



“REMOCIÓN DE XENOBIÓTICOS EMPLEANDO FIBRAS DE CARBÓN DERIVADAS DE PLUMA DE POLLO”

**TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA QUÍMICA**

PRESENTA:
ING. GIANELLA CAROLINA CUENCA BUELE

DIRECTORA DE TESIS:
DRA. DIDILIA ILEANA MENDOZA CASTILLO

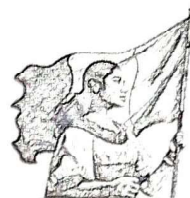
Aguascalientes, Ags., Enero de 2025



Educación
Secretaría de Educación Pública



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



Instituto Tecnológico de Aguascalientes
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Aguascalientes, Ags, 16/enero/2025

Oficio No. DEPI 016/2025

Asunto: Autorización impresión tesis

C. GIANELLA CUENCA BUELE
PRESENTE

Los abajo firmantes, Miembros del Jurado para Examen de Grado de Maestría, hacemos **constar** que, habiendo revisado el Trabajo de Tesis desarrollado por Usted, bajo el título: **"Remoción de xenobióticos empleando fibras de carbón derivadas de pluma de pollo"**, hemos dictaminado que éste es de aceptarse, por lo que se autoriza su impresión.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®
Ingenio, Cultura y Saber, que conducen a la Excelencia®

PRESIDENTE

DRA. DIDILIA ILEANA MENDOZA CASTILLO

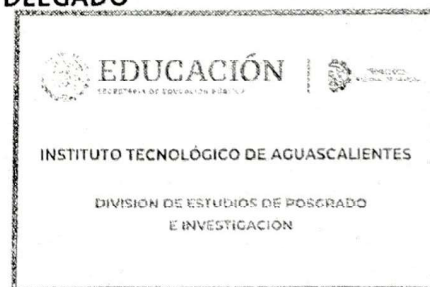
SECRETARIO

DRA. HILDA ELIZABETH REYNEL ÁVILA

VOCAL

DR. FELIPE DE JESÚS VILLALOBOS DELGADO

ccp. Archivo
JFLH/yevo



Av. Adolfo López Mateos #1801 Fracc. Bona Gens C.P. 20256 Aguascalientes, Ags. Tel. 449 9105002 Ext. 127
e-mail: jefatura.depi@aguascalientes.tecnm.mx tecnm.mx | www.aguascalientes.tecnm.mx





Instituto Tecnológico de Aguascalientes
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Aguascalientes, Ags., **12/diciembre/2024**
Asunto: Autorización de uso de derechos

Gianella Carolina Cuenca Buele, mayor de edad, con domicilio ubicado en Vicente Suárez 207, Colonia Héroes, en mi calidad de titular y autor de la tesis denominada Remoción de xenobióticos empleando fibras de carbón derivadas de pluma de pollo quien para todos los fines del presente documento se denominará **EL AUTOR Y/O TITULAR**, suscribo el presente documento de autorización de uso de derechos patrimoniales de autor a favor del Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Aguascalientes el cual se regirá por las cláusulas siguientes:

PRIMERA – AUTORIZACIÓN: **EL AUTOR Y/O TITULAR**, mediante el presente documento autoriza la utilización de los derechos patrimoniales de autor al Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Aguascalientes, de la tesis denominada Remoción de xenobióticos empleando fibras de carbón derivadas de pluma de pollo, a través del Repositorio Institucional del Tecnológico Nacional de México (en lo sucesivo TecNM) y en el Repositorio Nacional, que puede ser consultado en la liga electrónica: (www.repositorionacionalcti.mx/).

SEGUNDA – OBJETO: Por medio del presente escrito, **EL AUTOR Y/O TITULAR** autoriza al Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Aguascalientes, a través del Repositorio Institucional del TecNM y en el Repositorio Nacional para que de conformidad con la Ley Federal del Derecho de Autor y la Ley de la Propiedad Industrial, use los derechos del documento antes referido, con fines exclusivamente académicos.

TERCERA – TERRITORIO: Los derechos aquí autorizados se dan sin limitación geográfica o territorial alguna.

CUARTA – ALCANCE: La presente autorización se da tanto para formato o soporte material, y se extiende a la utilización en medio óptico, magnético, electrónico, en red, mensajes de datos o similar conocido o por conocer, del ejemplar o número respectivo de la publicación.

QUINTA – EXCLUSIVIDAD: La autorización de uso aquí establecida no implica exclusividad en favor del Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Aguascalientes. Por lo tanto, **EL AUTOR Y/O TITULAR** en su carácter de autor de la obra objeto del presente documento se reserva el derecho de publicar directamente, u otorgar a cualquier tercero, autorizaciones de uso similares o en los mismos términos aquí acordados.

SEXTA – DERECHOS MORALES (Créditos y mención): La Autorización de los derechos antes mencionados no implica la cesión de los derechos morales sobre los mismos por cuanto en conformidad con lo establecido en los artículos 18, 19, 20, 21, 22 y 23 de la Ley Federal de Derechos de Autor, dada la cuenta que estos derechos son inalienables, imprescriptibles, irrenunciables e inembargables. Por lo tanto, los mencionados derechos seguirán radicados en cabeza de **EL AUTOR Y/O TITULAR**, y siempre deberá mencionarse su nombre cuando se utilice la obra.





Educación
Secretaría de Educación Pública



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



Instituto Tecnológico de Aguascalientes
División de Estudios de Posgrado e Investigación

SÉPTIMA – AUTORÍA: EL AUTOR Y/O TITULAR, declara y ratifica que el material objeto de la presente fue realizada por él o por ella sin violar o usurpar derechos de Propiedad Intelectual de terceros.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®

Ingenio, Cultura y Saber, que conducen a la Excelencia

Gianella Carolina Cuenca Buele

AUTOR DE LA TESIS

Vo.Bo.

Didilia Ileana Mendoza Castillo

DIRECTOR DE LA TESIS

ccp. Archivo



Av. Adolfo López Mateos #1801 Fracc. Bona Gens C.P. 20256 Aguascalientes, Ags. Tel. 449 9105002 Ext. 127
e-mail: jefatura.depi@aguascalientes.tecnm.mx tecnm.mx | www.aguascalientes.tecnm.mx



CARTA CESION DE DERECHOS

En la Ciudad de Aguascalientes, el (la) que suscribe GIANELLA CAROLINA CUENCA BUELE estudiante de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Química, adscrito al Tecnológico Nacional de México-Instituto Tecnológico de Aguascalientes, manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección de DIDILIA ILEANA MENDOZA CASTILLO y cede los derechos del trabajo REMOCIÓN DE XENOBIÓTICOS EMPLEANDO FIBRAS DE CARBÓN DERIVADAS DE PLUMA DE POLLO, al Tecnológico Nacional de México – Instituto Tecnológico de Aguascalientes para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.



Gianella Carolina Cuenca Buele

DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD Y DE NO PLAGIO

En la Ciudad de Aguascalientes, el (la) que suscribe GIANELLA CAROLINA CUENCA BUELE estudiante de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Química, adscrito al Tecnológico Nacional de México-Instituto Tecnológico de Aguascalientes, manifiesta que se responsabiliza de la autenticidad y originalidad del presente trabajo REMOCIÓN DE XENOBIÓTICOS EMPLEANDO FIBRAS DE CARBÓN DERIVADAS DE PLUMA DE POLLO el cual ha sido presentado para la obtención del grado correspondiente.



Gianella Carolina Cuenca Buele

Resumen

En este estudio se emplearon plumas de pollo para la obtención de fibras de carbón mediante tratamiento térmico de dos pasos. Se probaron dos rutas de síntesis, y con base en el desempeño de adsorción de plomo de las fibras obtenidas se seleccionó al mejor material para evaluarlo en la remoción de metales pesados, colorantes y fármacos. Paralelamente, se hicieron estudios de adsorción de los contaminantes de interés con la biomasa usada como precursor. Bajo las condiciones experimentales consideradas en el estudio las capacidades de adsorción de los contaminantes orgánicos fueron ≤ 0.025 mmol/g, mientras que para la adsorción de hierro sí fueron competitivas. Por tanto, se hicieron estudios de equilibrio para este catión a 30 y 40 °C. Las capacidades de adsorción oscilaron entre 0.04 – 0.41 mmol/g para las plumas de pollo y entre 0.06 – 0.41 mmol/g para las fibras de carbón. Los materiales saturados con hierro se aprovecharon para remover fluoruros a 30 y 40 °C. Para este contaminante las capacidades de adsorción de la biomasa y las fibras de carbón variaron entre 0.07 – 1.43 mmol/g y 0.04 – 1.62 mmol/g, respectivamente. Para ambos contaminantes el proceso de adsorción es endotérmico y de naturaleza física. Los datos de equilibrio de los diferentes sistemas estudiados fueron correlacionados con las ecuaciones de Langmuir y Freundlich, y de acuerdo con los valores de la función objetivo, coeficiente de determinación y porcentaje de error promedio, el modelo de Langmuir mostró el mejor desempeño. La caracterización fisicoquímica de los adsorbentes sugiere que el tratamiento térmico no daña la estructura de la queratina, pero sí brinda soporte para que las plumas mantengan su estructura fibrosa. Los difractogramas de rayos X indicaron que los adsorbentes presentan una estructura semicristalina que corresponde a la lámina β de la queratina para las plumas de pollo, y a carbono grafitico en las fibras de carbón. Se identificó la presencia de goetita en las fibras de carbón después de la adsorción de hierro, y no se observó un cambio en la cristalinidad del adsorbente asociada a la presencia de fluoruros. Finalmente, se contribuyó con el desarrollo de tecnologías sostenibles para el tratamiento de aguas contaminadas y con la implementación de estrategias que promueven la economía circular.

Por: Ing. Gianella Carolina Cuenca Buele

Dirigida por: Dra. Didilia Ileana Mendoza Castillo

Dedicatoria

A toda mi familia, en especial a mis padres, que siempre me apoyaron, creyeron en mí y con su gran amor me guiaron. Estuvieron en cada pequeño y gran paso de ésta y todas las etapas de mi vida. Este logro lo comparto con ustedes, porque el día que empaqué lo más importante para iniciar una nueva aventura en México, me traje un pedacito de sus corazones para lograrlo juntos. Somos un equipo para siempre.

“Ve y deja tu hermosa huella, y mientras lo haces colócate del lado de la audacia. Si te equivocas, que sea por demasiada audacia, y no por muy poca. Porque realmente eres suficiente. Tienes fuerzas y recursos incalculables en tu interior. Tienes tu yo glorioso”.

Sue Monk Kidd

Agradecimientos

*A **Dios**, gracias por ser mi fuerza, guía y el mejor maestro en toda esta aventura, por cuidarme y guardar a los míos en mi ausencia. Por enseñarme que cada temporada es necesaria y que en cada una de ellas eres un buen Dios. Gracias Papá.*

*A mi familia: **Estelita**, mi preciosa madre, mi fuente de inspiración, quien desde pequeña me enseñó que fui creada para conquistar el mundo, que todo es posible para el que cree, gracias por sus abrazos que me fortalecen y aún a la distancia se sintieron tan cerca. **Aníbal**, mi amado padre, quien con su carácter siempre ha sido un ejemplo para mí, por creer en mí, levantar mis brazos cuando el desánimo parece acercarse y no dejarme caer. **Mi papito Segundo**, mi abuelo materno, por recordarme lo capaz que soy, confiar en mí y sus palabras de ánimo. **Ricardo**, mi abuelo paterno, por siempre elevar una oración para que todo me salga bien. **Lucía, Klever y***

***Marta**, mis tíos maternos, gracias por siempre estar al pendiente de mi bienestar, por alentarme y velar por mí. **Jhordan y Ronald**, mis ñañitos, que en sus tiempos y formas siempre estuvieron al pie del cañón conmigo, por expresarme lo orgullosos que están de mí y ser un pilar importante en toda esta travesía.*

*A mis hermosas amigas: **Andrea R, Daniela, Andrea C, Thalía y Salomé**, que en estos dos años estuvieron acompañándome a miles de kilómetros, la distancia y el tiempo jamás fueron impedimento para hacerme sentir escuchada, apoyada y amada.*

A quienes fueron mis profesores de maestría, directora y codirectora de tesis, por impartirme sus conocimientos y depositar su confianza en mí.

Se agradece el apoyo del Laboratorio Nacional de Materiales Porosos - MatPore y de la Red Iberoamericana para la valorización y aprovechamiento sustentable de biomasas (IberBiomasa).

