente de desarrollar tecnologías sostenibles orientadas a la remediación. Entre estas tecnologías, se destacan los biofiltros, los sistemas de fitorremediación y el uso de biosorbentes naturales. En este último enfoque el uso de plumas de pollo como material adsorbente ha ganado interés, debido a su estructura rica en queratina, que posee alta afinidad por compuestos hidrofóbicos como los hidrocarburos. Este enfoque es particularmente prometedor dado que las plumas representan un residuo abundante y de bajo costo, capaz de retener diversos contaminantes en entornos acuáticos.

Aunque se han realizado estudios sobre otros materiales adsorbentes naturales, centrar la atención en las plumas de pollo ofrece un enfoque innovador que podría resultar más eficaz en la remoción de hidrocarburos. Dada la magnitud del problema, es esencial proponer y aplicar procesos específicos que faciliten la eliminación parcial del petróleo mediante la adsorción. Este desafío exige el desarrollo de técnicas sostenibles que no solo aborden la contaminación, sino que también promuevan la preservación de los recursos naturales.

Por todo lo anterior, este trabajo propone determinar la capacidad de sorción de crudo de petróleo mediante un filtro de plumas de pollo a escala de laboratorio. Este campo de investigación es de vital importancia, ya que enfrenta una problemática ambiental crítica y ofrece soluciones viables que generan beneficios tanto ambientales como económicos. La investigación tiene el potencial de contribuir significativamente a la recuperación ambiental y de proporcionar una estrategia innovadora para combatir la contaminación por derrames de petróleo, alineándose con las necesidades actuales de sostenibilidad y gestión de residuos. Además, la utilización de plumas de pollo no solo optimiza el uso de recursos subutilizados, sino que también podría abrir nuevas oportunidades en la industria de la remediación, fomentando un enfoque más circular en el manejo de residuos.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Evaluar el potencial de un filtro a escala piloto utilizando plumas de pollo para la remoción de hidrocarburos

1.3.2 Objetivos específicos

- Caracterizar las propiedades fisicoquímicas de los materiales (plumas de pollo).
- Determinar la capacidad de sorción de las plumas de pollo para la remoción de hidrocarburos en aguas sintéticas.
- Estimar la remoción de hidrocarburos con un filtro a escala piloto.

Capítulo 2: Marco teórico o referentes conceptuales

2.1 Antecedentes

La contaminación ambiental causada por hidrocarburos representa una preocupación global debido a sus efectos persistentes y nocivos en los ecosistemas acuáticos y terrestre. Estos compuestos pueden generar consecuencias graves para el ambiente, afectando la calidad del agua, la salud humana y biodiversidad. Por ello, se han desarrollado diversas técnicas de remediación para eliminar estos contaminantes del medio ambiente.

Los derrames de petroleros provocan una disrupción en la estructura de los ecosistemas, afectando desde microorganismos hasta especies superiores. Estos demostraron que el 30% de los hidrocarburos se depositan en el mar, formando películas tóxicas que reducen la penetración de luz y oxígeno, alterando la fotosíntesis y la supervivencia de organismos marinos. En humanos, la exposición crónica a hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs) se vincula con mutaciones en el gen p53- clave en la supresión tumoral, aumentando la incidencia de cáncer pulmonar y trastornos endocrinos [9].

La investigación de [10], señala que la protección del medio ambiente se ha convertido en un tema de preocupación mundial, dado que los distintos tipos de hidrocarburos son contaminantes persistentes para los ecosistemas. Estos presentan un riesgo debido a sus efectos mutagénicos, cancerígenos, inmutoxicos y teratógenos, amenazando a todas las formas de vida, desde microorganismos hasta seres humanos, cuando son liberados al medio ambiente por las actividades del ser humano, necesitando diversas técnicas de remediación para eliminar estos químicos peligrosos del medio ambiente.

De acuerdo con el estudio de [11] una, una vez que se produce un vertido de petróleo, se produce una alteración grave en los ecosistemas marino y agua dulce, representando una amenaza directa para la salud humana. Aunque existen diferentes métodos físicos y químicos para su tratamiento. La biorremediación ha emergido como una de las tecnologías más utilizadas debido a su eficiencia, rapidez y bajo impacto ambiental. Esta técnica supera la degradación natural de los hidrocarburos en términos de velocidad y porcentaje de eliminación, por lo que resulta en periodos de tiempo más corto y un mayor porcentaje de eficiencia en la eliminación, es por ello que surge la necesidad de explorar diferentes recursos rentables para la degradación de hidrocarburos del petróleo.

En ese contexto, el uso de consorcios bacterianos (*Pseudomonas*, *Rhodococcus*) y hongos (*Aspergillus*, *Candida*) ha demostrado eficiencia del 53-95% en la degradación de hidrocarburos alifáticos y aromáticos en seis meses, estimulando simultáneamente la actividad microbiana nativa. No obstante, la eficiencia de estos métodos depende de factores ambientales como pH, temperatura y disponibilidad de nutrientes, limitando su aplicación [12].

Además de los enfoques biológicos, se han investigado alternativas basadas en materiales adsorbentes y alta disponibilidad. Es importante destacar el estudio los tiempos de contacto con que oxilan entre 55 seg hasta 11 min, evaluó la eficacia del cabello humano para adsorber petróleo en agua contaminada variando el pH, la salinidad y la temperatura [13]. Determinaron que la capacidad del cabello humano para adsorber crudo de petróleo es oportuna para la eliminación de estos contaminantes del medio ambiente.

En línea con esta búsqueda de soluciones naturales la investigación [14] , donde se estudia dos adsorbentes naturales constituidos por cabello humano y plumas de pollo, puede tener efecto significativo en la remoción de crudo de petróleo en cuerpos de agua sintética, destacando la capacidad de sorción de las plumas de pollo de 4.78 veces más de su peso captando una gran cantidad, representando una tecnología económica, siendo un material de bajo costo y abundante [14]..

2.2 Bases teóricas

2.2.1. Plumas de pollo

Las plumas de pollo son un subproducto abundante de la industria avícola, la cual produce millones de toneladas anualmente en todo el mundo. Generalmente considerada un residuo de bajo valor económico, las plumas representan un desafío ambiental si no se gestionan adecuadamente. No obstante, en los últimos años han cobrado interés como biosorbentes en procesos de remediación ambiental. Desde el punto de vista estructural, las plumas están compuestas mayoritariamente por queratina, una proteína fibrosa e insoluble que constituye entre el 85 y 90% de su masa [14].

2.2.2 Adsorción

La adsorción es un proceso de acumulación mediante el cual los átomos, iones o moléculas de una sustancia (adsorbato) se adhieren a la superficie de un sólido o líquido (adsorbente). A diferencia de la absorción, que implica la incorporación del contaminante al interior del material, la adsorción ocurre principalmente como resultado de interacciones físicas (fuerzas de Van der Waals) o químicas (formación de enlaces específicos) entre el adsorbente y los sitios activos del adsorbato. Este proceso ha sido ampliamente utilizado en el tratamiento de aguas contaminadas debido a su eficiencia [15].

2.2.3 Cinética

En un proceso de adsorción, la transferencia de masa describe el movimiento de las moléculas del adsorbato hacia la superficie del adsorbentes. El estudio cinético implica un proceso de adsorción el cual proporciona información sobre el sistema estudiado como el tiempo necesario para alcanzar el equilibrio y la capacidad del adsorbente a lo largo del tiempo, para ello se emplean los distintos modelos con el fin de conocer la velocidad de adsorción y la concentración de soluto en cada fase [16].

Para ello los resultados experimentales fueron ajustados a los modelos cinéticos de **Pseudo primer orden, Pseudo segundo orden, Difusión intraparticular y Elovich**

2.2.4. Isotermas de adsorción

El proceso de adsorción con plumas de pollo consiste en la cantidad adsorbato que se adhiere a la superficie del adsorbente, en este caso es la cantidad de crudo de petróleo (adsorbato) que se fija a las plumas de pollo (adsorbente). Se busca por medio de pruebas experimentales llegar al equilibrio de adsorción, el cual típicamente describe la relación entre la cantidad de adsorbato adsorbido sobre un adsorbente y la concentración del adsorbato en solución cuando se ha alcanzado el equilibrio a temperatura constante, expresándolo en forma de isoterma de adsorción [17].

En esta investigación los resultados experimentales fueron ajustados a cuatro modelos de isotermas de adsorción correspondientes a **Freundlich, Langmuir, Sips y Tempkim** correspondientes a las **Ecuaciones 1-4** descritas en el apartado de metodología. En la Tabla 1 se presentaron los parámetros de cada uno de los modelos de isotermas con una descripción del significado de cada uno [18] [19] [20] [21].

Tabla 1.

Parámetros de los modelos de isotermas de adsorción

<i>Modelo</i>	<i>Parámetro</i>	<i>Descripción</i>
Freundlich	q_e	Cantidad absorbida (mg/g)
	C_e	[solute] _{eq} en solución (mg/L)
	$1/n$	Medida de la intensidad de la adsorción- factor de heterogeneidad
	K_f	<i>Parámetro de capacidad de adsorción ($\text{mg}^{1-1/n} \cdot \text{L}^{1/n}/\text{g}$)</i>
Langmuir	q_e	Cantidad adsorbida (mol/g-mg/g)
	C_e	[solute] _{eq} en solución (mol/L-mg/L)
	q_{max}	Capacidad de adsorción máxima monocapa (mol/g-mg/g)
	K_L	<i>Parámetro de afinidad del sistema (L/mol-L/mg)</i>
	q_e	Cantidad adsorbida (mol/g-mg/g)
Sips	C_e	[solute] _{eq} en solución (mol/L-mg/L)
	$1/n$	Medida de la intensidad de la adsorción- factor de heterogeneidad
	b	Parámetro de afinidad
Temkim	B	RT/b está relacionado con el calor de adsorción
	R	Constante de los gases (J.mol/K)

2.3 Bases legales

En la tabla 2 se realizó una revisión exhaustiva de la legislación ambiental vigente en Colombia. Este cuerpo normativo, integrado por leyes, resoluciones y decretos, constituye el soporte jurídico que permite sustentar y llevar a cabo el presente proyecto de investigación.

Tabla 2.

Marco normativo ambiental colombiano

Normativa	Descripción
Ley 99 de 1993	Establece el sistema nacional ambiental y regula la conservación y manejo de los recursos naturales. Orientada a la protección del recurso hídrico frente a agentes contaminantes como los hidrocarburos
Ley 1252 de 2008	Promueve la gestión integral de residuos sólidos y fomenta la valorización de residuos. Permite la incorporación de residuos orgánicos, como las plumas de pollo, en procesos de remediación, en el marco de la economía circular.
Decreto 1868 de 2021	Plan nacional de contingencia contra los derrames de hidrocarburos. Apoyando las estrategias de remediación ante eventos de contaminación hídrica por hidrocarburos, coherente con un enfoque preventivo.
Resolución 031 de 2015	Establece los límites máximos permisibles para vertimientos puntuales en cuerpos de agua. Regula la concentración de hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), exigiendo su tratamiento previo, lo que respalda el uso de tecnologías de remoción.

