



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE  
HIDALGO**

**INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA**

**MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LOS MATERIALES**

**TESIS**

**OBTENCIÓN DE ADSORBENTES CON  
POLÍMEROS POSTINDUSTRIALES ÚTILES  
EN REMOCIÓN DE COLORANTES TEXTILES**

**Para obtener el grado de Maestra en Ciencias de los  
Materiales**

**PRESENTA**

Ing. Esmeralda Gómez Merino

Directora:  
Dra. Ana María Herrera González

Codirectora:  
Dra. Alejandra Alicia Peláez Cid

Mineral de la Reforma, Hgo., México., julio 2024



Mineral de la Reforma, Hgo., a 11 de julio de 2024

**Número de control:** ICBI-D/930/2024

**Asunto:** Autorización de impresión.

**MTRA. OJUKY DEL ROCIO ISLAS MALDONADO**  
**DIRECTORA DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR DE LA UAEH**

El Comité Tutorial de la tesis titulada **“Obtención de adsorbentes con polímeros postindustriales útiles en remoción de colorantes textiles”** realizado por la sustentante **Esmeralda Gómez Merino** con **número de cuenta 477765** perteneciente al programa de la **Maestría en Ciencias de los Materiales**, una vez que ha revisado, analizado y evaluado el documento recepcional de acuerdo a lo estipulado en el Artículo 110 del Reglamento de Estudios de Posgrado, tiene a bien extender la presente:

**AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN**

Por lo que la sustentante deberá cumplir los requisitos del Reglamento de Estudios de Posgrado y con lo establecido en el proceso de grado vigente.

Atentamente  
 “Amor, Orden y Progreso”

El Comité Tutorial

Dra. Ana María Herrera González  
 Directora de tesis

Dra. Alejandra Alicia Peláez Cid  
 Codirectora

Dra. Nayely Trejo Carbajal  
 Titular

Dr. Jesús García Serrano  
 Suplente

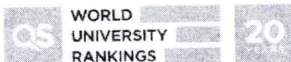
Mtro. Gabriel Vergara Rodríguez  
 Director de ICBI



Ciudad del Conocimiento, Carretera Pachuca-Turancingo Km. 4.5 Colonia Carboneras, Mineral de la Reforma, Hidalgo, México. C.P. 42184  
 Teléfono: 771 71 720 00 Ext. 40001

direccion\_icbi@uaeh.edu.mx,  
 acevedo@uaeh.edu.mx

GVR/IBO



La vida no es fácil para ninguno de nosotros. Debemos tener perseverancia y, sobre todo, confianza en nosotros mismos. Debemos creer que estamos dotados para algo y que esto debe ser alcanzado.

Marie Curie

El presente trabajo se realizó en el laboratorio de polímeros del Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo bajo la dirección de la Dra. Ana María Herrera González y la Dra. Alejandra Alicia Peláez Cid.



## **Agradecimientos**

A la Dra. Ana María Herrera González por permitirme realizar la maestría con su grupo de trabajo, por sus clases impartidas, revisiones precisas y correcciones necesarias para la elaboración del presente trabajo.

A la Dra. Alejandra Alicia Peláez Cid, por motivarme para seguir estudiando, sin importar el tiempo, prepararme para este paso en mi vida escolar, le agradezco por el tiempo para la revisión de avances y del presente trabajo.

A la Dra. Nayely Trejo Carbajal por facilitarme la materia prima que empleé en el presente trabajo, su tiempo compartido durante mi estancia en la maestría, en clases y en el laboratorio, su paciencia para aclarar mis dudas escolares fuera del aula de clases. Le aprecio y agradezco su apoyo moral y ánimos que siempre me dió.

Al Dr. Jesús García Serrano, por su tiempo y apoyo en el desarrollo del presente trabajo, e impartición de conocimientos nuevos en el aula de clases.

Al Dr. Fernando Donado Pérez, por su amabilidad al permitirme realizar trabajo experimental durante el período de fallas técnicas en el área académica,

Al Consejo Nacional de Humanidades Ciencia y Tecnología (CONAHCyT), por los recursos que me otorgaron a través de la beca 822843, promoviendo la investigación y el interés por los estudios de posgrado.