A los amigos y compañeros que hice en este camino, por mostrarme un poco de cada una de sus culturas, por los tiempos compartidos y por todo el apoyo que nos brindamos en este proceso. Y, por último, quiero agradecer a quien decidió sacudirse el polvo y continuar a pesar de las adversidades, que inició con un poco de miedo, dudas, nostalgia y termina este camino siendo más segura, sabia, fuerte y valiente. Gracias Gianella, tu niña interior llena de sueños e ilusiones está sumamente orgullosa de ti.

En memoria de:

***Zoilita**, mi segunda mamá, cada uno de los días te recordé y traje a mi memoria tus sabias palabras llenas de amor, este logro también es tuyo, gracias porque hiciste de mí una mujer tan fuerte como tú.*

Índice General

Capítulo 1. Introducción	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Objetivos.....	1
1.3 Justificación.....	3
Capítulo 2. Marco teórico.....	4
Capítulo 3. Metodología	9
3.1 Síntesis de fibras de carbón empleando plumas de pollo.....	9
3.2 Estudios de adsorción de xenobióticos empleando fibras de carbón obtenidas a partir de plumas de pollo.	9
3.3 Caracterización fisicoquímica de las fibras de carbón y las fibras de las plumas.	11
3.4 Correlación de los datos de equilibrio con distintos modelos de isothermas de adsorción.....	11
Capítulo 4. Resultados.....	12
4.1 Evaluación del desempeño de adsorción de xenobióticos de las fibras de carbón obtenidas a partir de plumas de pollo y el precursor.....	12
4.2 Caracterización fisicoquímica de las fibras de carbón y las fibras de las plumas.....	18
Capítulo 5. Conclusiones y recomendaciones.	21
5.1 Conclusiones	21
5.2 Recomendaciones.....	21
Capítulo 6. Referencias bibliográficas.....	22

Índice de figuras

Figura 2.1. Anatomía de las plumas.....	5
Figura 3.1. Representación esquemática de las rutas de síntesis empleadas para la obtención de fibras de carbón empleando plumas de pollo.	9
Figura 4.1. Capacidades de adsorción de cationes, fármacos y colorantes usando fibras de carbón y plumas de pollo como adsorbentes.....	13
Figura 4.2. Isotermas de adsorción de hierro a 30 y 40 °C usando plumas de pollo y fibras de carbón como adsorbentes.....	14
Figura 4.3. Isotermas de adsorción de fluoruros a 30 y 40 °C usando plumas de pollo y fibras de carbón saturadas con hierro como adsorbentes.....	15
Figura 4.4. Capacidades de adsorción experimentales vs. calculadas y análisis de errores relativos de las isotermas de Langmuir y Freundlich para la adsorción de hierro y fluoruros a 30 y 40 °C, usando PN, FC-R2, Fe-PN y Fe-FP como adsorbentes.....	17
Figura 4.5. Espectros de infrarrojo de las plumas de pollo y fibras de carbón antes y después del proceso de adsorción de hierro y fluoruros.....	18
Figura 4.6. Difractogramas de rayos X de las plumas de pollo y fibras de carbón antes y después del proceso de adsorción de hierro y fluoruros.....	19

Índice de tablas

Tabla 2.1. Capacidades máximas de adsorción de diferentes xenobióticos usando plumas de pollo como adsorbente.	6
Tabla 2.2. Capacidades máximas de adsorción de diferentes xenobióticos empleando adsorbentes a base de carbón y carbones activados sintetizados a partir de plumas de pollo.....	8
Tabla 4.1. Resultados del ajuste de las isothermas de Langmuir y Freundlich usadas en la correlación de los datos de equilibrio de adsorción de hierro y fluoruros empleando PN, FC-R2, Fe-PN y Fe-FP como adsorbentes.....	16

Capítulo 1. Introducción

1.1 Antecedentes

La presencia de compuestos orgánicos, productos químicos emergentes, metales pesados y materia orgánica recalcitrante en las fuentes de agua potable y cuerpos de agua naturales ha aumentado drásticamente debido al crecimiento industrial y demográfico sin control, y representa una seria amenaza para la salud humana y los ecosistemas acuáticos (Suleiman y col., 2024). Estos xenobióticos incluyen una amplia variedad de sustancias como pesticidas, fármacos, compuestos industriales, metales pesados, hidrocarburos, productos de higiene personal, productos químicos de uso doméstico e industrial, compuestos arrastrados por escorrentías, entre otros, y al ser introducidos en los cuerpos de agua pueden tener efectos perjudiciales sobre los ecosistemas acuáticos y la salud humana (Thakur y col., 2023). Aunque algunos de los métodos de desinfección de agua puedan mitigar algunos de estos problemas, estos métodos de tratamiento generalmente requieren el uso de productos químicos y gran cantidad de energía (Jagaba y col., 2023). En este contexto, la búsqueda de nuevas tecnologías o alternativas para el tratamiento de agua es necesaria para poder satisfacer los requerimientos de calidad de agua para su uso y para asegurar la protección del medio ambiente (Jagaba y col., 2023).

Entre las técnicas empleadas para eliminar contaminantes del agua destaca el proceso de adsorción por ser un método eficiente, versátil, selectivo (ya que permite la remoción de contaminantes específicos) y eficaz para la remoción de contaminantes que se encuentran en bajas concentraciones (Bonilla-Petriciolet y col., 2019). Además, la posibilidad de reutilizar los adsorbentes también es un punto destacable, ya que el material puede ser regenerado mediante desorción térmica o química, lo que reduce los costos operativos y mejora la sostenibilidad de dicho proceso de separación (Gali y Beljonne, 2021). Por otra parte, la amplia disponibilidad de materiales que pueden ser usados como adsorbentes, así como el bajo costo que pueden tener es otro punto destacable, ya que su obtención y procesamiento requieren tecnologías relativamente simples y económicas (Bonilla-Petriciolet y col., 2019).

En forma particular, diversos materiales que son abundantes en la naturaleza, incluyendo algunos residuos industriales, urbanos, agrícolas y avícolas pueden ser transformados en adsorbentes. Por ejemplo, los desechos avícolas tienen un alto contenido de materia orgánica, nutrientes y queratina que pueden aprovecharse en la remoción de contaminantes del agua (Zhang y col., 2023). Específicamente, las plumas son un residuo biodegradable, renovable y disponible que se genera en grandes cantidades (~15000 millones de toneladas al año), ya que representan el 5-10% del peso corporal del ave (Fagbemi y Sithole, 2021; Zhang y col., 2023). Dicha biomasa está compuesta principalmente de queratina (~85-99% del peso total de las plumas secas), la cual es una proteína insoluble que contiene una gran cantidad de grupos amino, grupos carboxilo y

otros grupos funcionales, que sirven como sitio de adsorción para diversos contaminantes orgánicos e inorgánicos (Sharma y col., 2019; Zhu y col., 2020). Sin embargo, si las plumas de pollo no se gestionan adecuadamente, pueden contribuir a la contaminación ambiental y a la proliferación de enfermedades, ya que pueden contener patógenos y microorganismos (Zhang y col., 2023). Además, pueden liberar contaminantes como amoníaco, óxido nitroso y sulfuro de hidrógeno (Zhang y col., 2023).

Una alternativa para hacer frente a esta problemática es someter la biomasa a tratamiento térmico. Sin embargo, una temperatura elevada puede provocar la pérdida de los grupos funcionales, y por consecuencia, reducir el desempeño de adsorción de la biomasa (Zinina y col., 2022). Considerando lo anterior, en este estudio se sintetizaron fibras de carbón mediante tratamiento térmico de dos pasos empleando plumas de pollo para su aplicación como adsorbente de xenobióticos en agua. Dichos xenobióticos incluyeron metales pesados (plomo, hierro, cadmio, níquel y zinc), colorantes (rojo amaranto, amarillo crepúsculo, azul de bromo fenol, cristal violeta y negro reactivo 5) y fármacos (naproxeno, diclofenaco y acetaminofeno), ya que este conjunto de contaminantes son tóxicos, disminuyen la calidad del agua, afectan los ecosistemas y pueden dejar efectos a largo plazo sobre la salud humana y el medio ambiente. Cabe mencionar que de acuerdo con la literatura una síntesis de dos pasos permite mejorar la naturaleza porosa de las fibras y hacerlas resistentes a altas temperaturas, además de conservar la estructura fibrosa de la biomasa (Senoz y Wool, 2010). Por otra parte, se hizo un análisis comparativo del desempeño de adsorción de las fibras de carbón resultantes y el precursor, se llevaron a cabo experimentos de adsorción detallados a fin de comprender los mecanismos de adsorción subyacentes, y se evaluó el desempeño de los adsorbentes a diferentes condiciones de temperatura. Los resultados obtenidos en esta investigación tienen una contribución significativa al desarrollo de tecnologías sostenibles para el tratamiento de aguas contaminadas, promueven la valorización de desechos orgánicos de la industria avícola, y contribuyen a la economía circular y a la mitigación de la contaminación ambiental.

1.2 Objetivos

El objetivo general de este estudio es sintetizar fibras de carbón empleando plumas de pollo para la adsorción de xenobióticos del agua, mientras que los objetivos específicos planteados para este proyecto son:

1. Sintetizar fibras de carbón utilizando plumas de pollo como precursor, mediante tratamiento térmico de dos pasos.
2. Evaluar la capacidad de adsorción de las fibras de carbón sintetizadas empleando diferentes xenobióticos.
3. Hacer un análisis comparativo del desempeño de adsorción de xenobióticos de las fibras de carbón y del material precursor.

4. Obtener isothermas de adsorción para los xenobióticos con mayor capacidad de adsorción empleando las fibras de carbón y el material precursor a diferentes condiciones de temperatura.
5. Calcular los parámetros termodinámicos asociados al proceso de adsorción de los xenobióticos bajo estudio empleando fibras de carbón y plumas de pollo.
6. Caracterizar los adsorbentes antes y después de los estudios de adsorción, empleando técnicas instrumentales avanzadas.
7. Correlacionar los datos experimentales del proceso de adsorción con distintos modelos de isothermas.

1.3 Justificación

La preservación del entorno ambiental y la búsqueda de soluciones sostenibles para atenuar el impacto adverso de las actividades antropogénicas en el ecosistema acuático emergen como una necesidad urgente de la contemporaneidad. Una perspectiva para abordar esta problemática se encuentra en la síntesis de adsorbentes utilizando materiales de desecho no aprovechados para reducir la presencia de compuestos nocivos en el agua. Particularmente, las plumas de pollo presentan atributos singulares (p.ej., insolubilidad en la mayoría de los solventes orgánicos, alta fuerza de tensión y resistencia a la abrasión) y atractivos para su aplicación en procesos de remediación ambiental. Sin embargo, una gestión inadecuada de este residuo puede contribuir a la contaminación ambiental y a la proliferación de enfermedades, ya que pueden contener patógenos y microorganismos.

Una alternativa para hacer frente a esta problemática es someter la biomasa a tratamiento térmico. Sin embargo, una temperatura elevada puede provocar la pérdida de los grupos funcionales, y por consecuencia, reducir su desempeño de adsorción. Por tanto, el presente estudio se enfocó en la síntesis de fibras de carbón mediante tratamiento térmico de dos pasos empleando plumas de pollo para la adsorción de xenobióticos del agua, y se hizo un análisis comparativo del desempeño de adsorción de las fibras de carbón resultantes y el precursor. A su vez, se impulsó la adopción de economía circular mediante la reutilización del material saturado con hierro para la adsorción de fluoruros, mitigando los problemas ambientales que surgen con la disposición de los adsorbentes después del proceso de adsorción. Finalmente, se contribuyó al desarrollo de tecnologías sostenibles para el tratamiento de aguas contaminadas con xenobióticos de diferente naturaleza.

Capítulo 2. Marco Teórico

La contaminación del agua es un desafío ambiental de magnitud global que compromete no solo la calidad de este recurso, sino también la sostenibilidad de los ecosistemas acuáticos y terrestres, la salud pública y el desarrollo socioeconómico (Hannah y col., 2022). Las fuentes de contaminación hídrica son múltiples y variadas, e incluyen descargas industriales, agrícolas y urbanas, vertido de aguas residuales sin tratamiento adecuado, acumulación de contaminantes emergentes, por mencionar algunos ejemplos (Morin-Crini y col., 2022). Entre los contaminantes más comunes se encuentran los compuestos orgánicos persistentes, metales pesados, pesticidas, herbicidas, fertilizantes y productos farmacéuticos (Morin-Crini y col., 2022). Algunos de estos contaminantes se caracterizan por poseer una estructura molecular compleja que ha sido diseñada intencionalmente para dotarlos de estabilidad y durabilidad, a fin de que cumplan su propósito funcional en procesos industriales, agrícolas o de consumo (Münzel y col., 2025). Sin embargo, estas mismas características dificultan su degradación por los mecanismos naturales de descomposición que ocurren en el medio ambiente, convirtiéndolos en contaminantes persistentes (Lin y col., 2022).