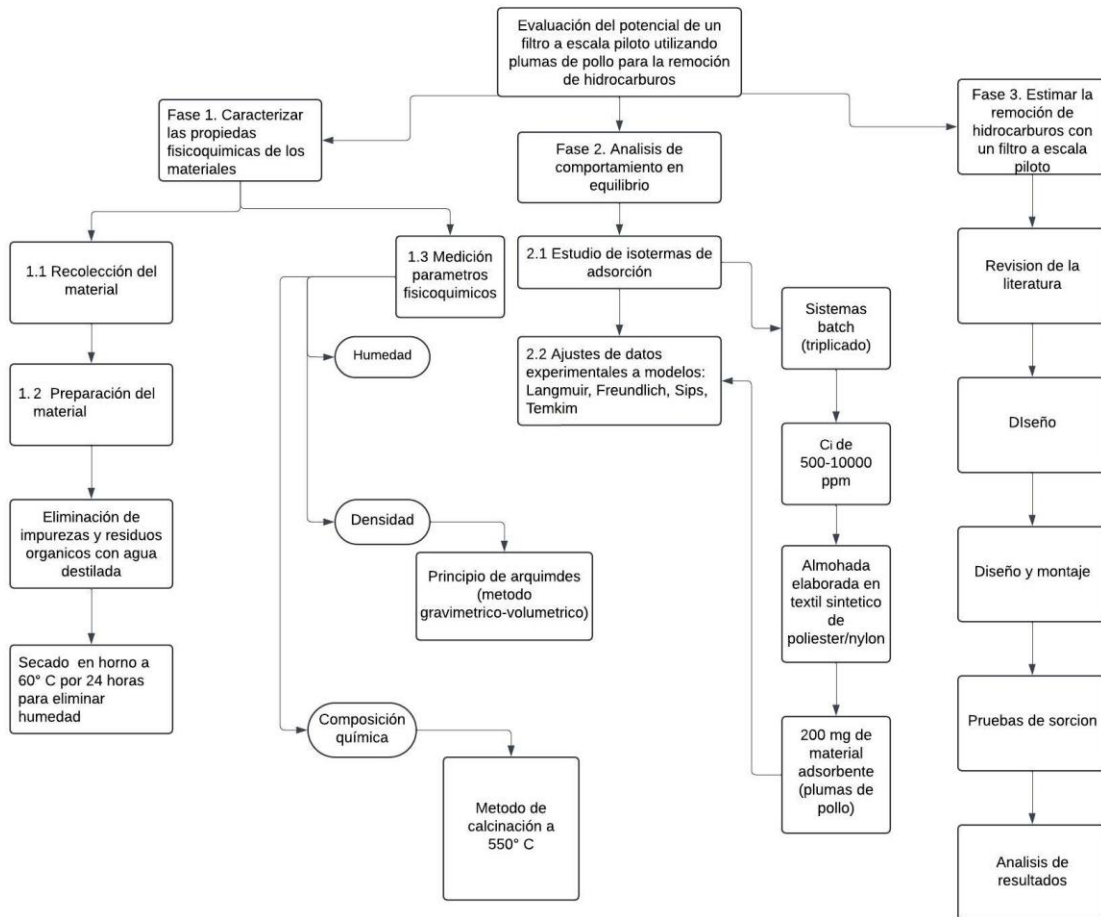
Fuente: Elaboración propia

Capítulo 3. Metodología

La figura 1 presenta el esquema metodológico para evaluar la eficiencia de las plumas en la remoción de hidrocarburos mediante procesos de adsorción, en el cual comprende tres fases, relacionados a los objetivos específicos, en donde inicialmente se prepara y caracteriza el material, posteriormente se analiza el comportamiento en equilibrio mediante modelos teóricos, y finalmente se diseña y evalúa a través de un filtro a escala piloto.

Figura 1.

Esquema metodológico de las fases del proyecto



Fuente: Elaboración propia

3.1 Fase I: Caracterización de las propiedades fisicoquímicas de las plumas

3.1.1 Recolección de muestras y tratamiento previo

Las muestras de plumas fueron recolectadas de una microempresa dedicada a la comercialización avícola, enfocada en la venta de pollos y gallinas. Esta se encuentra ubicada en la vereda los Robles, municipio de Timbio Cauca, en el kilómetro 10. La microempresa maneja un promedio de 1000 ejemplares por bimestre, cada uno con peso aproximado de 1.5 a 2 kg. De esta manera, se estima una producción de 2100 kg de carne por periodo, lo que genera alrededor de 206 kg de plumas en cada ciclo de producción.

El material fue recolectado en bolsas plásticas tipo ziploc y llevado al laboratorio de Ciencias Ambientales de la Corporación Universitaria Autónoma del Cauca. Las plumas fueron sometidas a un lavado previo con el fin de eliminar las impurezas y residuos orgánicos, producto del sacrificio animal. Inicialmente, se enjuagó dos veces todo el material con agua corriente mediante agitación manual, y posteriormente, con agua destilada. Finalmente, las plumas se secaron a 60 °C en un horno por 24 horas y después dejadas a temperatura ambiente. El material resultante fue el caracterizado como describe a continuación.

3.1.2 Humedad de las plumas de pollo

Para determinar el porcentaje de humedad de las plumas de pollo, se realizó el procedimiento basado en el Standard Methods (APHA) [22]. Para esto, se pesaron por triplicado aproximadamente 6 g de las plumas en una balanza analítica, siendo este el peso inicial (W_i). Posteriormente, las muestras se dispusieron en bandejas de aluminio para después ser llevadas al horno a 60 °C durante 24 horas. Al concluir el periodo de secado, se retiraron las plumas del horno y se dejaron enfriar a temperatura ambiente. Todas las muestras fueron pesadas nuevamente, registrando estos valores como el peso final (W_f). Con estos datos, se calculó el porcentaje de humedad con la ecuación (1).

$$\%Humedad = \frac{W_i - W_f}{W_i} * 100\% \quad \text{Ec. (1)}$$

3.1.3 Densidad del material

Para la determinación de la densidad (ρ) de las plumas de pollo, se aplicó el método gravimétrico, teniendo en cuenta el principio de Arquímedes, que establece que la densidad se puede calcular a partir de la relación entre la masa y el volumen desplazado [23]. Primero, se pesó 5 g de plumas en una balanza analítica, registrando este valor como la masa (m). Se sumergieron las plumas en una probeta con agua destilada, asegurando que estén completamente sumergidas para evitar errores de medición. Se midió el volumen de agua desplazado, que corresponde al volumen de las plumas, registrando el valor como V . La densidad se calculará con la ecuación (2) [24].

$$Densidad\ real = \frac{M}{V} \quad \text{Ec. (2)}$$

Este procedimiento fue repetido por triplicado y los resultados fueron reportados como el promedio de las muestras acompañado con el valor de desviación estándar como dato de dispersión, con el fin de asegurar la consistencia y validez de los resultados.

3.1.4 Composición química de las plumas

Para el análisis de la composición química de las plumas, se empleará el método de calcinación en una mufla a 550° C durante de 2 horas. El método consistió. En pesar 1,5 g del material en crisoles por triplicado (W_i). Luego, los crisoles se introdujeron en la mufla para someter a un proceso de calcinación a 550°C por 2 h. Durante este proceso, los componentes orgánicos de las plumas se oxidarán, dejando como residuo las cenizas inorgánicas. Posterior los crisoles se retira el crisol de la mufla y se deja enfriar hasta temperatura ambiente. Los residuos en los crisoles se pesaron, registrando registrándolo como el peso final (W_f). A partir de estos resultados se calculó el porcentaje de cenizas en relación al W_i de las plumas utilizando la ecuación (3)[25]. Los resultados se reportaron como el valor promedio y como dispersión la desviación estándar.

$$Cenizas\ (\%) = \frac{W_i}{W_f} * 100\% \quad \text{Ec. (3)}$$

3.1.5 Propiedades fisicoquímicas del hidrocarburo

El hidrocarburo utilizado en este estudio fue adquirido de ABC Laboratorios S.A.S y que es comercializado como petróleo crudo natural parafinico que está compuesto por aceite parafinico liviano desparafinado cataliticamente (1 - <5%), aceite mineral (parafina liquida) (10 - <20%) y destilado naftenico liviano hidrotratado (60 - <70%). Este es un líquido de color amarillo pálido y que presenta las siguientes propiedades: densidad relativa de 0,887. (15° C), punto de ebullición mayor a 316 °C, presión de vapor de <0,0013kPa (20 °C), coeficiente de partición de n-octanol/agua ($\log P_{ow}$)> 3.5 y viscosidad de 26cSt (26 mm²/seg) a 40 °C. Además, este compuesto presenta baja solubilidad en agua. Por: ABC Laboratorios S.A.S

3.2 Fase II: Comportamiento en equilibrio

3.2.1 Estudios de sorción

Los estudios de isotermas de adsorción se realizaron a temperatura ambiente (298 K), bajo agitación constante a 140 r.p.m utilizando una cantidad fija de plumas ($W_i = 0,20020$ g) y variando la concentración de hidrocarburo de 500-10000 ppm, en las pruebas en batch. Las muestras se mantuvieron en contacto con el crudo durante un periodo de tiempo de 2 horas mediante agitación constante en un equipo shaker, seguido de un periodo de escurrido por 15 min. Posteriormente, las plumas se secaron en horno a temperatura de 40 °C durante 4 horas para eliminar el exceso de agua. La cantidad de crudo adsorbido por unidad de masa o capacidad de sorción (q_e -mg/g) se calculó por gravimetría, que tiene en cuenta la diferencia entre el peso inicial (W_i) y final (W_f) del sistema dividido por el W_i , como se indica en la Ecuación (4). Cada condición experimental se evaluó por triplicado para garantizar la reproducibilidad de los resultados.

$$q_e = \frac{W_f - W_i}{W_i} \quad \text{Ec. (4)}$$

3.2.2 Isotermas de adsorción

Los datos experimentales obtenidos fueron ajustados a los modelos no lineales de las isotermas de adsorción de **Freundlich, Langmuir, Sips y Temkim** haciendo uso del Software Origin Pro-Versión 2025 licenciado para estudiantes.

3.2.3 Freundlich

El modelo de Freundlich describe la adsorción en superficies heterogéneas y procesos de adsorción en multicapa. Asume que la energía de la superficie de adsorción no es uniforme y que a. A medida que la superficie se cubre, la afinidad de los sitios restantes por el adsorbato disminuye. La Ecuación (5) representa el modelo matemático la ecuación no lineal de Freundlich [18].

$$q_e = K_f C_e^{\frac{1}{n}} \quad \text{Ec. (5)}$$

Donde:

q_e : Cantidad adsorbida mg/g

C_e : [solute]_{eq} en solución mg/L

1/n: Medida de la intensidad de la adsorción- factor de heterogeneidad

K_f : Parámetro de capacidad de adsorción (mg^{1.-1/n}.L^{1/n} g)

3.2.4 Langmuir

El modelo de Langmuir describe la adsorción en monocapa asumiendo que el proceso los sitios de adsorción en la superficie son energéticamente homogéneos y finitos. Asimismo, considera que una vez que un sitio es ocupado por una molécula de adsorbato, no puede ocurrir más adsorción en este sitio, y la interacción entre adsorbato-adsorbato sobre el adsorbente es nula. La Ecuación (6) representa el modelo matemático no lineal de Langmuir [19].

$$q_e = \frac{q_{max} K_L C_e}{1 + K_L C_e} \quad \text{Ec. (6)}$$

Donde:

q_e : Cantidad adsorbida mg/g

C_e : [solute]_{eq} en solución mg/L

q_{max} : Capacidad de adsorción máxima monocapa (mol/g-mg/g)