A mis compañeros Ricardo, Fernando y Miguel por su apoyo en el uso del equipo de FT-IR y múltiples favores en los que me apoyaron durante mi estancia en la maestría, les agradezco su compañía, amistad y momentos compartidos en el laboratorio de polímeros. A Mari Carmen por ayudarme en el uso del TGA y DSC.

A la M. C. María Teresa Méndez Bautista y Dr. Francisco Raúl Barrientos Hernández, coordinadores de la maestría durante mi estancia, por las facilidades brindadas.

A los miembros del jurado y revisores de mi tesis de maestría: Dra. Ana María Herrera González, Dra. Alejandra Alicia Peláez Cid, Dra. Nayely Trejo Carbajal y Dr. Jesús García Serrano.

## **Dedicatorias**

A mis papás que me han apoyado de forma incondicional, han estado pendientes de mí sin importar las distancias, escuchándome, brindándome un consejo, motivándome, llenándome de amor y de cariño. Gracias por formarme, con bases sólidas, LOS AMO MUCHO PAPÁS.

A mi hermano Olda (mi chibis), que siempre me motiva a seguir adelante, hacerme reír en todo momento, apoyándome en todo lo que me propongo hacer y me anima a seguir adelante superándome cada día y sobre todo animarme a ser feliz con lo que hago. A mi hermano Aldo, que siempre me has apoyado, felicitado y motivado para hacer lo que me gusta, brindándome su apoyo incondicional, gracias familia por ser un soporte para mí, en todos los sentidos. Y a Nyme por ser parte de ella.

Dedico este trabajo a mi familia y a la Dra. Alejandra Alicia Peláez Cid quienes me han apoyado y motivado para dar este paso en mi vida académica, y siempre superándome en cada uno de los peldaños que se me presentan día a día, gracias, por todo su apoyo incondicional.

A mis familiares tantos paternos y maternos que me han acompañado, especialmente a mi tía Gris, mis primos Luis y Violeta que estuvieron muy presentes en esta etapa de mi vida.

A mi novio Edgar Ricardo que me apoyó, motivó y ayudó en múltiples actividades, como en las muchas ediciones y detalles que quería plasmar en mis trabajos, gracias por tu compañía.

A mis amigas Diana Laura, M. Guadalupe, Carlotita, Maguito, que siempre han estado presentes en mi vida.

A Sebas, Bernardo, Gael, Ale, Andy, Ximenita, Ana Karen, Jaqui, Celeste, Fernandita, Victoria, Ali y Brandon compañeros de laboratorio y amigos, gracias por apoyarme y acompañarme, las risas nunca faltaron con ustedes.

A mis compañeras de generación (Nancy, Paty y Diana) y Al Dr. Edgar Arturo Urbiola que a mi llegada a la UAEH me animaron para seguir adelante.

A todos los doctores y profesores que compartieron sus conocimientos conmigo dentro y fuera de un aula de clases. Y a todo el personal administrativo presente en mi estadía de la maestría.

## Comunicaciones derivadas

Se participó en el 31<sup>st</sup> International Materials Research Congress del 13 al 28 de agosto de 2023 en Cancún, México, con el trabajo "Obtaining adsorbents with postindustrial polymers useful in removing textile dyes".

Se participó en el XVI Encuentro de Investigación del Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales del 27 al 29 de septiembre de 2023 en la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México, con el trabajo "Síntesis de carbones activados a partir de pañales desechables para la adsorción de colorantes textiles".

A.A. Peláez Cid, D.L. López Hernández, E. Gómez Merino, A.M. Herrera González, Síntesis de carbones activados con semillas de chirimoya y su aplicación en la adsorción de colorantes textiles, Revista Internacional de Contaminación Ambiental, 40 (2024) 263-278.

Se participará en el 32<sup>nd</sup> International Materials Research Congress del 18 al 23 de agosto de 2024 en Cancún, México, con el trabajo "A novel approach to produce chemically activated carbon from disposable diapers useful in the adsorption of textile dyes".