Debido a su persistencia y toxicidad, estos xenobióticos alteran los ciclos biogeoquímicos del agua (Kumar y col., 2024). Además, dichos compuestos pueden generar efectos acumulativos en las especies acuáticas, los organismos terrestres y, en última instancia, en los seres humanos (Lin y col., 2022). La bioacumulación de estos contaminantes a lo largo de los niveles tróficos representa un grave riesgo ecológico, ya que incluso concentraciones mínimas en el agua pueden desencadenar efectos tóxicos, mutagénicos y carcinogénicos en múltiples especies, afectando la biodiversidad y provocando disrupciones en los ecosistemas (Babuji y col., 2023). Por ejemplo, la eutrofización causada por el exceso de nutrientes como nitrógeno y fósforo provenientes de fertilizantes agrícolas ha dado lugar a la proliferación de algas nocivas y a la creación de zonas muertas en cuerpos de agua, donde los niveles de oxígeno son tan bajos que la vida acuática se ve seriamente comprometida (Ali y col., 2020). Los microplásticos (tanto de fuentes industriales como de productos de consumo cotidiano) han emergido como una amenaza para los océanos y sistemas de agua dulce, ya que afectan a los organismos que los ingieren y la calidad general del agua al servir como vectores de otros contaminantes químicos, tales como hidrocarburos aromáticos, compuestos organoclorados y metales pesados (Karbalaei y col., 2018).

Por otra parte, en muchas regiones del mundo, la escasez de infraestructuras de saneamiento y la falta de acceso a tecnologías avanzadas de tratamiento de aguas contribuyen a la perpetuación de este problema (Lin y col., 2022). Estas limitantes se acentúan especialmente en países en desarrollo, donde la capacidad para gestionar y mitigar la contaminación hídrica es limitada (Bolisetty y col., 2019; Islam, 2023). Aunado a lo anterior, las plantas de tratamiento

convencionales no están equipadas para enfrentar la creciente diversidad y complejidad de los contaminantes emergentes, los cuales pueden tener efectos adversos incluso en bajas concentraciones (Ahmad y col., 2019). Dichos inconvenientes plantean la necesidad urgente de avanzar en el desarrollo y/o la implementación de tecnologías más eficaces, económicas y sostenibles para la remoción de xenobióticos del agua (Suleiman y col., 2024). Entre las técnicas empleadas para eliminar contaminantes del agua destaca el proceso de adsorción por ser un método sencillo, fácil de implementar, altamente selectivo, versátil, y efectivo para la remoción de compuestos orgánicos e inorgánicos (Collivignarelli y col., 2019). Además, dicha alternativa permite el uso de múltiples minerales, materiales sintéticos y naturales como adsorbentes, o como materia prima para la obtención de estos.

A pesar de su alta eficiencia, el proceso de adsorción representa una transferencia de masa que no elimina la contaminación, ya que se forma un residuo adsorbente-adsorbato que generalmente no es tratado, por lo que es necesaria la implementación de adsorbentes que puedan ser biodegradados por microorganismos con capacidades enzimáticas específicas (Solís-Moreno y col., 2021). En forma particular, las plumas de pollo son un residuo biodegradable compuesto principalmente de queratina (~90%), en la cual las cadenas polipeptídicas están unidas por enlaces de hidrógeno y disulfuro (Solís-Moreno y col., 2021). A diferencia de otras fibras naturales o sintéticas, las plumas de pollo se componen de dos partes, las fibras (constituidas por púas y bárbulas) y el cálamo (eje central de la pluma, también conocido como raquis), ver Figura 2.1 (Moon y Palaniandy, 2019; Njoku y col., 2019). Las púas tienen una longitud de hasta 35 mm y un diámetro de 40 a 400 μm , mientras que las bárbulas tienen una longitud menor a 1 mm y un diámetro de 10 a 30 μm (Zhan y Wool, 2011).

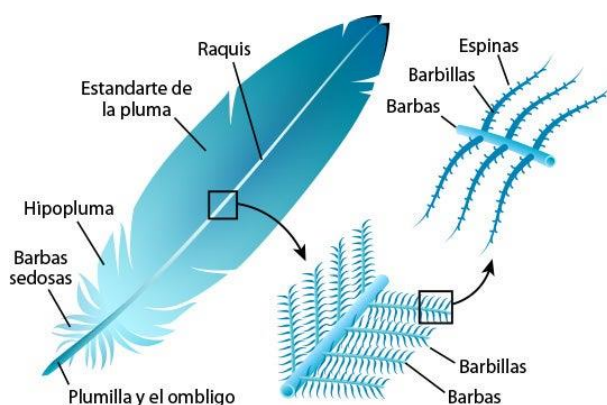


Figura 2.1. Anatomía de las plumas (Kazilek, 2017).

La proteína de queratina puede formar α -hélices (41%), láminas β (38%) y estructuras desordenadas (21%), y puede ser hidrolizada por algunos microorganismos como hongos, actinomicetos y bacterias que sintetizan queratinasas, las cuales tienen la capacidad de degradar la queratina en cadenas peptídicas más pequeñas (Solís-Moreno y col., 2021). Dicho biopolímero

contiene una gran cantidad de grupos amino, grupos carboxilo, grupos hidroxilo y otros grupos funcionales, que sirven como sitio de adsorción para diversos contaminantes orgánicos e inorgánicos (Chakraborty y col., 2020a). Específicamente, las fibras de pluma de pollo han sido utilizadas como adsorbente alternativo para la remoción de arsénico (Khosa y col., 2013), colorantes (Gupta y col., 2006; Mittal y col., 2012; Cervantes-González y col., 2017; Azeez y col., 2020; Jóźwiak y col., 2021), farmacéuticos (Rodríguez-Zamarripa y col., 2022), fenol (Banat y Al-Asheh, 1999), fluoruros (Chaudhari y Patkar, 2023), metales pesados (Reynel-Avila y col., 2015; Chakraborty y col., 2020b; Dhaouadi y col., 2020; Sun y col., 2020; Solís-Moreno y col., 2021) y nitratos (Elemile y col., 2022). Con fines ilustrativos en la Tabla 2.1 se reporta un resumen bibliográfico de la adsorción de xenobióticos usando pluma de pollo como adsorbente.

Tabla 2.1. Capacidades máximas de adsorción (Q_{max}) de diferentes xenobióticos usando plumas de pollo como adsorbente.

Contaminante	Agente modificante	Q _{max} , mg/g	pH	T, °C	Referencia
Rojo 3	H ₂ O ₂	20.78	3	50	Gupta y col. (2006)
Amarillo Brillante	H ₂ O ₂	37.53	2	50	Mittal y col. (2012)
Arsénico	NaOH	56.35	4	70	Khosa y col. (2013)
	Na ₂ SO ₃	49.25		70	
	CH ₃ OH	67.18		80	
Cadmio	S.T.	4.62	5	30	Reynel-Avila y col. (2015)
Níquel		7.35			
Plomo		8.72			
Rojo Congo	S.T.	97.81	5	30	Cervantes-González y col. (2017)
Rodamina B	Nanopartículas de plata	2.53	2	30	Azeez y col. (2020)
Cromo	S.T.	333.33	2.5	40	Chakraborty y col. (2020b)
Cromo	HNO ₃	39.04	3.2	25	Sun y col. (2020)
Negro reactivo 5	S.T.	3.95	2	22	Jóźwiak y col. (2021)
Rojo básico 46		2.98	5	22	
Cobre	S.T.	11.48	3	40	Solís-Moreno y col. (2021)
Nitratos	NaOH - HCl	4.33	8	40	Elemile y col. (2022)
Diclofenaco	S.T.	614.81	6	8	Rodríguez-Zamarripa y col. (2022)
Fluoruros	NaOH	4.78	6	40	Chaudhari y Patkar (2023)

Nomenclatura: T = Temperatura de adsorción, S.T. = Sin tratamiento.

Por otra parte, debido a su composición química (~50% de carbono, ~7% de hidrógeno, ~16% de oxígeno y ~0-3% de azufre) las plumas de pollo también han sido utilizadas como precursor de adsorbentes a base de carbón y carbón activado, respectivamente, para absorber microondas (Singh y col., 2018), almacenar hidrógeno (Senoz y Wool, 2011; Partuti y col., 2019), capturar

dióxido de carbono (Zhao y col., 2015), y remover colorantes (Liu y col., 2020), iones metálicos (Chiramba y col., 2019; Rahmani-Sani y col., 2020; Chen y col., 2021) y farmacéuticos (Li y col., 2019; Malakootian col., 2021; Deng y col., 2024) del agua.

Por ejemplo, para el almacenamiento de hidrógeno se obtuvo un material a base de carbón mediante tratamiento térmico de las fibras de pluma de pollo (Senoz y Wool, 2011). Dicho tratamiento se realizó en dos pasos y se reportó una capacidad de almacenamiento máxima de H_2 de hasta 1.5 % en peso del carbonizado (Senoz y Wool, 2011). Dicha biomasa se usó como precursor de carbón activado para la captura de dióxido de carbono, logrando remover hasta 6.5 mmol/g del gas y una tasa de retención del 98% después de 10000 ciclos, respectivamente (Zhao y col., 2015). Para la absorción de microondas también se usó un carbón activado empleando este precursor y se logró una eficiencia de absorción de microondas superior al 99%, correspondiente a una pérdida por reflexión de -44.6 dB (Singh y col., 2018).

Para la remoción de contaminantes del agua, los adsorbentes a base de carbón y carbones activados han sido sintetizados mediante procesos de pirólisis a temperaturas de 450 – 800 °C, ver Tabla 2.2. En la mayoría de los estudios reportados se ha evaluado el efecto del pH y la temperatura sobre la capacidad de adsorción de los materiales, y se han determinado los parámetros termodinámicos de este proceso de separación. En general, los carbones activados han demostrado tener un mejor desempeño de adsorción en comparación con los adsorbentes a base de carbón. Sin embargo, una temperatura elevada puede provocar la pérdida de los grupos funcionales, debido a las reacciones de degradación de la cadena lateral o de escisión de la cadena que ocurren en los polímeros lineales (Senoz y Wool, 2010; Zinina y col., 2022). En este sentido, el control preciso de las condiciones de síntesis es fundamental para conservar la estructura y composición del precursor. De acuerdo con Senoz y Wool (2010), una pirólisis de dos pasos permite mejorar la naturaleza porosa de las fibras de plumas de pollo y hacerlas resistentes a altas temperaturas. Además, se conserva la estructura fibrosa del precursor y se obtiene un material rico en carbono y nitrógeno (Senoz y Wool, 2010).

Considerando lo anterior, en este estudio se sintetizaron fibras de carbón mediante tratamiento térmico de dos pasos empleando plumas de pollo para su aplicación como adsorbente de xenobióticos en agua, se hizo un análisis comparativo del desempeño de adsorción de las fibras de carbón resultantes y el precursor, se llevaron a cabo experimentos de adsorción detallados a fin de comprender los mecanismos de adsorción subyacentes, y se evaluó el desempeño de los adsorbentes a diferentes condiciones de temperatura. Cabe mencionar que, de acuerdo con la literatura, no se ha reportado el uso de fibras de carbón derivadas de pluma de pollo para la remoción de xenobióticos del agua. Por lo tanto, este estudio contribuye con el desarrollo de alternativas para el aprovechamiento de desechos de la industria avícola en la resolución de problemas ambientales. Finalmente, se evaluó el desempeño de adsorción de los materiales saturados con hierro en la remoción de fluoruros a fin de impulsar la economía circular.

Tabla 0.1. Capacidades máximas de adsorción (Q_{max}) de diferentes xenobióticos empleando adsorbentes a base de carbón y carbones activados sintetizados a partir de plumas de pollo.

Adsorbato	Tratamiento térmico	Agente modificante	pH	T, °C	Q _{max} , mg/g	Referencia
Plomo	Pirólisis a 550 °C	HCl	8	30	320	Chiramba y col. (2019)
Cromo					201	
Amoxicilina	Pirólisis a 800 °C	KOH	6.5	30	103.57	Li y col. (2019)
Naranja ácido 7	Pirólisis a 500 °C	ZnCl ₂ – KOH	5	30	556.29	Liu y col. (2020)
Níquel	Pirólisis a 480 °C	HCl	5	40	36.57	Rahmani-Sani y col. (2020)
Zinc					50.45	
Cadmio	Pirólisis a 450 °C	KOH	3	30	55.25	Chen y col. (2021)
Ciprofloxacino	Pirólisis a 650 °C	S.T.	8	30	89.71	Malakootian col. (2021)
Tetraciclina	Pirólisis a 700 °C	KHCO ₃	7	25	147.83	Deng y col. (2024)

Nomenclatura: T = Temperatura de adsorción, S.T. = Sin tratamiento.