3.2.5 Sips

Este modelo es una combinación de los modelos de Freundlich y Langmuir, y a menudo se utiliza para describir la adsorción en sistemas heterogéneos que exhiben un comportamiento de Langmuir a altas concentraciones de adsorbato, siendo la Ecuación (7) la representación del modelo matemático no lineal de Sips (7) [26].

$$q_e = \frac{Q_{max}(bC_e)^{\frac{1}{n}}}{1 + (bC_e)^{\frac{1}{n}}} \quad \text{Ec. (7)}$$

Donde:

q_e : Cantidad adsorbida mg/g

C_e : [solute]_{eq} en solución mg/L

b : Parámetro de afinidad

$1/n$: Medida de la intensidad de la adsorción- factor de heterogeneidad

3.2.6 Temkim

Este modelo considera los efectos indirectos de las interacciones adsorbato-adsorbato en la isoterma de adsorción y asume que el calor de adsorción de todas las moléculas en la capa disminuye linealmente con la superficie debido a estas interacciones, la ecuación del modelo de Temkim se presenta en la Ecuación (8) [21].

$$q_e = \frac{RT}{b} \ln(K_T C_e) = B \ln(K_T C_e) \quad \text{Ec. (8)}$$

El ajuste adecuado de los datos experimentales de q_e a los diferentes modelos fueron evaluadas usando q_e del error cuadrático medio (ECM) mediante la Ecuación (9) y el coeficiente de determinación R^2 .

$$\text{ECM} = \sqrt{\frac{1}{N-2} \sum_{i=1}^N (qQ_e^{\text{exp}} - qQ_e^{\text{cal}})^2} \sqrt{\frac{1}{N-2} \sum_{i=1}^N (Q_e^{\text{exp}} - Q_e^{\text{cal}})^2} \quad \text{Ec. (9)}$$

3.2.2 Estudio cinético

El estudio cinético permite analizar la velocidad de los procesos químicos o físicos en el sistema. En este contexto la remoción de crudo de petróleo mediante filtración, contribuye a determinar la tasa de eliminación del contaminante, evaluar como el tiempo de contacto, la temperatura y la concentración inicial, estableciendo los modelos que describan el comportamiento del sistema.

El estudio cinético se realizó a temperatura ambiente (298 K) utilizando una concentración fija de crudo de petróleo de 5000 ppm. Para ello, se emplearon 100 mL de solución contaminada con crudo, los cuales se agitaron a una velocidad constante de 140 r.p.m. Las mediciones se realizaron a intervalos de tiempo de 5, 10, 15, 30, 45 y 60 min.

3.2.3 Ajustes cinéticos

3.2.4 Pseudo primer orden

El modelo de pseudo primer asume que la velocidad de adsorción del sorbato en los sitios de unión son directamente proporcional a la cantidad de o números de sitios de sorción no ocupados [27]. La ecuación (10) es la forma lineal del modelo cinético de pseudo-primer orden.

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_{theo} - k_1 t \quad \text{Ec. (10)}$$

Donde:

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

q_{theo} : Es la capacidad de adsorción teórica (g/g)

k_1 : Es la constante de velocidad (min^{-1}).

3.2.5 Pseudo segundo orden

El modelo de pseudo segundo orden asume fundamentalmente que la sorción química o adsorción es el paso determinante de la velocidad de sorción en los sitios de unión de sorción está relacionada con el cuadrado de los sitios de sorción desocupados accesibles. La ecuación del modelo cinético de Pseudo segundo orden se expresa en forma lineal en la Ecuación (11) [28].

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_{theo}^2} + \frac{t}{q_{theo}} \quad \text{Ec. (11)}$$

Donde:

K_2 : Es la constante de velocidad (g/g/min)

q_{theo} : Es la capacidad de adsorción teórica (g/g)

t: Tiempo transcurrido (min)

qt: Cantidad o

3.2.6 Difusión intraparticular Weber-Morris

El modelo propone como paso limitante la difusión intrapartícula en el proceso de adsorción. Es decir, la velocidad a la que el adsorbato se difunde dentro de los poros del adsorbente controla la velocidad global del proceso. La ecuación del modelo de difusión intraparticular de Weber-Morris se expresa en la Ecuación (12) [29].

$$q_t = K_w m t^{0.5} + C \quad \text{Ec. (12)}$$

Donde:

qt: Cantidad o concentración medida en el tiempo

t: Tiempo transcurrido (min)

C: Resistencia de la película interfacial o impacto de la capa limite (mg/g)

K_{w-m} : Es la constante de velocidad de difusión intraparticular de Weber-Morris ($\text{g/ggg.min}^{0.5}$)

3.2.7 Elovich

El modelo de Elovich se utiliza para describir la quimisorción en adsorbentes heterogéneos, desarrollado originalmente para explicar la adsorción de gases en sólidos, pero ha sido ampliamente aplicado en estudios de adsorción de metales y contaminantes en soluciones acuosas se expresa en la Ecuación (13) de manera lineal [30].

$$Q_t = \frac{1}{b} \ln(\alpha b) + \frac{1}{b} \ln t \quad \text{Ec. (13)}$$

Donde:

qt: Cantidad o concentración medida en el tiempo

t: Tiempo transcurrido (min)

α : Es la tasa de adsorción inicial (mg/g min)

b: Es la constante de desorción (g/mg)

3.3 Fase III: Estimación de la remoción del hidrocarburo usando un filtro.

3.3.1 Revisión sistemática

Se realizó un mapeo sistemático con el propósito de identificar y analizar los parámetros hidráulicos relevantes en el diseño y operación de filtros, para esta actividad de acuerdo a la metodología de Petesern *et. al.*[31]. Este proceso buscó proporcionar una visión de determinar y categorizar los parámetros hidráulicos de los filtros reportados en la literatura científica.

3.3.1.1 Metodología de búsqueda

Para el desarrollo de esta actividad se consideró inicialmente la definición del objetivo de la revisión sistemática, así como con el planteamiento de la pregunta orientadora. A partir de lo

anterior, se definieron las palabras claves, asociadas al objetivo de búsqueda, para generar la ecuación de búsqueda. Además, se establecieron los criterios de inclusión y exclusión, y en los periodos de búsqueda, los cuales están establecidos en la tabla 2

Tabla 3.
Componentes de la búsqueda documental

Ítem	Descriptor
Objetivo	Identificar los parámetros hidráulicos y materiales óptimos para el diseño de prototipos de tratamientos de agua no convencional
Pregunta	¿Cuáles son los parámetros hidráulicos claves y materiales óptimos para el diseño de prototipos de tratamientos de agua no convencional?
Criterios de inclusión	• Artículos científicos (inglés y español) • Investigaciones a escala piloto y real • Artículos Open Access • Periodo 2015-2025
Criterios de exclusión	• Informes técnicos, tesis no publicadas en revistas científicas • Investigaciones sin datos cuantitativos • Tipos de tratamiento convencionales • Artículos Pay Access • Artículos inferiores a 2015
Palabras clave	• Filtro • Columnas • Métodos no convencionales

La tabla 4 presenta las categorías principales y sus respectivas subcategorías, que se utilizaron como marco para la organización y el análisis de la información recopilada durante la búsqueda documental.

Tabla 4.
Categorías de análisis de la revisión sistemática

Categoría	Subcategoría
Parámetros hidráulicos	• Caudal
	• Tiempo de retención hidráulico
	• Velocidad de flujo

- | | |
|--------------------|---|
| Materiales óptimos | <ul style="list-style-type: none"> • Plástico • Metálico • Otros |
|--------------------|---|

Se construyeron diferentes ecuaciones de búsqueda utilizando operadores boléanos y las palabras claves definidas en las categorías y subcategorías en la tabla anterior tabla 4 Posteriormente, se realizó las búsquedas de los artículos mediante diversas ecuaciones en las bases de datos “Science Direct” y “Taylor And Francis” incluyendo un periodo que abarca desde 2015 a 2025 tabla 4.

Tabla 5.

Definición de ecuaciones de búsqueda

Ítem	Descriptor
Ecuaciones de búsqueda	• Tratamiento no convencional OR métodos no convencionales AND agua AND filtro. (Ec1) • Filtro OR filtración OR columnas OR lechos de filtración AND tratamiento OR sistema de purificación AND medio filtrante OR medio de filtración. (Ec2)
Definiciones de bases de datos	Science Direct y Taylor And Francis

Nota: Se utilizaron distintas ecuaciones de búsquedas, dada la diferencia de interfaz en los patrones de búsqueda, por ello para la base de datos Science Direct se utilizó la Ec1 y para Taylor and Francis la Ec2.

3.4 Diseño de planta piloto y análisis de resultados

Las pruebas experimentales del filtro se llevarán a cabo con el objetivo de evaluar la eficiencia del sistema. Se registrarán la cantidad de hidrocarburos en la entrada (C_e) y salida (C_s) del sistema, las condiciones del sistema de tratamiento. Los datos obtenidos serán analizados a través de la ecuación de orden 1, con el propósito de determinar la eficiencia del sistema considero los parámetros estipulados en la ecuación 5

$$\%E = \frac{C_e - C_s}{C_e} * 100\%$$

Ec. (5)

Donde:

C_e: Concentración de entrada del sistema (mg/g)

C_s: Concentración de salida del sistema (mg/g)

E: Eficiencia (%)

Capítulo 4. Resultados y Discusión

4.1 Caracterización fisicoquímica de las plumas de pollo

La tabla 6 muestra los valores obtenidos de densidad, humedad y carbono orgánico total (COT) de material adsorbente.

Tabla 6.

Parámetros fisicoquímicos de las plumas

Densidad (g/mL)	Humedad (%)	COT (%)
0,39282	14	98,1
0,38788	10	97,6
0,39184	11	97,3

La baja densidad ($0,394 \pm 0,007$ g/mL) sugiere una relación una estructura altamente porosa con una elevada relación-superficie, esta propiedad facilita el contacto eficiente con los hidrocarburos, ya que la baja densidad le confiere al material propiedades de flotabilidad facilitando el contacto con los hidrocarburos de baja densidad y los sitios activos de las plumas[32]. Además, esta característica de flotabilidad puede contribuir en aplicaciones acuáticas o reales.

El valor bajo de humedad (14%) sugiere que el material presenta una baja afinidad por el agua, lo que evidencia una característica hidrofóbica. Esta propiedad resulta favorable para el proceso de adsorción de contaminantes orgánicos como el crudo de petróleo, ya que un exceso de agua podría interferir en los sitios activos del adsorbente, debido a que la presencia de agua dentro de la estructura puede limitar la difusión y el acceso de moléculas orgánicas por su baja solubilidad en agua [33]. Así mismo, y relacionado a la baja humedad, los elevados contenidos de COT 98% reflejan un alto contenido de carbono residual que influye directamente en la capacidad del adsorbente, debido a que se favorece las interacciones químicas con las moléculas de petróleo por afinidad [34]. En este sentido, el bajo contenido de humedad y elevado COT, permite una interacción más eficiente entre el adsorbente y el adsorbato orgánico [35].

el elevado contenido.

El estudio morfológico de las plumas evidencia dos tipos de superficies característico de este material, comprendidas por el raquis y las barbillas. La primera, es la parte central gruesa de la pluma y presenta una menor superficie en relación con su volumen por lo que es más densa. Las barbillas son las estructuras finas y ramificadas de la pluma, tienen una gran superficie en relación con su volumen, siendo menos densos [36]. La diferencia estructural entre las parte, permite a las barbillas adsorber eficientemente el petróleo, así como se ha identificado en otros estudios [37]. Por tanto, y debido a las características del material, para los estudios de adsorción se consideraron solo las barbillas de las plumas. Por un lado, permite mejorar la adsorción del hidrocarburo, mientras que, por otro lado, el raquis puede ser aprovechado para otras aplicaciones.