## Índice

<b>Introducción</b> .....	1
<b>Capítulo I. Antecedentes</b> .....	3
1.1 Polímeros .....	4
1.2 Clasificación de polímeros .....	4
1.2.1 Polímeros con base en su origen .....	5
1.2.2 Polímeros con base en su estructura .....	5
1.2.3 Polímeros con base en su costo – producción .....	6
1.3 Polielectrolitos .....	8
1.4 Aplicaciones de polielectrolitos .....	8
1.5 Contaminación generada por residuos sólidos urbanos .....	9
1.6 Contaminación por residuos poliméricos postindustriales .....	12
1.7 Reciclaje de polímeros postindustriales .....	14
1.8 Polímeros postindustriales .....	16
1.9 Características de los pañales .....	17
1.10 Agua residual .....	19
1.11 Colorantes .....	20
1.12 Clasificación de los colorantes .....	22
1.12.1 Clasificación por su procedencia .....	22
1.12.2 Clasificación según el Colour Index (C.I.) .....	22
1.12.3 Clasificación por su aplicación .....	23
1.12.4 Clasificación por su estructura química .....	23
1.12.5 Clasificación por su nombre comercial .....	24
1.13 Métodos de tratamiento de aguas residuales .....	24
1.13.1 Coagulación – floculación .....	25
1.13.2 Sedimentación .....	26
1.13.3 Electroquímicos .....	26
1.13.4 Biológicos .....	27
1.13.5 Adsorción .....	28
1.14 Factores que influyen en la adsorción .....	29
1.15 Carbón activado (CA) .....	30
1.15.1 Carbones activados a partir de residuos agroindustriales .....	32
1.15.2 Carbones activados a partir de residuos poliméricos postindustriales .....	33

<b>Justificación</b> .....	35
<b>Planteamiento del problema</b> .....	36
<b>Objetivos</b> .....	37
Objetivo general.....	37
Objetivos específicos.....	37
<b>Hipótesis</b> .....	38
<b>Capítulo II. Metodología experimental</b> .....	39
2.1 Recolección de la materia prima .....	40
2.2 Propiedades de los polímeros que constituyen los pañales .....	40
2.3 Porcentaje de humedad .....	41
2.4 Obtención de carbón activado (CA).....	42
2.4.1 Obtención de carbones activados químicamente .....	42
2.4.2 Obtención de carbones activados físicamente .....	43
2.5 Caracterización por calorimetría diferencial de barrido (DSC) .....	43
2.6 Caracterización por análisis termogravimétrico (TGA) .....	43
2.7 Análisis de espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier (FT-IR).....	44
2.8 Análisis por microscopia electrónica de barrido (SEM) .....	44
2.9 Parámetros texturales por adsorción de N <sub>2</sub> (BET) .....	44
2.10 Determinación del punto de carga cero (pH <sub>pzc</sub> ).....	44
2.11 Densidad aparente .....	45
2.12 Selección de colorantes para el proceso de adsorción .....	45
2.13 Adsorción estática .....	48
2.14 Cinética de adsorción .....	48
2.15 Construcción de curvas de calibración .....	49
2.16 Construcción de isotermas de adsorción.....	50
2.17 Adsorción estática en aguas residuales .....	51
<b>Capítulo III. Resultados y discusión</b> .....	53
3.1 Datos generales de la materia prima.....	54
3.2 Porcentaje de humedad .....	54
3.3 Obtención de carbones activados (CAs) .....	55
3.3.1 Obtención de carbones activados físicamente .....	55
3.3.2 Obtención de carbones activados químicamente .....	57
3.4 Caracterización por análisis termogravimétrico (TGA) .....	59

3.5 Caracterización por calorimetría diferencial de barrido (DSC) .....	62
3.6 Caracterización por espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier (FT-IR).....	63
3.7 Análisis por microscopía electrónica de barrido.....	66
3.8 Parámetros texturales por isoterma de adsorción de N <sub>2</sub> (BET).....	70
3.9 Determinación del punto de carga cero (pH <sub>pzc</sub> ).....	71
3.10 Densidad aparente .....	71
3.11 Adsorción estática .....	72
3.12 Cinética de adsorción .....	76
3.13 Isotermas de adsorción .....	80
3.15 Adsorción en agua residual .....	83
3.16 Análisis de FT-IR del carbón activado después de la adsorción .....	84
<b>Conclusiones</b> .....	86
<b>Referencias</b> .....	88
<b>Anexos</b> .....	97
Anexo 1. Rampas de calentamiento de los carbones activados físicos .....	98
Anexo 2. Rampas de calentamiento de los carbones activados químicos.....	99
Anexo 3. Termogramas de TGA.....	100
Anexo 4. Termogramas de DSC .....	106
Anexo 5. Micrografías de SEM de carbones activados .....	106
Anexo 6. Isotermas de adsorción – desorción de N <sub>2</sub> .....	109
Anexo 7. Adsorción estática .....	111
Anexo 8. Cinéticas de adsorción.....	113
Anexo 9. Gráficas de perfil de concentración.....	117
Anexo 10. Isotermas de adsorción .....	121
Anexo 11. Productos de trabajo.....	125