Capítulo 3. Metodología

En el presente capítulo se detalla la metodología empleada para la síntesis de fibras de carbón mediante tratamiento térmico de dos pasos empleando plumas de pollo para la remoción de xenobióticos en agua. Se incluye información sobre las técnicas de caracterización utilizadas para conocer la estructura cristalina y los grupos funcionales de las fibras de carbón obtenidas y del precursor, antes y después del proceso de adsorción. Se describe el método adoptado para la correlación de los datos experimentales, y se expone la estrategia utilizada para el análisis de los parámetros termodinámicos del proceso de adsorción.

3.1 Síntesis de fibras de carbón empleando plumas de pollo.

Las plumas de pollo se lavaron con detergente líquido libre de fosfatos y agua desionizada, se enjuagaron con etanol, se secaron a 40 °C durante 48 horas, y se cortaron manualmente para obtener fibras de ~0.5 cm de longitud y descartar el raquis. Las fibras obtenidas (PN) se sometieron a tratamiento térmico de dos pasos, empleando dos rutas de síntesis distintas a fin de evaluar su impacto sobre la capacidad de adsorción. Dichas condiciones de síntesis se ilustran en la Figura 3.1. Las fibras de carbón resultantes fueron identificadas como FC-R1 y FC-R2, respectivamente.

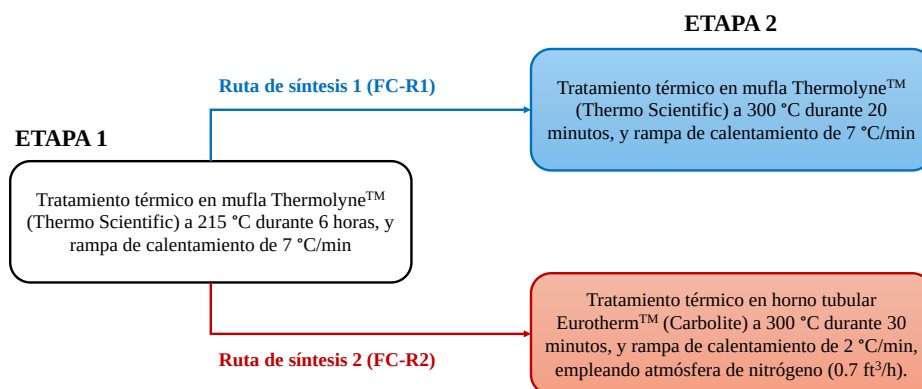


Figura 3.1. Representación esquemática de las rutas de síntesis empleadas para la obtención de fibras de carbón empleando plumas de pollo.

3.2 Estudios de adsorción de xenobióticos empleando fibras de carbón obtenidas a partir de plumas de pollo.

Inicialmente se evaluó el desempeño de adsorción de plomo de las fibras de carbón obtenidas bajo las condiciones de síntesis descrita en la sección anterior. Se seleccionó dicho contaminante como caso de estudio debido a que se encuentra entre los contaminantes prioritarios del agua por ser un metal altamente tóxico (Chwastowski y col., 2023). Con base en la capacidad de adsorción se seleccionó al mejor adsorbente (FC-R2) y se evaluó su desempeño en la eliminación de

colorantes (amarillo crepúsculo, azul de bromofenol, cristal violeta, negro reactivo 5 y rojo amaranto), farmacéuticos (acetaminofeno, diclofenaco y naproxeno) y cationes (cadmio, hierro níquel y zinc). Paralelamente, se hicieron experimentos de adsorción con las fibras obtenidas de la biomasa a fin de hacer un análisis comparativo entre el precursor (PN) y su contraparte (FC-R2). Todos los experimentos se realizaron por triplicado en un baño de agitación térmica LABTECH™ modelo LSB-015S a 30 °C, agitación de 120 rpm, empleando una relación adsorbente-adsorbato de 2 g/L y soluciones con concentraciones iniciales de 100 mg/L para los farmacéuticos y metales pesados, y de 10 mg/L para los colorantes. El tiempo de contacto para los metales pesados y los farmacéuticos fue de 24 horas, mientras que la interacción adsorbente-colorantes fue de 2 horas. Las soluciones que contenían los iones metálicos, rojo amaranto y amarillo crepúsculo se ajustaron a pH 5. Para las soluciones de los farmacéuticos y del azul de bromofenol el pH inicial se ajustó a 7, mientras que el pH inicial de la solución de cristal violeta y negro reactivo 5 fue de 4 y 6, respectivamente.

Una vez alcanzado el tiempo de contacto entre los adsorbentes y los contaminantes estudiados, se separó el adsorbente respectivo de la solución remanente mediante filtración. La concentración de los iones metálicos se determinó con un espectrofotómetro de absorción atómica Ice 3000 (Thermo Scientific™) equipado con un quemador de acetileno y aire, mediante flama. Para estimar la concentración de los fármacos se usó un cromatógrafo de líquidos de alta eficiencia Ultimate 3000 (Thermo Scientific™) y las condiciones de análisis reportadas por Elvir-Padilla y col. (2023). Para la cuantificación de los colorantes se usó un espectrofotómetro UV-visible (Shimadzu, UV-1800), y una longitud de onda de 585, 592, 482, 602 y 525 nm para el colorante cristal violeta, azul de bromofenol, amarillo crepúsculo, negro reactivo 5 y rojo amaranto, respectivamente.

Bajo las condiciones experimentales evaluadas, la mayor capacidad de adsorción tanto de la PN como de la FC-R2 fue para el hierro. Por tanto, se obtuvieron isothermas de adsorción para este catión a 30 y 40 °C empleando soluciones con concentraciones iniciales (C_o , mmol/L) de 0.80 – 17 mmol/L y pH 5. Los adsorbentes saturados con hierro, referidos como Fe-FP para la fibra de carbón y Fe-PN para el precursor, se emplearon en la remoción de fluoruros con el fin de impulsar la economía circular. Específicamente, se obtuvieron isothermas de adsorción a 30 y 40 °C, con soluciones de fluoruros con concentraciones iniciales entre 3.5 y 51 mmol/L y pH 7. El resto de las condiciones experimentales fueron las mismas que las descritas previamente.

Con los valores promedio de los resultados conseguidos se calcularon las capacidades de adsorción (q_e , mmol/g), por medio de la siguiente ecuación:

$$q_e = \frac{(C_o - C_e)V}{m} \quad [3.1]$$

donde C_e representa la concentración en el equilibrio en mmol/L, V es el volumen de la solución que contiene al adsorbato en L, y m es el peso del adsorbente utilizado expresado en g. Los datos

experimentales también se utilizaron para estimar el cambio en la entalpía de adsorción (ΔH° , kJ/mol) empleando la ecuación de van't Hoff (Tran y col., 2017).

3.3 Caracterización fisicoquímica de las fibras de carbón y las fibras de las plumas.

Las fibras de carbón y la biomasa usada como precursor se analizaron mediante difracción de rayos X y espectroscopía de infrarrojo por transformada de Fourier, antes y después del proceso de adsorción de hierro y fluoruros. Los difractogramas de rayos X se obtuvieron en un difractómetro Empyrean (Malvern-Panalytical) entre 10 y 60 °2θ empleando radiación de cobre ($\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$) a 45 mV y 40 mA. Para la obtención de los espectros de infrarrojo se utilizó un espectrómetro Nicolet iS10 (Thermo Scientific). Este análisis se llevó a cabo en un rango de número de onda de 4000 a 400 cm^{-1} , con una resolución espectral de 4 cm^{-1} . En total se realizaron 32 barridos, y previo al análisis las muestras fueron diluidas con KBr de grado FTIR.

3.4 Correlación de los datos de equilibrio con distintos modelos de isothermas de adsorción.

Los datos de equilibrio fueron correlacionados con las ecuaciones no lineales de Langmuir (Eq. 3.2) y Freundlich (Eq. 3.3) empleando la herramienta Solver de Excel®. De acuerdo con el primer modelo, se forma una sola capa de adsorbato hasta saturar toda la superficie del adsorbente. Por otra parte, la isoterma de Freundlich describe la adsorción del soluto en una superficie heterogénea. Dichos modelos se representan con las siguientes ecuaciones:

$$q_e = \frac{q_{max} K_L C_e}{1 + K_L C_e} \quad [3.2]$$

$$q_e = K_F C_e^{1/n} \quad [3.3]$$

donde q_{max} representa la capacidad máxima de adsorción teórica en mmol/g, K_L es la constante de equilibrio de Langmuir en mmol/g, K_F es la constante de equilibrio de Freundlich en $(\text{mmol/g})/(\text{mmol/L})^{1/n}$ y n es la intensidad de adsorción, respectivamente. Para la correlación de los datos se empleó la siguiente función objetivo (F_{obj}):

$$F_{obj} = \sum_{i=1}^{ndat} (q_{i,exp} - q_{i,mod})^2 \quad [3.4]$$

donde $ndat$ es el número de datos experimentales, $q_{i,exp}$ es la capacidad de adsorción experimental (mmol/g) y $q_{i,mod}$ es la capacidad de adsorción calculada (mmol/g) por el modelo de isoterma de adsorción (Bonilla-Preticiolet y col., 2019). Para evaluar el desempeño de los modelos considerados en el ajuste de los datos de equilibrio de adsorción, se calculó el coeficiente de determinación (R^2) y el porcentaje de error promedio (E , %) empleando las expresiones reportadas por Gosh y col. (2021) y Wu y col. (1995), respectivamente.

Capítulo 4. Resultados

4.1 Evaluación del desempeño de adsorción de xenobióticos de las fibras de carbón obtenidas a partir de plumas de pollo y el precursor.

Las capacidades de adsorción de plomo utilizando las fibras de carbón obtenidas con las rutas de síntesis estudiadas fueron de 0.018 y 0.024 mmol/g para el adsorbente FC-R1 y FC-R2, respectivamente. Por tanto, se evaluó el desempeño de adsorción del segundo material en la remoción otros iones metálicos (cadmio, hierro, níquel, zinc), farmacéuticos (acetaminofeno, diclofenaco, naproxeno) y colorantes (azul de bromofenol: AB, amarillo crepúsculo: AC, cristal violeta: CV, rojo amaranto: RA, negro reactivo 5: RN). De acuerdo con Senoz y Wool (2010) durante la primera etapa del tratamiento térmico ocurre un mecanismo de reticulación intermolecular en las fibras que les proporciona una estructura fibrosa más estable para el paso posterior, y en la segunda etapa se obtiene una fibra de carbón microporosa y con mayor superficie de adsorción. El pretratamiento térmico a una temperatura inferior al punto de fusión cristalino de la queratina (250 °C) es un punto clave para evitar la ruptura de la fibra en presencia de oxígeno, aun cuando la temperatura del tratamiento térmico supere por poco la temperatura de fusión de dicha proteína, como ocurre en la segunda etapa de la síntesis (Senoz y Wool, 2010). De esta manera, se cumple el objetivo de aportar microporosidad al material sin destruir la estructura de la biomasa (Senoz y Wool, 2010).

En la Figura 4.1 se reportan las capacidades de adsorción de los diferentes xenobióticos de interés empleando el adsorbente FC-R2 y el precursor (PN) a fin de hacer un análisis comparativo entre las capacidades de adsorción obtenidas. De forma general las capacidades de adsorción de los cationes oscilaron entre 0.02 y 0.14 mmol/g para PN y entre 0.02 y 0.17 mmol/g para FC-R2. Claramente ambos materiales tienen mayor afinidad por los iones de hierro, y la capacidad de adsorción es hasta 228 y 147% superior a la obtenida para el plomo, respectivamente, el cual es el adsorbato que le sigue en orden de afinidad. La remoción para los contaminantes orgánicos fue poco efectiva, siendo el naproxeno (PN: 0.019 mmol/g, FC-R2: 0.021 mmol/g) y el colorante cristal violeta (PN: 0.021 mmol/g, FC-R2: 0.025 mmol/g) las moléculas que se adsorbieron en mayor proporción con respecto a sus respectivos grupos. Las bajas capacidades de adsorción para estos contaminantes se atribuyen a la baja área superficial de los adsorbentes, la cual de acuerdo con Dhaouadi y col. (2020) es de $\sim 11 \text{ m}^2/\text{g}$. Sin embargo, los materiales estudiados contienen grupos funcionales (p.ej. carboxílicos e hidroxilo) afines para la adsorción de metales pesados, como hierro y plomo, en la química superficie (Senoz y Wool, 2018; Vashista y col., 2024).