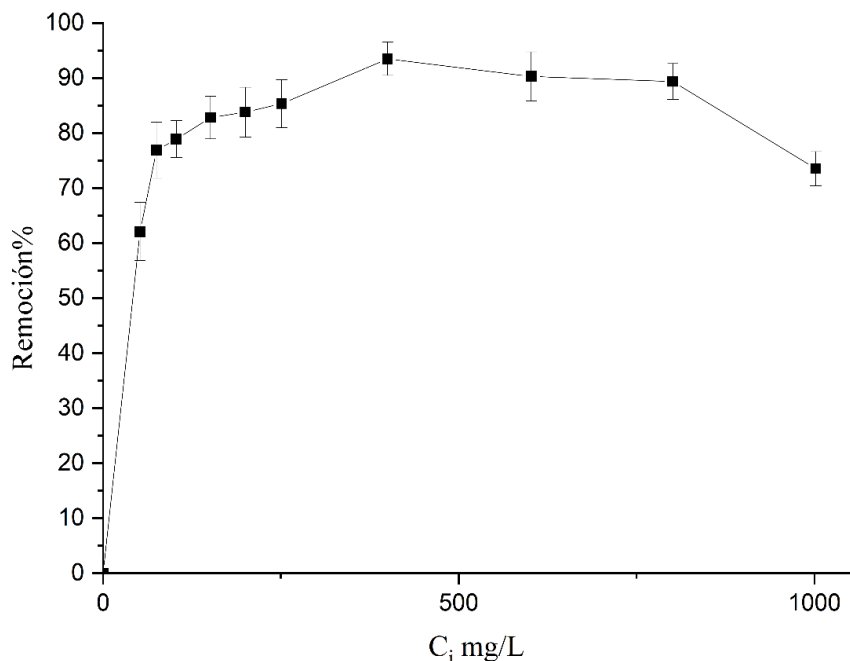
4.2 Análisis de comportamiento en equilibrio

4.2.1 Adsorción

La figura 2 se muestra los resultados de la eficiencia de remoción de las plumas de pollos en sistema batch.

Figura 2.

Remoción de petróleo



La figura 2 muestra la relación entre la cantidad de petróleo inicial (mg/L) y el porcentaje de remoción alcanzado. A medida que la concentración de petróleo aumenta desde valores bajos hasta aproximadamente 400 mg/L, se observa un incremento en la eficiencia de remoción, alcanzando valores superiores al 90%. Este comportamiento sugiere que, en este rango, el sistema de tratamiento opera de manera eficiente, logrando remover la mayor parte del contaminante presente. Sin embargo, al superar los 500 mg/L, la eficiencia comienza a disminuir de forma progresiva, siendo más notable a los 1000 mg/L, donde la remoción cae a alrededor del 73%. Esta caída en la eficiencia podría deberse a una sobresaturación del sistema o a efectos inhibitorios causados por la alta concentración de petróleo, lo cual limita la capacidad del mecanismo de remoción[38].

Las barras de error indican cierta variabilidad en los datos, particularmente en las concentraciones medias, aunque la tendencia general se mantiene clara. En conjunto, los resultados sugieren que existe un rango óptimo de concentración de petróleo para maximizar la eficiencia del tratamiento, más allá del cual la capacidad del sistema se ve comprometida.

4.2.2 Ajuste de las isothermas de adsorción

En la figura 3 se observan los ajustes a los diferentes modelos de isoterma de adsorción con los datos experimentales, en la tabla 7 muestra los parámetros obtenidos para cada uno de los modelos. La isoterma de adsorción experimental obtenida del hidrocarburo, la cual exhibe una curva sigmoideal característica, con un ascenso inicial pronunciado en la capacidad de adsorción (q_e) a bajas concentraciones de equilibrio (C_e), seguido de una región de saturación a concentraciones más elevadas [26].

Figura 3.

Isoterma de adsorción de petróleo en plumas de pollo

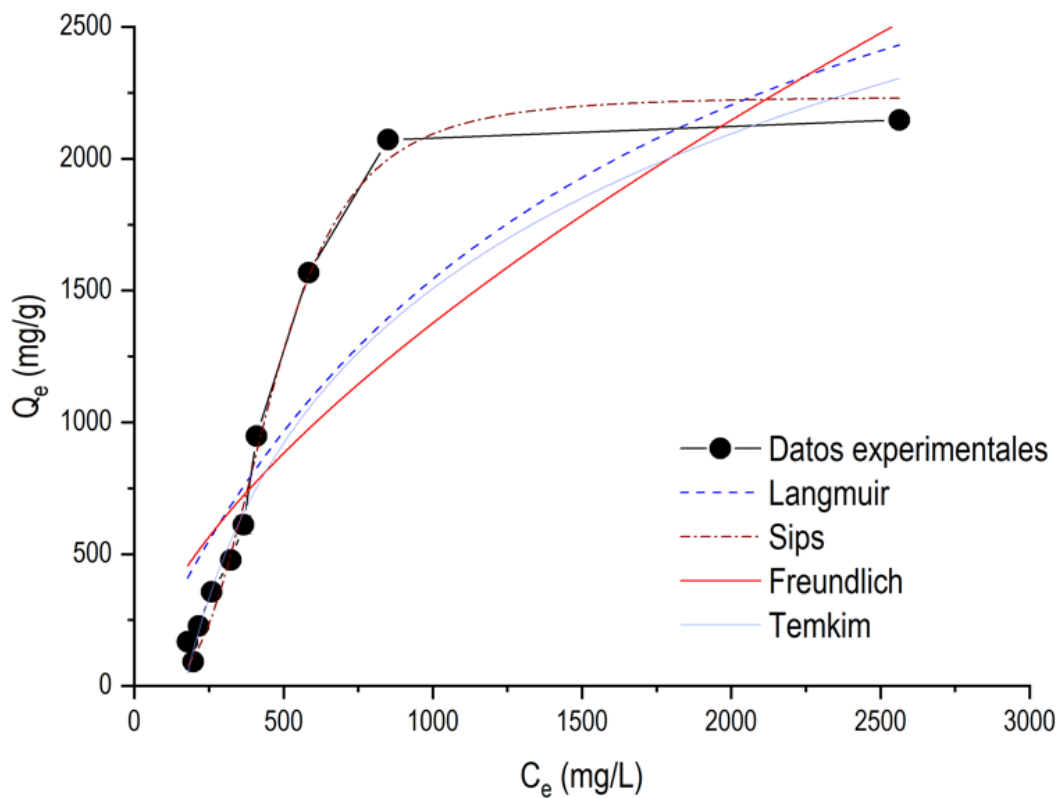


Tabla 7.

Parámetros de los modelos de isotermas.

Modelo	Langmuir	Freundlich	Sips	Temkin
Parámetro	$q_m = 3850.14 \pm 0.01$	$K_f = 14 \pm 16$	$q_m = 2236 \pm 93$	$a = 0.00593 \pm 0.00005$
	$K_L = 7 \pm 4$	$n = 1.6 \pm 0.3$	$K_s = 0.0022 \pm 0.0002$ $n = 3.5 \pm 0.4$	$b = 847 \pm 6$
R²	0.79	0.70	0.98	0.95
ECM	348,64	416,11	88,47	303,99

El análisis de los resultados obtenidos a partir de la prueba de sorción de crudo de petróleo en plumas de pollo evidencia diferencia significativa en el ajuste de los distintos modelos evaluados. El modelo de Sips, que integra los modelos de Langmuir y Freundlich, muestra el mejor ajuste estadístico, con un coeficiente de correlación R^2 de 0,98 y un ECM de 88,47. Esto indica un buen ajuste a los datos experimentales, así como una mínima dispersión de los residuos. El valor de Q_m obtenido para Sips (2236 ± 93 mg/g) sugiere una alta capacidad máxima de sorción, mientras que el parámetro N ($3,5 \pm 0,4$) superior a 1, propone una adsorción favorable y confirma la heterogeneidad del sistema. El parámetro K ($0,0022 \pm 0,0002$) refleja una afinidad moderada entre el crudo y la superficie de las plumas. Esta afinidad aunque no es alta, es suficiente para una sorción efectiva, especialmente con la alta capacidad (q_m) obtenida [39].

En contraste, el modelo de Temkin, con un R^2 de 0,95 y un ECM de 303,99, también presenta un buen ajuste a los datos, aunque ligeramente inferior al modelo de Sips, el valor de $A = 0,00593 \pm 8,01134E-5$, está relacionado con la constante de equilibrio y refleja la afinidad del adsorbente por el adsorbato. Un valor positivo de A indica que la adsorción es favorable [21].

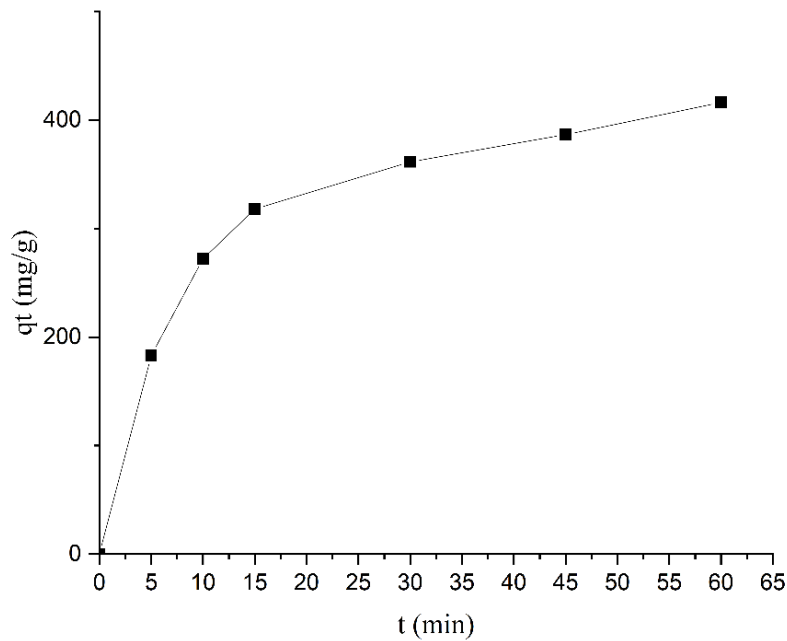
Por otro lado, los modelos de Langmuir y Freundlich presentan ajustes inferiores, con R^2 de 0,79 y 0,70 respectivamente, estos valores reflejan un menor ajuste a los datos. Aunque Langmuir reporta un Q_m elevado ($3850,14 \pm 0.005$ mg/g), la baja calidad del ajuste sugiere que este valor podría estar sobreestimado debido a la suposición de homogeneidad superficial implícita en este modelo limitando su aplicabilidad en los datos. Freundlich, por su parte con un K_f ($14,42 \pm 16,20$), indica una adsorción favorable, capturando mejor el comportamiento a altas concentraciones, aunque con una incertidumbre significativa en sus parámetros [40].

4.2.3 Estudio de cinético

La figura 4 muestra la curva cinética obtenida a partir de la adsorción de crudo de petróleo sobre plumas de pollo. Esta representa la cantidad de crudo adsorbido por unidad de masa (q_t), en función del tiempo de contacto (t) en minutos.

Figura 4.