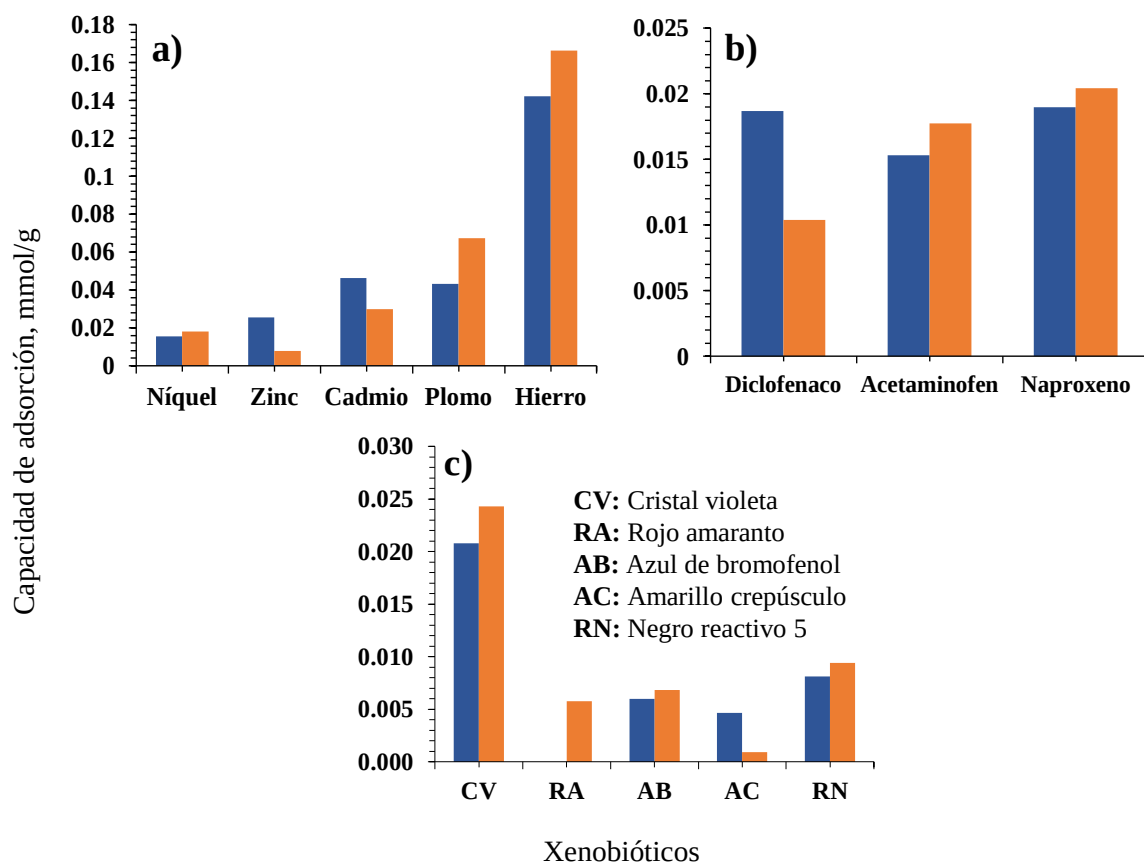


Figura 4.1. Capacidades de adsorción de (a) cationes, (b) fármacos y (c) colorantes usando fibras de carbón (FC-R2) y plumas de pollo (PN) como adsorbentes.

Con base en estos resultados, se obtuvieron isothermas de adsorción de hierro a 30 y 40 °C con ambos adsorbentes (PN y FC-R2) y se descartó al resto de los contaminantes del estudio. Los resultados de estos estudios se reportan en la Figura 4.2. Las capacidades de adsorción obtenidas con PN rondan entre 0.04 – 0.38 y 0.05 – 0.41 mmol/g, mientras que con las fibras de carbón se obtuvieron capacidades de adsorción de 0.07 – 0.40 y 0.06 – 0.41 mmol/g a dichas temperaturas, respectivamente. La similitud en las capacidades de adsorción de dichos adsorbentes sugiere que el tratamiento térmico al que se sometió la biomasa no modificó los grupos funcionales de las fibras de las plumas. La ligera diferencia en las capacidades de adsorción (FC-R2 > PN) más bien se asocia con el punto isoeléctrico de los adsorbentes, el cual es de 4.2 para FC-R2 y de 4.9 para PN (Vashista y col., 2024). Dicho parámetro juega un papel importante en el proceso de adsorción, ya que cuando el pH de la solución es mayor al punto isoeléctrico, la superficie del adsorbente tendrá carga negativa, lo que favorece la adsorción de cationes (Nikiforova y col., 2019). Bajo esta consideración, la superficie de FC-R2 es más negativa que la de PN, y por consecuencia se favorece la remoción de hierro.

Las capacidades de adsorción obtenidas en el presente estudio resultaron ser competitivas en comparación con las reportadas por Sayed y col. (2005), quienes usaron plumas de pollo activadas

con NaOH y reportaron una capacidad de adsorción máxima de hierro de ~ 0.46 mmol/g a 30 °C y pH 6. Dicho parámetro también fue equivalente al obtenido de la remoción de hierro (~ 0.50 mmol/g a 25 °C y pH 3.5) empleando carbón activado (obtenido de cáscara de *Bombax ceiba*) con ZnCl_2 (Brishti y col., 2023), y ligeramente inferior al que obtuvieron Al-Anber y col. (2008) usando orujo de aceitunas (~ 0.57 mmol/g a pH 4.5 y 28 °C) como adsorbente de este catión.

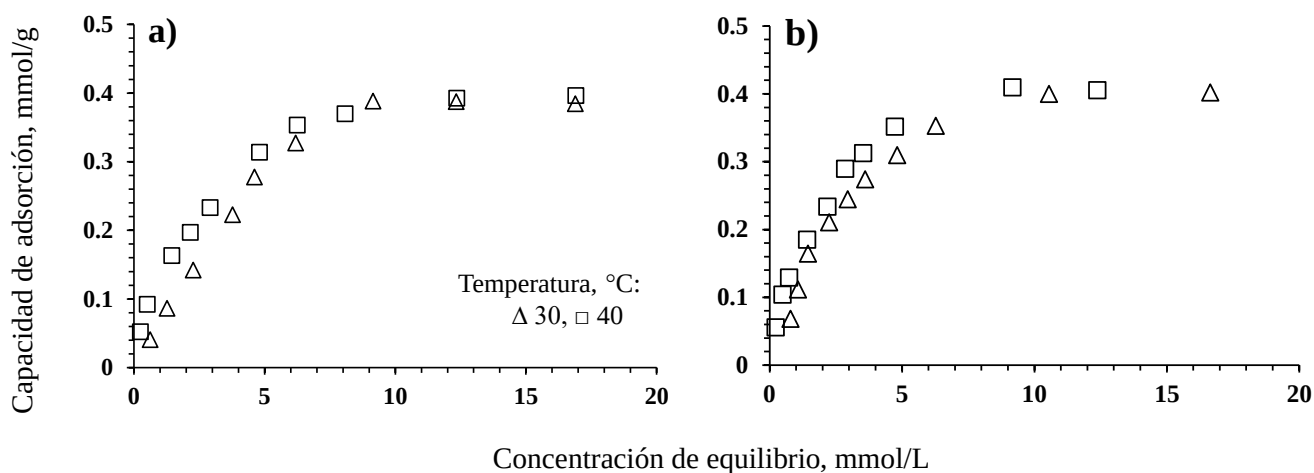


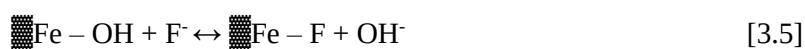
Figura 4.2. Isotermas de adsorción de hierro a 30 (Δ) y 40 °C (□) usando plumas de pollo (a) y fibras de carbón (b) como adsorbentes.

En la Figura 4.2 también se evidencia que la temperatura no tiene un impacto significativo sobre la capacidad de adsorción, lo que confirma que la adsorción es de naturaleza física, ya que el proceso de separación depende de fuerzas débiles y estas suelen ser menos sensibles a los cambios de temperatura (Nikiforova y col., 2019). Resultados similares han sido reportados para la adsorción de algunos cationes (cadmio, cobre, níquel y zinc) usando queratina (Nikiforova y col., 2019), y en la remoción de hierro usando queratina extraída de pluma de aves como adsorbente (Pan y col., 2021).

Con el fin de adoptar medidas que contribuyan a la economía circular, los adsorbentes saturados de hierro, referidos como Fe-FP para la fibra de carbón y Fe-PN para el precursor, se usaron para obtener isotermas de adsorción de fluoruros a 30 y 40 °C, ya que se tiene antecedente de que la presencia de estos cationes favorece la remoción del contaminante geogénico. Por ejemplo, Ning y col. (2023) evaluaron la capacidad de adsorción de fluoruros (a pH 6.5 y 25 °C) de sedimentos de una planta de tratamiento de aguas con y sin presencia de hierro, obteniendo capacidades de adsorción de 0.84 y 0.32 mmol/g, respectivamente. De acuerdo con la literatura el hierro presente en la superficie del adsorbente favorece la remoción de fluoruros principalmente por la interacción electrostática entre los aniones y los cationes, aunque también puede ocurrir la formación de complejos de coordinación entre el hierro y los fluoruros (Ning y col., 2023). Cabe

mencionar que con fines comparativos también se evaluó el desempeño de adsorción de PN y FC-R2 en la remoción de fluoruros, y la capacidad de adsorción de ambos adsorbentes fue nula.

En la Figura 4.3 se reportan los resultados de los experimentos realizados. Para ambas temperaturas, las capacidades de adsorción máximas de Fe-FP (1.47 mmol/g a 30 °C, 1.62 mmol/g a 40 °C) fueron superiores a las obtenidas con Fe-PN (1.23 mmol/g a 30 °C, 1.43 mmol/g a 40 °C). La fibra de carbón saturada con hierro parece tener mayor afinidad por los fluoruros debido a las características de su estructura y grupos funcionales disponibles para la adsorción (Ning y col., 2023). Específicamente, los grupos hidroxilo de la goetita (como se discute en la sección de los resultados de caracterización de los adsorbentes) participan en la remoción de fluoruros mediante un proceso de intercambio iónico, cuya reacción puede representarse de la siguiente manera (Zhao y col., 2021):



donde Fe representa la superficie del adsorbente.

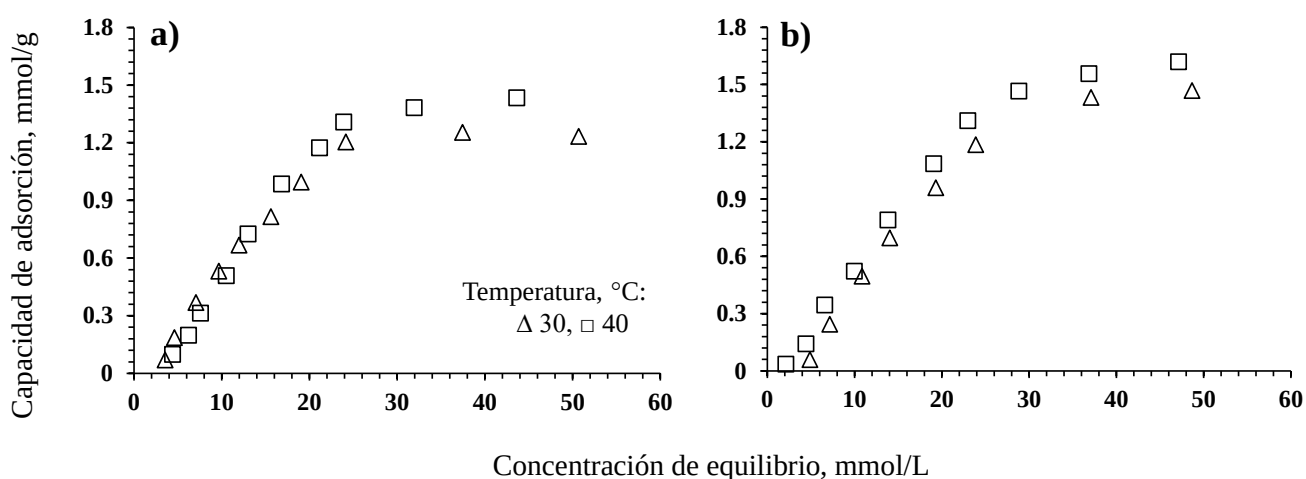


Figura 4.3. Isotermas de adsorción de fluoruros a 30 (Δ) y 40 (□) °C usando plumas de pollo (a) y fibras de carbón (b) saturadas con hierro como adsorbentes.

Por otra parte, el cambio en la entalpía (PN: 20.56 kJ/mol, FC-R2: 21.89 kJ/mol, Fe-PN: 49.50 kJ/mol, Fe-FP: 10.42 kJ/mol) indica que el proceso de adsorción de hierro y fluoruros es endotérmico y de naturaleza física ($\Delta H^\circ < 80$ kJ/mol), lo cual sugiere que la adsorción de estos contaminantes se lleva a cabo a través de interacciones electroestáticas, puentes de hidrógeno y/o enlaces π - π (de Souza y col., 2021; Natarajan y col., 2022).

Los resultados de la correlación de las isotermas de adsorción de hierro y fluoruros se reportan en la Tabla 4.1 y Figura 4.4. De acuerdo con los valores de la función objetivo (F_{obj}), el coeficiente de determinación (R^2) y el porcentaje de error promedio (E , %), las isotermas de ambos adsorbatos se ajustan mejor al modelo de Langmuir, sugiriendo que los adsorbatos forman una monocapa sobre la superficie de los adsorbentes.

Tabla 4.1. Resultados del ajuste de las isothermas de Langmuir y Freundlich usadas en la correlación de los datos de equilibrio de adsorción de hierro y fluoruros empleando PN, FC-R2, Fe-PN y Fe-FP como adsorbentes.

Modelo	Adsorbente	Hierro				Fluoruros			
		PN		FC-R2		Fe-PN		Fe-FP	
		30 °C	40 °C	30 °C	40 °C	30 °C	40 °C	30 °C	40 °C
Langmuir	Q_m , mmol/g	0.55	0.47	0.5	0.49	2.09	3.11	3.04	3.23
	K_L , L/mmol	0.19	0.38	0.31	0.47	0.04	0.02	0.02	0.02
	R^2	0.97	0.99	0.98	0.99	0.94	0.93	0.95	0.97
	F_{obj}	5E-03	2E-03	2E-03	1E-03	0.13	0.19	0.12	0.12
	E , %	14.09	7.25	8.51	4.96	15.82	23.41	15.31	21.76
		± 0.13	± 0.07	± 0.13	± 0.04	± 0.79	± 0.58	± 0.19	± 0.36
Freundlich	K_f , (mmol/g)/(mmol/L) ^{1/n}	0.12	0.15	0.15	0.14	0.15	0.06	0.09	0.11
	n	0.48	0.38	0.4	0.5	0.59	0.88	0.75	0.72
	R^2	0.89	0.94	0.89	0.91	0.86	0.84	0.91	0.93
	F_{obj}	0.02	9E-03	0.01	0.19	0.25	0.38	0.18	0.22
	E , %	28.49	16.28	19.69	12.53	21.82	20.53	18.09	26.34
		± 0.38	± 0.21	± 0.28	± 0.07	± 0.27	± 0.28	± 0.20	± 0.41

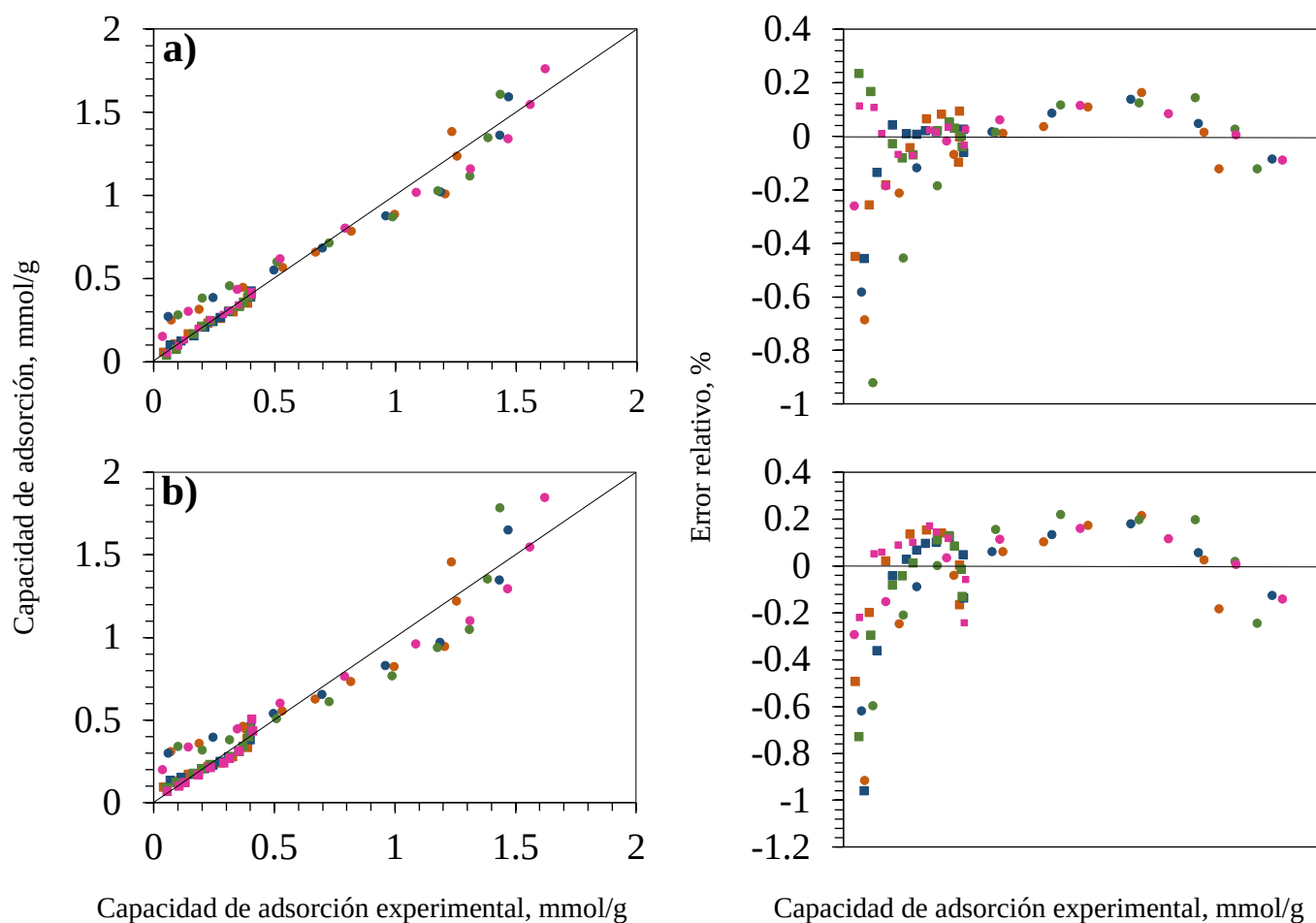


Figura 4.4. Capacidades de adsorción experimentales vs. calculadas y análisis de errores relativos de las isothermas de a) Langmuir y b) Freundlich para la adsorción de hierro ($\square$) y fluoruros ($\circ$) a 30 ($\square$, $\circ$) y 40 ($\square$, $\circ$) °C, usando PN, FC-R2, Fe-PN y Fe-FP como adsorbentes.

4.2 Caracterización fisicoquímica de las fibras de carbón y las fibras de las plumas.

En la Figura 4.5 se reportan los espectros infrarrojos de las fibras de carbón y las fibras de las plumas antes del proceso de adsorción. La banda de absorción en $\sim 3400\text{ cm}^{-1}$ se asocia con las vibraciones de estiramiento O-H de las cadenas laterales y N-H de las amidas I y II (Vashista y col., 2024). Las bandas de absorción en $\sim 2960 - 2925\text{ cm}^{-1}$ y $\sim 1448\text{ cm}^{-1}$ son atribuidas a vibraciones de estiramiento C-H (Chakraborty y col., 2020b). Se identifican vibraciones de estiramiento C=O ($\sim 1655\text{ cm}^{-1}$) de la amida I, vibraciones de flexión N-H y vibraciones de estiramiento de C-N de la amida II ($\sim 1530\text{ cm}^{-1}$), y vibraciones de estiramiento C-N y C-C, vibraciones de flexión N-H y C-O en $1270 - 1220\text{ cm}^{-1}$ (Senoz y Wool, 2018). En $\sim 1120 - 1050\text{ cm}^{-1}$ se ubican las bandas de absorción correspondientes al estiramiento del grupo C-O, mientras que las bandas de absorción en $\sim 1000\text{ cm}^{-1}$ y $\sim 703\text{ cm}^{-1}$ corresponden a los enlaces C-S y disulfuro de la cisteína (Sharma y col., 2018).

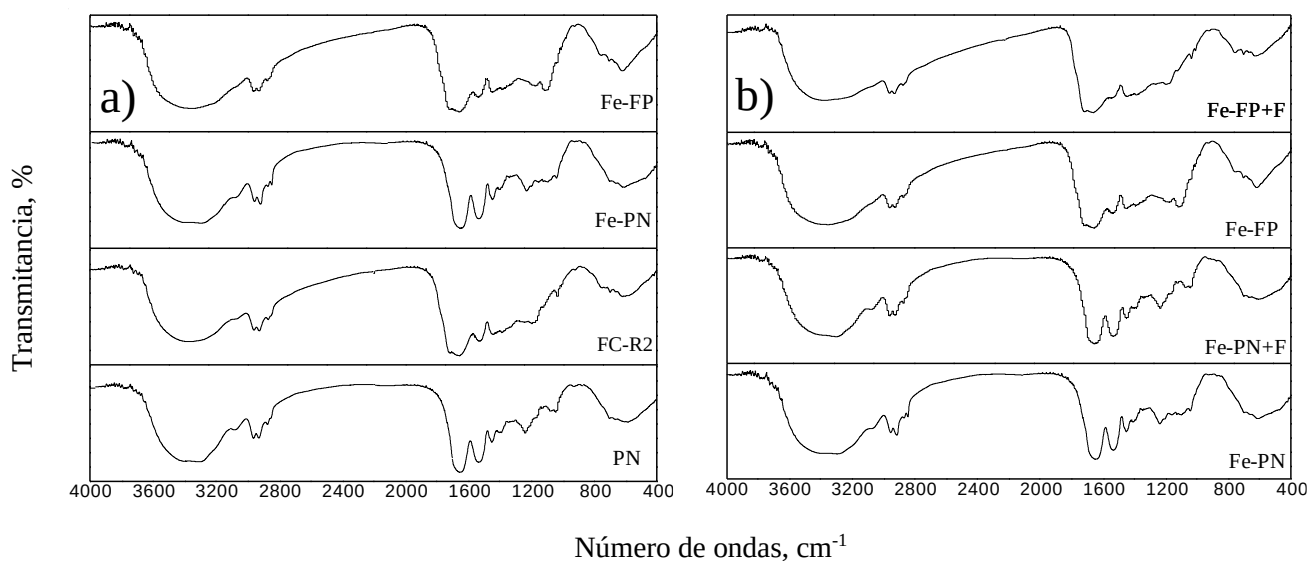


Figura 4.5. Espectros de infrarrojo de las plumas de pollo (PN) y fibras de carbón (FC-R2) antes y después del proceso de adsorción de a) hierro (Fe-PN y Fe-FP) y b) fluoruros (Fe-PN+F y Fe-FP+F).

Un análisis comparativo entre los espectros de infrarrojo de PN y FC-R2 indica que ambas muestras contienen los mismos grupos funcionales, lo que sugiere que el tratamiento térmico no dañó la estructura de la proteína. Sin embargo, la intensidad de las bandas de absorción de las amidas II y III disminuyó. De acuerdo con (Chakraborty y col., 2020b) este comportamiento indica que hubo un rompimiento de los enlaces N-H y/o C-N en la cadena principal causado por el entrecruzamiento intermolecular originado por dicho tratamiento, lo cual da soporte para que las plumas mantengan su estructura fibrosa. En el espectro de infrarrojo de las fibras de carbón también se observa una pequeña banda de absorción característica de los ácidos carboxílicos en $\sim 1715\text{ cm}^{-1}$ (C=O) que se resulta de la oxidación parcial del precursor ocasionada por el tratamiento térmico (Senoz y Wool, 2010).

Posterior al proceso de adsorción de hierro (ver Figura 4.5a) se identifican cambios en las intensidades de las bandas de absorción situadas en $\sim 3400\text{ cm}^{-1}$, $\sim 2960 - 2925\text{ cm}^{-1}$ y por debajo de $\sim 1235\text{ cm}^{-1}$. Estos cambios pueden atribuirse a la interacción del hierro con los grupos carboxílico y amino, ya que, a las condiciones de pH consideradas en el estudio, estos se pueden desprotonar dando lugar a la formación de complejos con el hierro (Chakraborty y col., 2020b). Además, el hierro puede unirse a los grupos presentes en la estructura de la queratina que contienen azufre (p.ej., tiol, disulfuro y/o sulfonato) a través de interacciones electrostáticas (Chakraborty y col., 2020b; Halder y col., 2024; Nakro y col., 2024).