Cinética de adsorción de crudo de petróleo con plumas de pollo



La figura 4 se analiza la cinética de las plumas de pollo respecto al crudo de petróleo, muestra un comportamiento característico de materiales por compuestos oleosos [41]. La curva presenta un incremento rápido de la cantidad adsorbida (q_t) durante los primeros 15 minutos, este comportamiento coincide con lo reportado por [14] quienes identificaron un tiempo óptimo de 11 minutos al emplear plumas como adsorbente de petróleo lo que respalda la alta velocidad de adsorción del material, lo que sugiere una gran cantidad de sitios activos disponibles inicialmente,

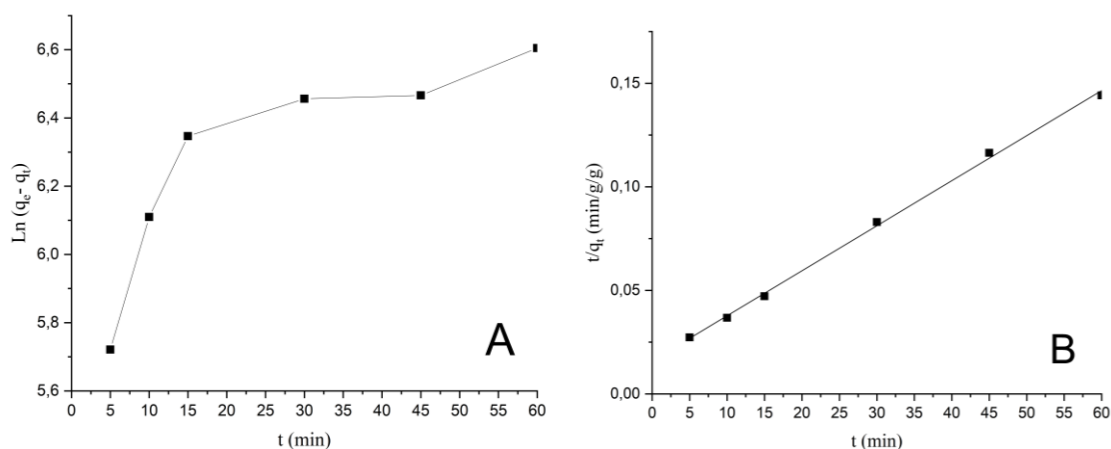
facilitando la captación eficiente del petróleo. Posteriormente, a partir de los 30 minutos la velocidad de adsorción comienza a disminuir gradualmente, indicando que los sitios de energía superficial han sido ocupados. A los 60 minutos, si bien se observa una desaceleración notable, el sistema aún no alcanza un estado de equilibrio definitivo, ya que (q_t), sigue incrementando lentamente. Esta baja tasa de adsorción en la etapa final sugiere, que si bien el proceso continua la adsorción posterior es mucho más lenta, probablemente limitada por la accesibilidad a sitios restantes o por interacciones menos favorables [42]. Este comportamiento prolongado en el tiempo es indicativo de una adsorción en múltiples etapas, una fase inicial dominada por fenómenos rápidos en la superficie externa, seguida de una etapa más lenta.

4.2.4 Ajustes cinéticos

La figura 5 presenta el análisis cinético del proceso de adsorción de petróleo utilizando plumas de pollo como adsorbente, evaluado mediante dos modelos cinéticos: Pseudo primer orden figura (A) y Pseudo segundo orden figura (B).

Figura 5.

Ajuste de los modelos cinéticos Pseudo primer orden figura (A), cinética de Pseudo segundo orden figura (B)



El análisis de la adsorción de petróleo utilizando plumas de pollo como adsorbente, se determinó que el modelo de Pseudo-segundo orden describe de manera más adecuada la cinética del proceso figura 5 (B), con un coeficiente de correlación R^2 de 0,99. Este alto nivel de ajuste sugiere que la adsorción está dominada por las interacciones químicas entre el adsorbente y el

adsorbato, como se ha observado en estudios similares donde la cinética de plumas frente a metales pesados mostró valores de R^2 de 0,99 bajo un modelo de Pseudo-segundo orden [43]. Los valores obtenidos para la constante cinética (k_2) y la capacidad teórica de adsorción (q_e) como se observan en la tabla 8 indican que el proceso depende de la disponibilidad de sitios activos en la superficie del adsorbente [44].

La comparación entre los dos modelos cinéticos revela que el modelo de pseudo primer orden presenta un ajuste menor R^2 0,69, lo cual evidencia su incapacidad para describir el comportamiento del sistema. Lo que podría atribuirse a que este enfoque no considera factores como la heterogeneidad del adsorbente.

Al comparar con otros autores como el estudio de [45] sobre la remediación de aguas contaminadas con petróleo utilizando hojas de plátano como biosorbente, se observa el modelo de Pseudo-segundo orden como el más adecuado, también con un coeficiente de correlación R^2 0,99. No obstante se identifican diferencias significativas con la capacidad máxima de adsorción (q_e), que en el caso de las hojas de plátano 12,82 g/g, valor superior obtenido con las plumas de pollo. Esta diferencia puede explicarse por la mayor área superficial específica y porosidad de las hojas de plátano que favorece una mayor retención de hidrocarburos. [46].

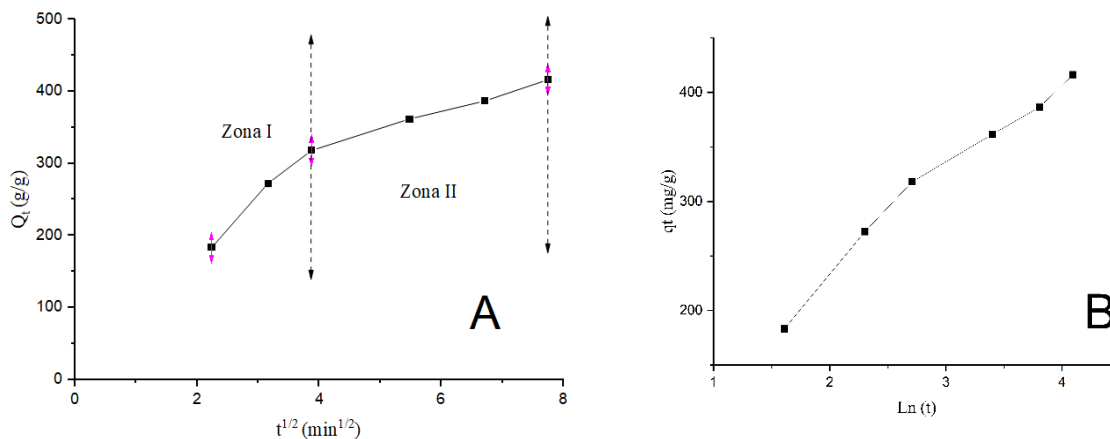
Tabla 8.

Constantes cinéticas y coeficientes de transferencia de masa para la sorción de petróleo en plumas de pollo

Modelo	Parámetros	
Pseudo primer orden	K_1 (min^{-1})	0,00124
	Q_e (theo) (mg/g)	382,7
	Q_e (exp) (mg/g)	1154,8
	R^2	0,69
Pseudo segundo orden	K_2 (min^{-1})	0,0022
	Q_e (theo) (mg/g)	454,54
	Q_e (exp) (mg/g)	1154,8
	R^2	0,99

En la figura 6 muestra la aplicación del modelo de difusión intraparticular de Weber-Morris y Elovich para el proceso de adsorción en las plumas de pollo.

Figura 6. Modelo de Weber-Morris A, Modelo de Elovich figura B



El análisis mediante el modelo de Weber-Morris sugiere la presencia de dos etapas principales como se observa en la figura 6 (A). Esta fase inicial, la adsorción está controlada por la transferencia de masa externa, es decir, la difusión del contaminante hacia la superficie del adsorbente. La alta pendiente de esta región indica una cinética rápida, característica de una alta disponibilidad de sitios activos en la superficie. A medida que avanza el tiempo, el proceso se desacelera debido al control de la difusión intrapartícula. La pendiente disminuida en esta región refleja una resistencia mayor a la penetración de las moléculas en los poros internos del adsorbente (plumas de pollo). Así mismo, este comportamiento indica que, aunque inicialmente el transporte de petróleo es eficiente, a largo plazo la eficiencia del proceso depende de la estructura porosa y la difusión dentro del adsorbente. [47]

Por otro lado, en la figura 6 (B), puede observarse el modelo de Elovich, que presenta un buen ajuste con un coeficiente de correlación R^2 0,97 tabla 9, este modelo describe el proceso de adsorción sigue un mecanismo de quimisorción sobre una superficie heterogénea característico de este modelo. Los parámetros obtenidos ($b = 0,00113$ y $\alpha = 170,9$), indica una alta velocidad inicial de adsorción y una considerable capacidad de retención lo que sugiere una alta afinidad entre el petróleo y las plumas de pollo en las etapas iniciales del proceso [48].

Tabla 9.

Constantes cinéticas modelos Weber-Morris y Elovich

Modelo cinético	Parámetros	
Weber-Morris difusión intrapartícula	K_{w-m} (g/g.min ^{-1/2})	138,14
	D_{id} /cm ² /min)	N/A
	R^2	0,90
Elovich	α (mg/g min)	170,9
	b g/mg	0,0113
	R^2	0,97

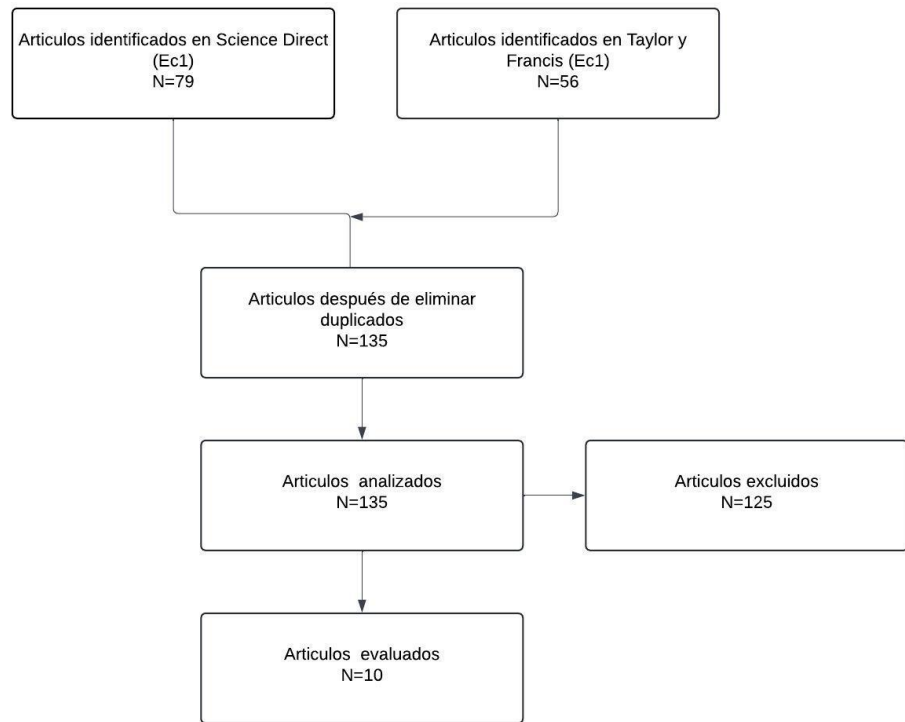
4.3 Estimación de la remoción de crudo de petróleo en un filtro a escala piloto

4.3.1 Resultados de la búsqueda documental

La figura 7 muestra los resultados de la búsqueda que Tras finalizar la búsqueda sistemática se comenzó a revisar los artículos escogidos, dando una cantidad determinada total de 10, que se tomaron en cuenta para el siguiente análisis. Este procedimiento sistemático aseguró los documentos apropiados para esta actividad.

Figura 7.

Aplicación de exclusión para las bases de datos

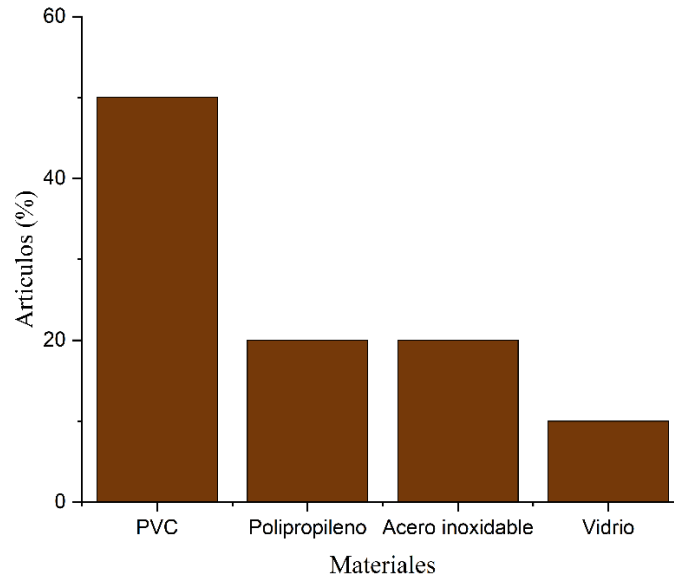


4.3.2 Análisis de la información documental

En la revisión documental de artículos, representados en la figura 8, permitió identificar los materiales de manera sistemática los materiales más empleados para la elaboración de filtros y sistemas de adsorción en el tratamiento de aguas contaminadas.

Figura 8.

Materiales utilizados en la revisión



En la revisión bibliográfica el PVC (Policloruro de vinilo), destaca como el material con el mayor porcentaje de uso, representando el 50% de las aplicaciones en sistemas de tratamiento no convencionales. Esta distribución sugiere una preferencia por este material, probablemente debido a su bajo costo, resistencia química, fluidos no corrosivos y versatilidad en aplicaciones como tuberías, columnas de filtración y recipientes de almacenamiento, seguido del polipropileno (PP) y el Acero inoxidable que se emplean en aplicaciones que requieran mayor resistencia física o química en sistemas de alta presión. El desempeño del PVC demuestra por sus características el PVC es la opción más viable y efectiva para el estudio, como es el caso donde se evalúa su efectividad en la lixiviación y disponibilidad de fósforo (P), utilizando como medio filtrante arena y biocarbón, así mismo el uso de este material para desarrollar columnas empaquetadas para el tratamiento de aguas residuales medios filtrantes como arena [49].

Tabla 10.

Caudales hallados en la revisión bibliográfica

Caudal (L/s)	Interpretación de escala	Cita
0.00012	Laboratorio	[50]
0.00083	Laboratorio	[51]
0.0333	Experimental	[52]
0.91	Laboratorio	[53]
3.5	Piloto	[54]
7	Piloto	[55]

A partir de la revisión bibliográfica, se observó en la tabla 10 una variabilidad en los caudales empleados en los diferentes sistemas de filtración, que van desde valores extremadamente bajos, como 0,00012 L/s hasta flujos intermedios de 7 L/s. Esta amplitud refleja la diversidad de escalas en las que se han desarrollado dichos sistemas, desde ensayos en laboratorio a microescala, hasta aplicaciones piloto de mayor capacidad, por lo tanto, resulta decisivo considerar esta amplitud de rangos operativos, lo que plantea optar un valor específico que sea representativo.

4.3.3 Diseño y montaje a escala piloto

A partir de la revisión bibliográfica se propone el siguiente diseño. Considerando los parámetros identificados en la literatura los parámetros hidráulicos óptimos para maximizar el contacto entre el material adsorbente y el contaminante. La capacidad con cada uno de los parámetros presentados en la tabla 11.

Figura 9.

Diagrama del efluente para la remoción de hidrocarburos

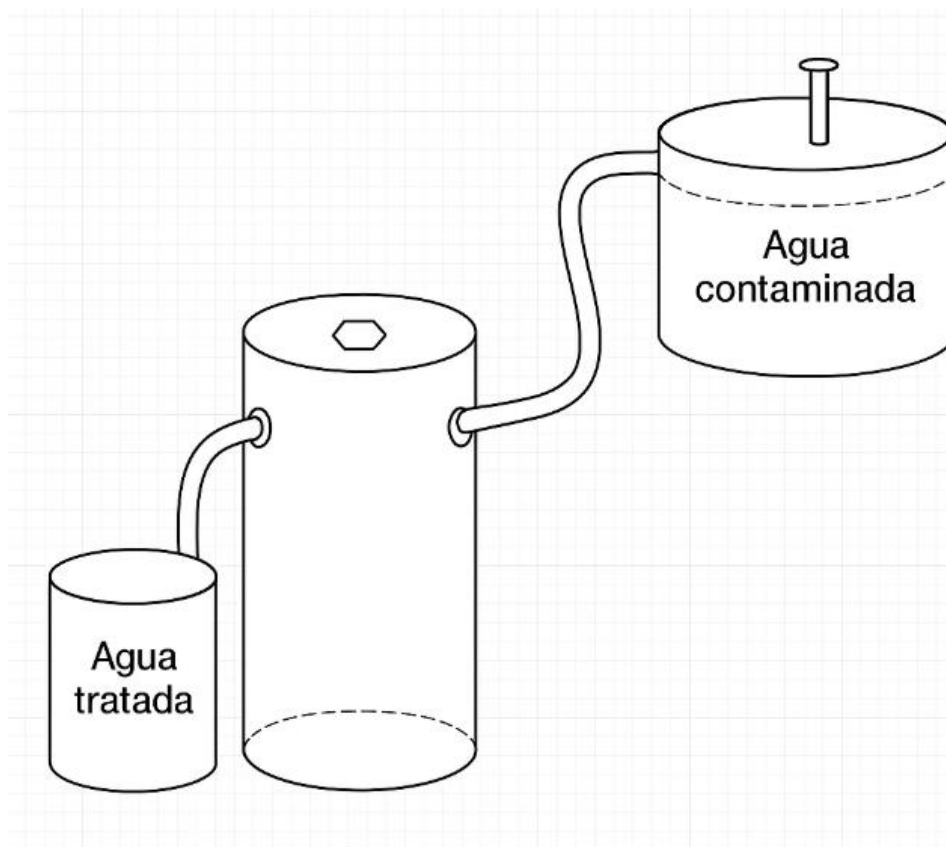


Tabla 11.

Parámetros del filtro

Parámetro	Valor	Unidad
Volumen del filtro	2,92	L
Masa del material adsorbente	4,5	g
Tiempo de retención hidráulico	30	Min
Caudal de operación	1,83	ml/s
Volumen de agua tratada	5,31	L
Concentración inicial de crudo	376,65	mg/l
Masa total de contaminante	2000	mg
Peso del sistema	483718,5	mg

Para llevar a cabo una evaluación detallada de la eficiencia del sistema, se presentan y analizan los resultados obtenidos durante la operación del filtro. Este análisis permite determinar el desempeño del sistema en términos de su capacidad para eliminar el crudo de petróleo presente en el agua. A partir de los datos recopilados, se examinan factores como la variación en la concentración del contaminante antes y después del proceso, la efectividad de remoción según los valores reflejados en la tabla 12.

Tabla 12.

Filtración del crudo

Crudo de petróleo	Resultado
Concentración medio de entrada (mg/l)	376,6 mg/l
Concentración medio de salida (mg/l)	89,15 mg/l
Remoción	76%

El filtro elaborado con plumas de pollo demostró una capacidad significativa para la adsorción de hidrocarburos, logrando remover el 76% del crudo de petróleo presente en la muestra. La concentración inicial de 376.6 mg/L se redujo a 89.15 mg/L después del tratamiento, lo que representa una disminución de 287.45 mg/L. Este porcentaje de remoción indica que las plumas de pollo poseen propiedades adsorbentes favorables para la retención de compuestos hidrofóbicos como el petróleo. La eficacia observada puede atribuirse a la estructura química de la queratina presente en las plumas, que contiene grupos funcionales como aminos (-NH₂) y carboxilo (-COOH)[56], con afinidad por compuestos orgánicos apolares; la morfología fibrosa y porosa de las plumas, que proporciona una elevada superficie específica para la adsorción; y la naturaleza hidrofóbica de la superficie de las plumas, que favorece la interacción con los hidrocarburos.

Al comparar las plumas de pollo con otros materiales adsorbentes, se encuentran alternativas relevantes como el carbón activado, que si bien de acuerdo a [57] ofrece mayor eficiencia (80-95%), presenta un costo significativo más elevado, requiriendo procesos intensivos

en energía para su producción, las plumas de pollo destacan por ser un subproducto de la industria avícola con bajo costo de adquisición y mínimos requisitos de procesamiento. Alternativas de bajo costo como el bagazo de la caña de azúcar también han sido exploradas en el uso de columnas de filtración para remover hidrocarburos dando eficiencias similares de hasta (85%), comparado a las plumas [51].

Desde una perspectiva de sostenibilidad y economía circular, el uso de plumas como material adsorbente, permite la valorización de un residuo abundante y biodegradable. Su bajo costo y facilidad de procesamiento contrastan con adsorbentes sintéticos que requieren modificaciones químicas costosas como las mencionados con anterioridad. No obstante, su aplicación enfrenta ciertas limitaciones, como la variabilidad en la composición y estructura de las plumas según la especie de ave, lo que puede afectar la reproducibilidad de los resultados. Además, de la gestión de contaminación secundaria. En términos de reutilización, las plumas tienen una menor capacidad de recuperación en comparación con materiales como el carbón activado, lo que podría restringir su uso en aplicaciones que requieran múltiples ciclos de adsorción.

Por otro lado, aunque los porcentajes de remoción con la propuesta tecnológica son altos, el efluente se identificaron limitaciones significativas, como la tendencia del crudo a adherirse a las superficies internas del PVC. Aunque este material es reconocido por su resistencia química, su superficie puede facilitar la retención de compuestos oleosos, dificultando la limpieza y mantenimiento del filtro, que a su vez compromete la eficiencia del proceso de remoción. Por lo cual se sugiere, implementar un diseño modular que incorpore múltiples filtros en paralelo, permite distribuir el flujo de entrada en varios filtros simultáneamente, lo que reduce la carga individual de cada unidad y minimiza la saturación y adherencia del crudo en las superficies internas. Este enfoque modular también podría ofrecer una adaptación a variaciones de caudales y la concentración del contaminante, mejorando la eficiencia del proceso de remoción de hidrocarburos.

La contaminación secundaria de las plumas representa un residuo que puede generar problemas ambientales si no se manejan adecuadamente. La presencia de presencia de hidrocarburos puede ser potencialmente tóxico al entorno. Para gestionar este residuo se requiere un tratamiento que estabilice o elimine los hidrocarburos adheridos, un enfoque viable la biorremediación, que utiliza microorganismos capaces de degradar los compuestos presentes en el petróleo.