La incorporación de iones de fluoruro en los adsorbentes saturados con hierro también ocasionó un ligero cambio en la intensidad de las bandas de absorción asociadas con los grupos

O-H ($\sim 3400\text{ cm}^{-1}$), ver Figura 4.5b. Como se mencionó previamente, los grupos hidroxilo de la goetita (ver Figura 4.6) participan en la remoción de fluoruros mediante un proceso de intercambio iónico (Zhao y col., 2021). A concentraciones bajas, los fluoruros se intercambian con los grupos hidroxilos superficiales, mientras que a concentraciones altas participan los grupos hidroxilo doblemente coordinados (Zhao y col., 2021; Kang y col., 2022).

Con fines ilustrativos, en la Figura 4.6 se reportan los difractogramas de rayos X de las muestras PN, FC-R2, Fe-FP y Fe-FP + F. De acuerdo con estos difractogramas los adsorbentes presentan una estructura semicristalina (Sharma y col., 2018). El pico de difracción en $\sim 20^\circ 2\theta$ de la muestra PN es característico de la queratina semicristalina, y junto con los picos en ~ 28.5 y $29.4^\circ 2\theta$ se asocia con la lámina β de la proteína (Sharma y col., 2018; Chakraborty y col., 2020a; Dhaouadi y col., 2020). Las fibras de carbón presentan un pico de difracción en $\sim 24^\circ 2\theta$, que representa el plano de reflexión (002) del carbono grafitico (Shamsuddin y col., 2016), confirmando la presencia de carbón amorfo en el adsorbente (Singh y col., 2018). En la muestra Fe-FP se identificaron picos de difracción en ~ 21.2 , 26.5 , 33.1 , 34.7 , 36.4 y $47.3^\circ 2\theta$ que corresponden a los índices de Miller (110), (120), (130), (021), (111) y (041) de la goetita (ICDD: 01-081-0463). Después de la incorporación de los fluoruros sobre el adsorbente saturado con hierro se observó un cambio en la cristalinidad del adsorbente. Sin embargo, no se identificó ningún cambio en la estructura cristalina del material, lo cual sugiere que el proceso de adsorción de los fluoruros se lleva a cabo mediante fisisorción.

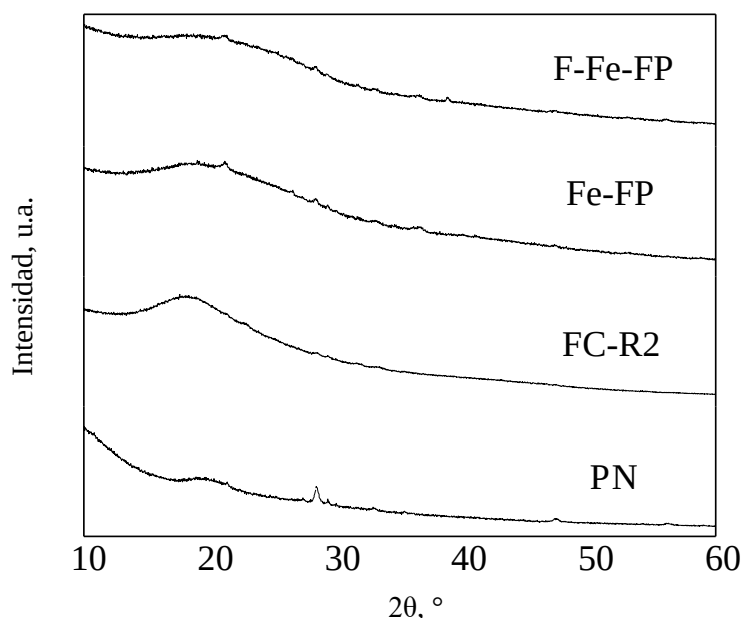


Figura 4.6. Difractogramas de rayos X de las plumas de pollo (PN), y fibras de carbón (FC-R2) antes y después del proceso de adsorción de hierro (Fe-FP) y fluoruros (Fe-FP + F).

Capítulo 5. Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

Se sintetizaron fibras de carbón mediante tratamiento térmico de dos pasos usando plumas de pollo como precursor para la adsorción de diferentes xenobióticos (fármacos, colorantes y metales pesados) del agua. Se hizo un comparativo entre el desempeño de adsorción de la biomasa y las fibras de carbón, y las capacidades de adsorción de las fibras fueron superiores a las obtenidas con el precursor. Bajo las condiciones experimentales consideradas las capacidades de adsorción para los contaminantes orgánicos fue poco efectiva (≤ 0.025 mmol/g), por tanto, se descartaron del estudio. Con respecto a los cationes, ambos materiales mostraron mayor afinidad por los iones de hierro. Tomando en consideración estos resultados, se hicieron estudios de equilibrio de adsorción para este catión a 30 y 40 °C, y una vez que se saturó el material se obtuvieron isotermas de adsorción de fluoruros a las mismas condiciones de temperatura. Las capacidades de adsorción máximas para el hierro y los fluoruros fueron de 0.41 y 1.63 mmol/g. El cambio en la entalpía indicó que el proceso de adsorción de ambos contaminantes es endotérmico y de naturaleza física, y que la adsorción se lleva a cabo a través de interacciones electroestáticas, puentes de hidrógeno y/o enlaces π - π . Con respecto a la correlación de los datos de equilibrio, el modelo de Langmuir presentó un mejor desempeño que el modelo de Freundlich.

Mediante la caracterización fisicoquímica se identificó que las fibras de carbón tienen los mismos grupos funcionales que las plumas de pollo, lo que sugiere que el tratamiento térmico no dañó la estructura de la proteína. Sin embargo, se presentó una oxidación parcial del precursor y se rompieron los enlaces N-H y/o C-N en la cadena principal debido al entrecruzamiento intermolecular originado por dicho tratamiento térmico. Los difractogramas de rayos X indicaron que los adsorbentes presentan una estructura semicristalina. Para las plumas de pollo esta estructura se asocia con la lámina β de la queratina, mientras que en las fibras de carbón corresponde al carbono grafitico. Después de la adsorción de hierro se identificó la presencia de goetita (ICDD: 01-081-0463) en las fibras de carbón. Con la incorporación de los iones de fluoruro se observó un cambio en la cristalinidad del adsorbente, pero no en la estructura cristalina del material. Finalmente, los resultados de este estudio sugieren que es posible contribuir con el desarrollo de tecnologías sostenibles para el mitigar la contaminación ambiental causada por hierro y fluoruros empleando residuos avícolas.

5.2 Recomendaciones

Se sugiere sintetizar las fibras de carbón a otras condiciones de tratamiento térmico y activarlas químicamente para mejorar sus propiedades de adsorción de xenobióticos. Es recomendable evaluar el desempeño del adsorbente a otras condiciones de temperatura, tiempo y pH, para conocer el

impacto de estos parámetros en el proceso de adsorción. Es conveniente realizar estudios cinéticos, y dinámicos de adsorción.

Capítulo 6. Referencias bibliográficas

A. Bonilla-Petriciolet, D.I. Mendoza-Castillo, G.L. Dotto, C.J. Duran-Valle. Adsorption in water treatment. Reference Module in Chemistry, Molecular Sciences and Chemical Engineering 45 (2019) 78-98.

A. Mittal, V. Thakur, V. Gajbe. Evaluation of adsorption characteristics of an anionic azo dye brilliant yellow onto hen feathers in aqueous solutions. Environmental Science and Pollution Research 19 (2012) 2438-2447.

A. Rahmani-Sani, P. Singh, P. Raizada, C.E Lima, I. Anastopoulos, D.A. Giannakoudakis, S. Sivamani, T.A. Dontsova, A. Hosseini-Bandegharai. Use of chicken feather and eggshell to synthesize a novel magnetized activated carbon for sorption of heavy metal ions. Bioresource Technology 297 (2020) 122452.

A. Thakur, A. Kumar, P.S. Panesar. A review on the industrial wastewater with the efficient treatment techniques. Chemical Papers 77 (2023) 4131-4163.

A.H. Jagaba, A.H. Birniwa, S.S. Abdullahi, A. Yahaya, H.A. Muhammed. Mitigating water contamination by controlling anthropogenic activities of organochlorine pesticides (OCPs) for surface water quality assurance. Case Studies in Chemical and Environmental Engineering 8 (2023) 100474.

C.A. Solís-Moreno, E. Cervantes-González, M.Z. Saavedra-Leos. Use and treatment of chicken feathers as a natural adsorbent for the removal of copper in aqueous solution. Journal of Environmental Health Science and Engineering 19 (2021) 707-720.

C.E. Njoku, K.K. Alaneme, J.A. Omotoyinbo, M.O. Daramola. Natural fibers as viable sources for the development of structural, semi-structural, and technological materials - A review. Advanced Materials Letters 10 (2019) 682-694.

C.J. Kazilek. Biología de las Plumas. ASU - Ask A Biologist (2017). Disponible en: <https://askabiologist.asu.edu/explore/biologia-de-las-plumas>.

D.M. Hannah, B.W. Abbott, K. Khamis, C. Kelleher, I. Lynch, S. Krause, A.S. Ward. Illuminating the 'invisible water crisis' to address global water pollution challenges. Hydrological Processes 36 (2022) e14525.

E. Cervantes-González, H. Martínez- Gutiérrez, C.L. Reyes-García. Optimization, kinetic, equilibrium and thermodynamics parameters for congo red adsorption from aqueous phase by untreated chicken feathers. Desalination and Water Treatment 66 (2017) 291-298.

E. Senoz, R.P. Wool. Hydrogen storage on pyrolyzed chicken feather fibers. International Journal of Hydrogen Energy 36 (2011) 7122-7127.

E. Senoz, R.P. Wool. Microporous carbon-nitrogen fibers from keratin fibers by pyrolysis. Journal of Applied Polymer Science 118 (2010) 1752-1765.

- E. Senoz, R. Wool. Physical and chemical changes in feather keratin during pyrolysis. *Polymer Degradation and Stability* 97 (2018) 297-307.
- F. Dhaouadi, L. Sellaoui, M. Badawi, H.E. Reynel-Ávila, D.I. Mendoza-Castillo, J.E. Jaime-Leal, A. Bonilla-Petriciolet, A.B. Lamine. Statistical physics interpretation of the adsorption mechanism of Pb^{2+} , Cd^{2+} and Ni^{2+} on chicken feathers. *Journal of Molecular Liquids* 319 (2020) 114168.
- F.A. Banat, S. Al-Asheh. Biosorption of phenol by chicken feathers. *Environmental Engineering and Policy* 2 (1999) 85-90.
- F.M. Rodríguez-Zamarripa, I. Trejo-Carrizalez, E. Cervantes-González. Diclofenac sodium removal from aqueous phase using a keratinolytic waste and biodegradation of the adsorbate/adsorbent complex. *International Journal of Environmental Science and Technology* 19 (2022) 1227-1246.
- G. Wu, M. Baraldo, M. Furlanut. Calculating percentage prediction error: A user's note. *Pharmacological Research* 32 (1995) 241-248.
- H. Chen, P. Qin, X. Yang, A. Bhatnagar, S.M. Shaheen, J. Rinklebe, F. Wu, F. Xu, L. Che, H. Wang. Sorption of diethyl phthalate and cadmium by pig carcass and green waste-derived biochars under single and binary systems. *Environmental Research* 193 (2021) 110594.
- H. Li, J. Hu, X. Wang, L. An. Development of a bio-inspired photo-recyclable feather carbon adsorbent towards removal of amoxicillin residue in aqueous solutions. *Chemical Engineering Journal*. 373 (2019) 1380-1388.
- H.E. Reynel-Avila, A. Bonilla-Petriciolet, G. de la Rosa. Analysis and modeling of multicomponent sorption of heavy metals on chicken feathers using Taguchi's experimental designs and artificial neural networks. *Desalination and Water Treatment* 55 (2015) 1885-1899.
- H.N. Tran, S.J. You, A. Hosseini-Bandegharai, H.P. Chao. Mistakes and inconsistencies regarding adsorption of contaminants from aqueous solutions: A critical review. *Water Research* 120 (2017) 88-116.
- I. Gosh, S. Kar, T. Chatterjee, N. Bar, S.K. Das. Removal of methylene blue from aqueous solution using *Lathyrus sativus* husk: Adsorption study, MPR and ANN modelling. *Process Safety and Environmental Protection* 149 (2021) 345-361.
- J. Chwastowski, M. Guzik, S. Bednarz, P. Staroń. Upcycling waste streams from a biorefinery process – a case study on cadmium and lead biosorption by two types of biopolymer post-extraction biomass. *Molecules* 28 (2023) 6345.
- J. Kang, J. Li, C. Ma, L. Yi, T. Gu, J. Wang, S. Liu. Goethite/montmorillonite adsorption coupled with electrocoagulation for improving fluoride removal from aqueous solutions. *RSC Advances* 12 (2022) 7475-7484.