Capítulo 5. Conclusiones y Recomendaciones

5.1 Conclusiones

- La caracterización demuestra que las plumas presentan propiedades prometedoras para la adsorción de hidrocarburos, debido a su baja densidad y alto contenido de carbono orgánico, lo que favorece la interacción con moléculas de petróleo.
- Los datos obtenidos en batch revelan la eficiencia de remoción de crudo de petróleo dependiendo de su concentración inicial. En concentraciones bajas hasta (400mg/L), el sistema logra una alta efectividad, superando el 90% de remoción. Sin embargo, al aumentar la concentración por encima de 500mg/L, la eficiencia disminuye, posiblemente debido a la saturación del material. Lo que sugiere que el material es eficaz en rangos controlados de contaminación y su desempeño se ve limitado en condiciones de alta carga de hidrocarburos.
- El análisis de los modelos de adsorción, el modelo de Sips presenta el mejor ajuste a los datos experimentales, confirmando una alta capacidad máxima de sorción (2236 ± 93 mg/g), este comportamiento sugiere que el proceso no sigue un mecanismo puramente monomolecular (Langmuir) ni depende únicamente de la heterogeneidad superficial (Freundlich), sino que combina ambas características.
- El estudio cinético se evidencia una sorción acelerada, seguida de una fase más lenta, en la que la velocidad de adsorción disminuye progresivamente debido a la saturación parcial de los sitios activos del material. Aunque el sistema no alcanza el equilibrio, la adsorción continua a una tasa reducida, lo que sugiere que los sitios restantes presentan limitaciones o menos afinidad por el hidrocarburo.
- El análisis de los modelos cinéticos, el modelo de Pseudo segundo orden tiene el mejor ajuste a los datos experimentales lo que sugiere que la velocidad de adsorción esta controlada por interacciones químicas entre el adsorbente y el adsorbato.

- Los resultados de la búsqueda sistemática indican que materiales como el PVC es el más usado para la elaboración de propuestas tecnológicas como los filtros debido a su accesibilidad.
- El filtro con plumas demuestra ser una propuesta tecnológica prometedora y eficaz para la adsorción de hidrocarburos, logrando una remoción significativa del 76% del crudo de petróleo en las muestras. Debido a las propiedades fisicoquímicas de la queratina presente en las plumas.
- Desde una perspectiva de sostenibilidad y economía circular, las plumas de pollo se destacan como una alternativa de bajo costo, biodegradable y que valoriza un residuo abundante de la industria avícola, presentando ventajas frente a adsorbentes más costosos y de mayor impacto energético como el carbón activado, y mostrando una eficiencia comparable a otros materiales de bajo costo.

5.2 Recomendaciones

- Para la recolección del material se sugiere hacer un tratamiento adicional al lavado con agua destilada con el fin de eliminar posibles patógenos dentro de las plumas que puedan interferir en los procesos de adsorción.
- Debido a que en este estudio no se hizo el aprovechamiento de toda la pluma de pollo, usando solo las barbillas de las plumas, se generó otro residuo que es el raquis. Este material al ser más denso y rígido que las barbillas, podría hacer una transformación en carbón activado, mediante procesos de activación térmica o química.
- Como resultados de las pruebas de adsorción se genera un residuo contaminado que representa un riesgo ambiental. Por ello se recomienda explorar estrategias de biorremediación como una alternativa sostenible para el tratamiento de este residuo, se sugiere una aplicación de microorganismos con capacidad de degradar compuestos como los hidrocarburos en las plumas. Esto permite no solo reducir la carga contaminante del residuo, sino también evaluar la posibilidad de reutilizar el material adsorbente una vez descontaminado.
- Se recomienda que durante el proceso de filtración dado que se observó la adherencia del crudo a las paredes del sistema, evaluar el uso de recubrimientos internos que reduzcan la acumulación de hidrocarburos. Asimismo, se sugiere implementar protocolos de limpieza utilizando solventes orgánicos, que permitan remover los residuos sin comprometer el sistema.

Referencias

- [1] A. O. Ifelebuegu, T. V. Anh Nguyen, P. Ukotije-Ikwut, y Z. Momoh, «Liquid-phase sorption characteristics of human hair as a natural oil spill sorbent», *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 3, n.º 2, pp. 938-943, jun. 2015, doi: 10.1016/j.jece.2015.02.015.
- [2] E. S. Okeke *et al.*, «Emerging bio-dispersant and bioremediation technologies as environmentally friendly management responses toward marine oil spill: A comprehensive review», *J. Environ. Manage.*, vol. 322, p. 116123, nov. 2022, doi: 10.1016/j.jenvman.2022.116123.
- [3] The Use of Chicken Feather Waste as an Adsorbent for Crude Oil Clean Up from Polluted Water», *ResearchGate*, feb. 2025, doi: 10.9734/jaeri/2020/v21i330136.
- [4] M. Y. Triano Garcia, «Remoción de hidrocarburos mediante materiales queratinosos de acuerdo con el protocolo ASTM F 726-99», Tesis de licenciatura, Instituto Tecnológico Superior de Misantla, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://rinacional.tecnm.mx/jspui/handle/TecNM/5195>
- [5] N. C. Duke, «Oil spill impacts on mangroves: Recommendations for operational planning and action based on a global review», *Mar. Pollut. Bull.*, vol. 109, n.º 2, pp. 700-715, ago. 2016, doi: 10.1016/j.marpolbul.2016.06.082.
- [6] A. V. E. Oviedo y B. G. J. Jojoa, «Afectación ambiental por atentados terroristas en Nariño», *Bol. Inf. CEI*, vol. 6, n.º 3, pp. 129-130, 2019.
- [7] N. Florida Rofner, «Plumas: Implicancia ambiental y uso en la industria agropecuaria», *Rev. Investig. Altoandinas*, vol. 21, n.º 3, pp. 225-237, 2019, doi: <https://doi.org/10.18271/ria.2019.480>.
- [8] O. David, Q. Curvelo, G. A. E. Humberto, H. Diaz, y W. Alexander, «Procesamiento de plumas de pollo para la obtención de queratina», oct. 2017, doi: <http://10.18634/ugcj.23v.0i.767>.

- [9] A. Romero-Balboa-Osorio *et al.*, «Importancia del Benzo(a)pireno en los sistemas biológicos y su biodegradación», *Terra Latinoam.*, vol. 41, dic. 2023, doi: 10.28940/terra.v41i0.1719.
- [10] M. Ince, O. K. Ince, M. Ince, y O. K. Ince, «Introductory Chapter: Sources, Health Impact, and Environment Effect of Hydrocarbons», en *Hydrocarbon Pollution and its Effect on the Environment*, IntechOpen, 2019. doi: 10.5772/intechopen.89039.
- [11] U. Naeem y M. A. Qazi, «Leading edges in bioremediation technologies for removal of petroleum hydrocarbons», *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 27, n.º 22, pp. 27370-27382, ago. 2020, doi: 10.1007/s11356-019-06124-8.
- [12] F. Mapelli *et al.*, «Biotechnologies for Marine Oil Spill Cleanup: Indissoluble Ties with Microorganisms», *Trends Biotechnol.*, vol. 35, n.º 9, pp. 860-870, sep. 2017, doi: 10.1016/j.tibtech.2017.04.003.
- [13] P. R. Ukotije-Ikwut, A. K. Idogun, C. T. Iriakuma, A. Aseminaso, y T. Obomanu, «A novel method for adsorption using human hair as a natural oil spill sorbent», *Int J Sci Eng Res*, vol. 7, pp. 1754-1765, 2016.
- [14] A. C. Espino Mejía, «Uso de adsorbentes naturales (cabello humano y plumas de pollo) para reducir el petroleo en cuerpos de agua sintetica, 2018», *Univ. César Vallejo*, 2018, Accedido: 27 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/32858>
- [15] Adsorption Phenomena: Definition, Mechanisms, and Adsorption Types: Short Review», ResearchGate. Accedido: 25 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/354849653_Adsorption_Phenomena_Definition_Mechanisms_and_Adsorption_Types_Short_Review
- [16] N. K. Lazaridis y D. D. Asouhidou, «Kinetics of sorptive removal of chromium(VI) from aqueous solutions by calcined Mg–Al–CO₃ hydrotalcite», *Water Res.*, vol. 37, n.º 12, pp. 2875-2882, jul. 2003, doi: 10.1016/S0043-1354(03)00119-2.
- [17] M. C. Otálora Trujillo y E. F. Sierra Gaviria, «Evaluación del proceso de intercambio iónico en la recuperación de cianuro libre en efluentes mineros auríferos», Thesis, Uniautónoma del Cauca. Facultad de Ciencias Ambientales y Desarrollo Sostenible. Programa de Ingeniería Ambiental y Sanitaria, 2021. Accedido: 28 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.uniautonoma.edu.co:8080/xmlui/handle/123456789/658>

- [18] H. Freundlich, «Über die Adsorption in Lösungen», *Z. Für Phys. Chem.*, vol. 57U, n.º 1, pp. 385-470, oct. 1907, doi: 10.1515/zpch-1907-5723.
- [19] I. Langmuir, «THE CONSTITUTION AND FUNDAMENTAL PROPERTIES OF SOLIDS AND LIQUIDS. II. LIQUIDS.1», ACS Publications. Accedido: 27 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/ja02254a006>
- [20] N. Ayawei, A. N. Ebelegi, y D. Wankasi, «Modelling and Interpretation of Adsorption Isotherms», *J. Chem.*, vol. 2017, p. e3039817, sep. 2017, doi: 10.1155/2017/3039817.
- [21] M. Vigdorowitsch, I. der S. 2 Angara GmbH, L. E. Tsygankova, y P. N. Bernatsky, «To the Mathematical Theory of the Temkin Adsorption Mode», *J. Appl. Solut. Chem. Model.*, vol. 9, p. 6, 2020, doi: 10.1016/0013-4686(73)80046-5.
- [22] R. A. Azaña Felix y A. M. Román Chuquillanqui, «Almohadilla de pluma de pollo para la remoción de agua contaminada por desembarque de petróleo crudo -Muelle Dársena, Callao 2019», *Repos. Inst. - UCV*, 2019, Accedido: 19 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/58029>
- [23] C. Lezama-Cervantes, «Capacidad de retención de hidrocarburos empleando subproductos industriales», *Rev. Latinoam. Recur. Nat.*, vol. 8, n.º 1, pp. 21-29, ene. 2012.
- [24] C. F. Santos, Ribeiro ,Ivan Célio Andrade, Pelegriño ,Marcelo Henrique Procópio, Carneiro ,João Paulo, y B. M. and Silva, «A Simple Gravimetric Methodology to Determine Soil Particle Density», *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, vol. 53, n.º 13, pp. 1623-1629, jul. 2022, doi: 10.1080/00103624.2022.2063310.
- [25] J. Izquierdo Bautista y J. J. Arévalo, «Determinación del carbono orgánico por el método químico y por calcinación», *Ing. Región*, n.º 26, pp. 20-28, 2021.
- [26] C. H. Giles, D. Smith, y A. Huitson, «A general treatment and classification of the solute adsorption isotherm. I. Theoretical», *J. Colloid Interface Sci.*, vol. 47, n.º 3, pp. 755-765, jun. 1974, doi: 10.1016/0021-9797(74)90252-5.
- [27] S. R. Korake y P. D. Jadhao, «Investigation of Taguchi optimization, equilibrium isotherms, and kinetic modeling for cadmium adsorption onto deposited silt», *Heliyon*, vol. 7, n.º 1, ene. 2021, doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e05755.
- [28] Y.-S. Ho, «Review of second-order models for adsorption systems», *J. Hazard. Mater.*, vol. 136, n.º 3, pp. 681-689, ago. 2006, doi: 10.1016/j.jhazmat.2005.12.043.

- [29] J. O. Vinhal, K. K. Nege, M. R. Lage, J. W. de M. Carneiro, C. F. Lima, y R. J. Cassella, «Adsorption of the herbicides diquat and difenzoquat on polyurethane foam: Kinetic, equilibrium and computational studies», *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, vol. 145, pp. 597-604, nov. 2017, doi: 10.1016/j.ecoenv.2017.08.005.
- [30] S. E. Agarry, Owabor, C. N., y A. O. and Ajani, «Modified Plantain Peel as Cellulose-Based Low-Cost Adsorbent for the Removal of 2,6-Dichlorophenol from Aqueous Solution: Adsorption Isotherms, Kinetic Modeling, and Thermodynamic Studies», *Chem. Eng. Commun.*, vol. 200, n.º 8, pp. 1121-1147, ago. 2013, doi: 10.1080/00986445.2012.740534.
- [31] K. Petersen, R. Feldt, S. Mujtaba, y M. Mattsson, «Systematic Mapping Studies in Software Engineering», presentado en 12th International Conference on Evaluation and Assessment in Software Engineering (EASE), BCS Learning & Development, jun. 2008. doi: 10.14236/ewic/EASE2008.8.
- [32] T. Tesfaye, B. Sithole, D. Ramjugernath, y V. Chuniilall, «Valorisation of chicken feathers: Characterisation of physical properties and morphological structure», *J. Clean. Prod.*, vol. 149, pp. 349-365, abr. 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.02.112.
- [33] W. J. Weber, *Physicochemical processes for water quality control*. New York, Wiley-Interscience, 1972. Accedido: 15 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <http://archive.org/details/physicochemicalp0000webe>
- [34] S. I. Garcés-Polo, G. de Jesús Camargo Vargas, P. R. Estupiñán, D. F. Hernández-Barreto, L. Giraldo, y J. C. Moreno-Piraján, «CO₂ adsorption on carbonaceous materials obtained from forestry and urban waste materials: a comparative study», *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 31, n.º 28, pp. 40208-40223, jun. 2024, doi: 10.1007/s11356-023-30300-6.
- [35] A. G. Adeniyi *et al.*, «Investigating the properties and agronomic benefits of onion peel and chicken feather-derived biochars», *Heliyon*, vol. 10, n.º 15, p. e35485, ago. 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e35485.
- [36] Structure and Properties of Chicken Feather Barbs as Natural Protein Fibers», *ResearchGate*, ago. 2025, doi: 10.1007/s10924-007-0054-7.
- [37] P. E. Domínguez Mora, «Eficiencia del uso de plumas de pollo y aserrín para la remoción de diésel en el mar del Callao - 2017», *Univ. César Vallejo*, 2017, Accedido: 6 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/20708>

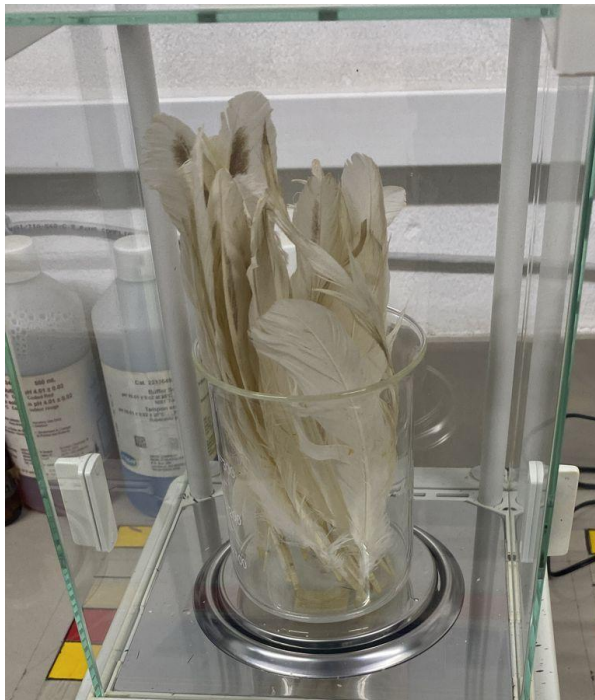
- [38] E. S. Okeke *et al.*, «Emerging bio-dispersant and bioremediation technologies as environmentally friendly management responses toward marine oil spill: A comprehensive review», *J. Environ. Manage.*, vol. 322, p. 116123, nov. 2022, doi: 10.1016/j.jenvman.2022.116123.
- [39] M. L. Montes *et al.*, «Biomass-clay complexes for Sr^{2+} and Co^{2+} removal: New insights on sorption and separation properties of the sorbents», *J. Dispers. Sci. Technol.*, vol. 44, n.º 11, pp. 2169-2179, sep. 2023, doi: 10.1080/01932691.2022.2063886.
- [40] C. Modrogon, «Application of Langmuir and Freundlich isotherms to predict adsorbate removal efficiency or required amount of adsorbent», *J. Ind. Eng. Chem.*, ene. 2015, doi: 10.1016/J.JIEC.2015.02.021.
- [41] «Influencia de cantidad de plumas de pollo y tiempo de agitación en la adsorción de hidrocarburos de petróleo en agua». Accedido: 18 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://dspace.unitru.edu.pe/items/332119c9-60b6-48aa-b345-94b3c647f2d0>
- [42] J. Wang y X. Guo, «Adsorption kinetic models: Physical meanings, applications, and solving methods», *J. Hazard. Mater.*, vol. 390, p. 122156, may 2020, doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.122156.
- [43] Kinetics Studies for the Adsorption of Aqueous Cu (II) and Pb (II) Ions onto Chicken Feather», *ResearchGate*, Accedido: 18 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/341607031_Kinetics_Studies_for_the_Adsorption_of_Aqueous_Cu_II_and_Pb_II_Ions_onto_Chicken_Feather
- [44] J.-P. Simonin, «On the comparison of pseudo-first order and pseudo-second order rate laws in the modeling of adsorption kinetics», *Chem. Eng. J.*, vol. 300, pp. 254-263, sep. 2016, doi: 10.1016/j.cej.2016.04.079.
- [45] B. E. Eboibi *et al.*, «Bio-sorptive remediation of crude oil polluted sea water using plantain (*Musa parasidiaca*) leaves as bio-based sorbent: Parametric optimization by Taguchi technique, equilibrium isotherm and kinetic modelling studies», *Heliyon*, vol. 9, n.º 11, p. e21413, nov. 2023, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e21413.
- [46] W. Plazinski, J. Dziuba, y W. Rudzinski, «Modeling of sorption kinetics: the pseudo-second order equation and the sorbate intraparticle diffusivity», *Adsorption*, vol. 19, n.º 5, pp. 1055-1064, oct. 2013, doi: 10.1007/s10450-013-9529-0.

- [47] J. O. Vinhal, K. K. Nege, M. R. Lage, J. W. de M. Carneiro, C. F. Lima, y R. J. Cassella, «Adsorption of the herbicides diquat and difenzoquat on polyurethane foam: Kinetic, equilibrium and computational studies», *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, vol. 145, pp. 597-604, nov. 2017, doi: 10.1016/j.ecoenv.2017.08.005.
- [48] Comparative study of the batch adsorption kinetics and mass transfer in phenol-sand and phenol-clay adsorption systems», *ResearchGate*, Accedido: 13 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/333251468_Comparative_study_of_the_batch_adsorption_kinetics_and_mass_transfer_in_phenol-sand_and_phenol-clay_adsorption_systems
- [49] «Full article: Leachability and plant-availability of phosphorus in post-sorption wastewater filters fortified with biochar». Accedido: 6 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/09593330.2018.1483973>
- [50] M. Shigei, Herbert ,Roger B., Persson ,Frank, Sokolova ,Ekaterina, y S. S. and Dalahmeh, «Efficient removal of organic matter and nitrogen from municipal wastewater in multi-module biochar filters for onsite wastewater treatment», *Environ. Technol.*, vol. 46, n.º 9, pp. 1531-1543, abr. 2025, doi: 10.1080/09593330.2024.2402096.
- [51] F. Rincones Poyer, S. M. Valladares, J. Á. Danglad Flores, y V. Salazar Palencia, «Adsorción de hidrocarburos de petróleo en agua mediante una columna empacada con bagazo de caña de azúcar», *Saber*, vol. 27, n.º 3, pp. 441-453, sep. 2015.
- [52] V. Bosscher, D. A. Lytle, M. R. Schock, A. Porter, y M. Del Toral, «POU water filters effectively reduce lead in drinking water: a demonstration field study in flint, Michigan», *J. Environ. Sci. Health Part A*, vol. 54, n.º 5, pp. 484-493, abr. 2019, doi: 10.1080/10934529.2019.1611141.
- [53] Y. Al-Wazzan, M. Ahmed, M. Al-Tabtabaei, y A. Al-Mesri, «Pretreatment approach for the high turbid seawater using decanter centrifuge-microfiltration hybrid system», *Desalination Water Treat.*, vol. 262, pp. 89-99, jun. 2022, doi: 10.5004/dwt.2022.28516.
- [54] J. Lugo-Arias, J. Burgos-Vergara, E. Lugo-Arias, A. Gould, y D. Ovallos-Gazabon, «Evaluation of low-cost alternatives for water purification in the stilt house villages of Santa Marta's Ciénaga Grande», *Heliyon*, vol. 6, n.º 1, p. e03062, ene. 2020, doi: 10.1016/j.heliyon.2019.e03062.

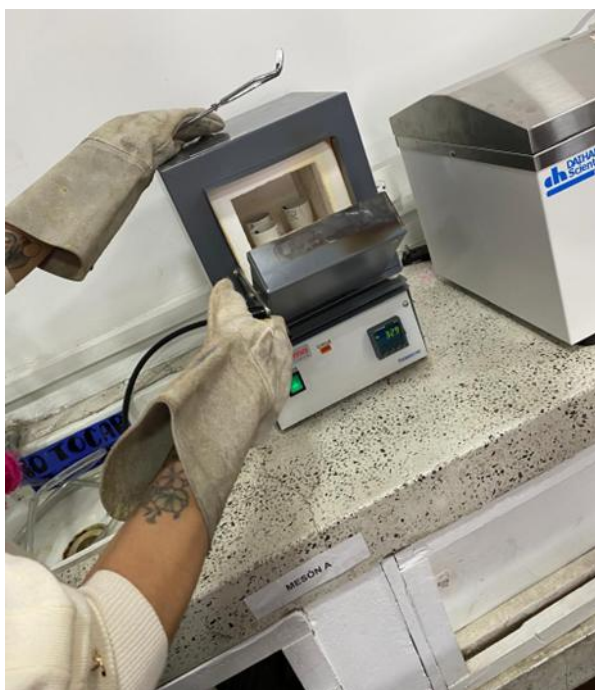
- [55] Column-based removal of high concentration microplastics in synthetic wastewater using granular activated carbon», *ResearchGate*, Accedido: 12 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/375523849_Column-based_removal_of_high_concentration_microplastics_in_synthetic_wastewater_using_granular_activated_carbon
- [56] G. A. Quintero-Curvelo, W. A. Huertas-Díaz, y E. Ortega-David, «Procesamiento de plumas de pollo para la obtención de queratina».
- [57] Removing Crude Oil from Water by Activated Carbon Prepared From Dried Papyrus Plant», *ResearchGate*, doi: 10.21608/ejchem.2021.79030.3868.

Anexos

Anexo 1 Peso de las muestras en balanza analítica



Anexo 2 Determinación de carbono orgánico por mufla



Anexo 3 Pruebas en batch en el shaker