K. Ahmad, K. Wajid, Z.I. Khan, I. Ugulu. H. Memoona, M. Sana, K. Nawaz, I.S. Malik, H. Bashir, M. Sher. Evaluation of potential toxic metals accumulation in wheat irrigated with wastewater. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* 102 (2019) 822-828.

K. Ning, S. Zheng, Y. He, Y. Hu, S. Hao, Q. Cui, H. Chen. Nano-magnetically modified activated carbon prepared by oak shell for treatment of wastewater containing fluoride ion. *Journal of Cleaner Production* 382 (2023) 135374.

L. Azeez, A. Lateef, A.L. Adejumo, J.T. Adeleke, R.O. Adetoro, Z. Mustapha. Adsorption behaviour of rhodamine B on hen feather and corn starch functionalized with green synthesized silver nanoparticles (AgNPs) mediated with cocoa pods extracts. *Chemistry Africa* 3 (2020) 237-250.

L. Lin, H. Yang, X. Xu. Effects of water pollution on human health and disease heterogeneity: A Review. *Frontiers in Environmental Science* 10 (2022) 880246.

L. Zhang, J. Ren, W. Bai. A review of poultry waste-to-wealth: Technological progress, modeling and simulation studies, and economic- environmental and social sustainability. *Sustainability* 15 (2023) 5620.

L.G. Elvir-Padilla, D.I. Mendoza-Castillo, F. Villanueva-Mejía, A. Bonilla-Petriciolet. Molecular aggregation effect on the antagonistic adsorption of pharmaceuticals from aqueous solution using bone char: DFT calculations and multicomponent experimental studies. *Journal of Molecular Liquids* 369 (2023) 120957.

M. Malakootian, M. Faraji, M. Malakootian, M. Nozari. Ciprofloxacin removal from aqueous media by adsorption process: a systematic review and meta-analysis. *Desalination and Water Treatment* 229 (2021) 252-282.

M. Sharma, J. Singh, S. Hazra, S. Basu. Adsorption of heavy metal ions by mesoporous ZnO and TiO₂@ZnO monoliths: Adsorption and kinetic studies. *Microchemical Journal* 145 (2019) 105-112.

M. Zhan, R.P. Wool. Mechanical properties of chicken feather fibers. *Polymer Composites* 32 (2011) 937-944.

M.A. Khosa, J. Wu, A. Ullah. Chemical modification, characterization, and application of chicken feathers as novel biosorbents. *RSC Advances* 3 (2013) 20800-20810.

M.C. Collivignarelli, A. Abbà, M.C. Miino, S. Damiani. Treatments for color removal from wastewater: State of the art. *Journal of Environmental Management* 236 (2019) 727-745.

M.S. Shamsuddin, N.R. Yusoff, M.A. Sulaiman. Synthesis and characterization of activated carbon produced from kenaf core fiber using H₃PO₄ activation. *Procedia Chemistry* 19 (2016) 558-565.

N. Morin-Crini, E. Lichtfouse, G. Liu, V. Balaram, A.R.L. Ribeiro, Z. Lu, F. Stock, E. Carmona, M.R. Teixeira, L.A. Picos-Corrales, J.C. Moreno-Piraján, L. Giraldo, C. Li, A. Pandey,

D. Hocquet, G. Torri, G. Crini. Worldwide cases of water pollution by emerging contaminants: a review. *Environmental Chemistry Letters* 20 (2022) 2311-2338.

O. Zinina, S. Merenkova, M. Rebezov. Analysis of modern approaches to the processing of poultry waste and by-products: prospects for use in industrial sectors. *Food Science and Technology* 42 (2022) e03222.

O.D. Fagbemi, B. Sithole. Evaluation of waste chicken feather protein hydrolysate as a bio-based binder for particleboard production. *Current Research in Green and Sustainable Chemistry* 4 (2021) 100168.

O.O. Elemile, B.O. Akpor, E.M. Ibitogbe, Y.T. Afolabi, D.O. Ajani. Adsorption isotherm and kinetics for the removal of nitrate from wastewater using chicken feather fiber. *Cogent Engineering* 9 (2022) 2043227.

P. Babuji, S. Thirumalaisamy, K. Duraisamy, G. Periyasamy. Human health risks due to exposure to water pollution: A Review. *Water* 15 (2023) 2532.

P. Sun, G. Zhu, T. Li, X. Li, Q. Shi, M. Xue, B. Li. Acidification chicken feather as sorbent for selectively adsorb chicken feather as sorbent for selectively adsorbing of Cr(VI) ions in aqueous solution. *Materials Today Communications* 24 (2020) 1013.

R. Chakraborty, A. Asthana, A.K. Singh, R. Verma, S. Sankarasubramanian, S. Yadav, S.A.C. Carabineiro, M.A.B.H. Susan. Chicken feathers derived materials for the removal of chromium from aqueous solutions: kinetics, isotherms, thermodynamics and regeneration studies. *Journal of Dispersion Science and Technology* 43 (2020a) 446-460.

R. Chakraborty, A. Asthana, A.K. Singh, S. Yadav, M.A.B.H. Susan, S.A.C. Carabineiro. Intensified elimination of aqueous heavy metal ions using chicken feathers chemically modified by a batch method. *Journal of Molecular Liquids* 312 (2020b) 113475.

R. Chiramba, G. Charis, N. Fungura, G. Danha, T. Mamvura. Production of activated carbon from poultry feathers for waste water treatment. *Water Science & Technology* 80 (2019) 1407-1412.

R. Natarajan, K. Saikia, S.K. Ponnusamy, A.K. Rathankumar, D.S. Rajendran, S. Venkataraman, D.B. Tannani, V. Arvind, T. Somanna, K. Banerjee, N. Mohideen, V.K. Vaidyanathan. Understanding the factors affecting adsorption of pharmaceuticals on different adsorbents – A critical literature update. *Chemosphere* 287 (2022) 131958.

R.M. de Souza, H.B. Quesada, L.F. Cusioli, M.R. Fagundes-Klen, R. Bergamasco. Adsorption of non-steroidal anti-inflammatory drug (NSAID) by agro-industrial by-product with chemical and thermal modification: Adsorption studies and mechanism. *Industrial Crops and Products* 161 (2021) 113200.

R.S. Brishti, R. Kundu, M.A. Habid, M.H. Ara. Adsorption of iron (III) from aqueous solution onto activated carbon of a natural source: *Bombax ceiba* fruit shell. *Results in Chemistry* 5 (2023) 100727.

S. Ali, Z. Abbas, M. Rizwan, I.E. Zaheer, İ. Yavaş, A. Ünay, M.M. Abdel-DAIM, M. Bin-Jumah, M. Hasanuzzaman, D. Kalderis. Application of floating aquatic plants in phytoremediation of heavy metals polluted water: A review. *Sustainability* 12 (2020) 1927.

S. Bolisetty, M. Peydayesh, R. Mezzenga. Sustainable technologies for water purification from heavy metals: review and analysis. *Chemical Society Reviews* 48 (2019) 463.

S. Halder, Z. Wang, P.K. Roy, M. Sedighi. Improving the adsorption properties of low surface area hardwood biochar for the removal of Fe^+ and PO_4^{3-} from aqueous solution. *Environmental Science and Pollution Research* 31 (2024) 60936-60958.

S. Karbalaei, P. Hanachi, T.R. Walker, M. Cole. Occurrence, sources, human health impacts and mitigation of microplastic pollution. *Environmental Science and Pollution Research* 25 (2018) 36046-36063.

S. Pan, C. Wang, Y. Wang, R. Wang. From feather to adsorbent: keratin extraction, chemical modification, and Fe (III) removal from aqueous solution. *Applied Sciences* 11 (2021) 12163.

S. Sharma, A. Gupta, A. Kumar, C.G. Kee, H. Kamyab, S.M. Saufi. An efficient conversion of waste feather keratin into ecofriendly bioplastic film. *Clean Technologies and Environmental Policy* 20 (2018) 2157-2167.

S. Vashista, A.A. Kumar, M. Sah. Catalysing sustainability with keratin-derived adsorbent materials for enhanced heavy metal remediation. *Korean Journal of Chemical Engineering* 41 (2024) 1901-1921.

S.A. Sayed, S.M. Saleh, E.E. Hasan. Removal of some polluting metals from industrial water using chicken feathers. *Desalination*. 181 (2005) 243-255.

S.K. Singh, H. Prakash, M.J. Akhtar, K.K. Kar. Lightweight and high performance microwave absorbing heteroatom doped carbon derived from chicken feather fibers. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering* 6 (2018) 5381-5393.

S.M. Gali, D. Beljonne. Combined healing and doping of transition metal dichalcogenides through molecular functionalization. *Journal of Materials Chemistry C* 9 (2021) 16247-16256.

S.M.D.U. Islam. Electrochemical remediation of arsenic and fluoride from water: A review of the current state and future prospects. *Environmental Technology & Innovation* 31 (2023) 103148.

T. Józwiak, U. Filipkowska, P. Marciniak. Use of hen feathers to remove reactive black 5 and basic red 46 from aqueous solutions. *Desalination and Water Treatment* 232 (2021) 129-139.

T. Münzel, O. Hahad, J. Lelieveld, M. Aschener, M.J. Nieuwenhuijsen, P.J. Landrigan, A. Daiber. Soil and water pollution and cardiovascular disease. *Nature Reviews Cardiology* 22 (2025) 71-89.

T. Nikiforova, V. Kozlov, M. Islyaikin. Sorption of d-metal cations by keratin from aqueous solutions. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 7 (2019) 103417.

- T. Partuti, A. Alhamidi, M.Y. Ardiansyah. Effect of activation time the chicken feather activated carbon on surface area of pores: Candidate for hydrogen storage application. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 673 (2019) 012128.
- U. Kumar, S. Parija, M. Karivaj. Response and behavior of paddy soil microbiota towards environmental change. *Climate Change Impacts on Soil-Plant-Atmosphere Continuum* 78 (2024) 163-181.
- U.F. Suleiman, S. Ibrahim. Health and environmental impact of xenobiotics in water quality evaluation: A review. *Journal of Microbiology Research* 9 (2024) 114-146.
- V. Chaudhari, M. Patkar. Fluoride removal from aqueous solution employing chicken feathers: isotherms, kinetics and thermodynamics studies. *International Journal of Environmental Research* 17 (2023) 23.
- V. Nakro, T.N. Lotha, K. Ao, I. Ao, V. Ritse, L. Rudithongru, C. Pongener, M. Aier. Recent advances in applications of animal biowaste-based activated carbon as biosorbents of water pollutants: a mini-review. *Environmental Monitoring and Assessment* 196 (2024) 274-298.
- V.K. Gupta, A. Mittal, L. Kurup, J. Mittal. Adsorption of a hazardous dye, erythrosine, over hen feathers. *Journal of Colloid and Interface Science* 304 (2006) 52-57.
- W. Zhu, X. Qian, H. Yu, X. Li, K. Song. Fabrication of mechanical robust keratin adsorbent by induced molecular network transition and its dye adsorption performance. *Environmental Science and Pollution Research* 27 (2020) 41577-41584.
- W.C. Moon, P. Palaniandy. A review on interesting properties of chicken feather as low-cost adsorbent. *The International Journal of Integrated Engineering* 11 (2019) 136-146.
- X. Liu, W. Li, R. Hu, Y. Wei, W. Yun, P. Nian, J. Feng, A. Zhang. Synergistic degradation of acid orange 7 dye by using non-thermal plasma and g-C₃N₄/TiO₂: Performance, degradation pathways and catalytic mechanism. *Chemosphere* 249 (2020) 126093.
- X. Zhao, Y. Li, K.C. Carroll, F. Li, L. Qiu, Z. Huo. Mesoporous goethite for rapid and high-capacity fluoride removal from drinking water. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 9 (2021) 105278.
- Y. Deng, T. Xiao, A. She, X. Li, W. Chen, T. Ao, F. Ni. One-step synthesis of iron and nitrogen co-doped porous biochar for efficient removal of tetracycline from water: Adsorption performance and fixed-bed column. *Journal of Environmental Management*. 352 (2024) 119984.
- Z. Zhao, Y. Wang, M. Li, R. Yang. High performance N-doped porous activated carbon based on chicken feather for supercapacitor and CO₂ capture. *RSC Advances* 5 (2015) 34803-34811.
- Z.A. Al-Anber, M.A.S. Al-Anber. Thermodynamics and kinetic studies of iron (III) adsorption by olive cake in a batch system. *Journal of the Mexican Chemical Society* 52 (2008) 108-115.