## Índice de figuras

Figura 1. Clasificación de los polímeros.....	5
Figura 2. Estructura de polímero a) lineal, b) ramificado y c) entrecruzado. ....	6
Figura 3. Pirámide de relación costo-producción de polímeros y su demanda. ....	7
Figura 4. Polielectrolito a) aniónico, b) catiónico y c) anfólito .....	8
Figura 5. Incremento de RSU por año en México. ....	11
Figura 6. Categorías de residuos sólidos domésticos en 2010.....	13
Figura 7. Cantidad de residuos predominantes mal desechados en las costas a nivel mundial.....	14
Figura 8. Códigos de reciclado para separación de plásticos de acuerdo con la ASTM.....	15
Figura 9. Posición de los polímeros que forman parte de un pañal desechable. ....	18
Figura 10. Estructura química del azobenceno. ....	21
Figura 11. Representación esquemática de la porosidad de un adsorbente. ....	31
Figura 12. Estructura química de los polímeros que constituyen al pañal. ....	40
Figura 13. Estructura química y características de los colorantes textiles básicos o catiónicos. ....	46
Figura 14. Estructura química y características de los colorantes textiles ácidos o aniónicos. ....	47
Figura 15. Curvas de calibración de colorantes en soluciones acuosas. ....	50
Figura 16. Rampa de calentamiento de CarFPS300. ....	56
Figura 17. Rampa de calentamiento del CarQPS400/25.....	57
Figura 18. Termogramas de TGA de la materia prima utilizada. ....	59
Figura 19. Termogramas de TGA de los carbones activados físicamente.....	60
Figura 20. Termogramas de TGA de los carbones activados químicamente. ....	61
Figura 21. Termograma de DSC de los componentes del pañal.....	63
Figura 22. Espectro FT-IR del poliacrilato de sodio adsorbente presente en los pañales.....	64
Figura 23. Espectro FT-IR de carbones activados físicamente.....	65
Figura 24. Espectro FT-IR de carbones activados químicamente. ....	66
Figura 25. Micrografías de SEM de CarFPS400 a), b) y c) CarFPS350 d), e) y f) CarFPS300 g), h) e i). .....	68
Figura 26. Micrografías de SEM de CarQPS400 a), b) y c) CarQPS400/50 d), e) y f) CarQPS400/25 g), h), e i). ....	69
Figura 27. $pH_{pzc}$ de los carbones activados a) física y b) químicamente.....	71
Figura 28. Adsorción estática sobre a) CarFPS400 y b) CarFPS300. ....	74
Figura 29. Adsorción estática sobre a) CarQPS400/50 y b) CarQPS400/25.....	75
Figura 30. Cinética de adsorción sobre CarFPS300 con colorantes básicos. ....	78
Figura 31. Cinética de adsorción sobre CarQPS400/25 con colorantes a) básicos y b) ácidos. ....	80
Figura 32. Isotermas de adsorción sobre CarQPS400/25 con colorantes a) básicos y b) ácidos. ....	82
Figura 33. Espectros FT-IR de a) CarQPS400/25 después de la adsorción de BB9, CarQPS400/25 y BB9 en el rango de $4000 - 500 \text{ cm}^{-1}$ b) ampliación de $2000 - 500 \text{ cm}^{-1}$ . ....	84
Figura 34. Espectros FT-IR de a) CarQPS400/25 después de la adsorción de AY73, CarQPS400/25 y AY73 en el rango de $4000 - 500 \text{ cm}^{-1}$ b) ampliación de $2000 - 500 \text{ cm}^{-1}$ . ....	85



## Índice de tablas

Tabla 1. Tiempo de degradación de algunos productos de consumo frecuente.....	12
Tabla 2. Cromóforos más comunes. ....	20
Tabla 3. Auxocromos más comunes. ....	21
Tabla 4. Uso de diferentes colorantes en fibras textiles .....	23
Tabla 5. Selección del número de constitución (C.N.) del C.I.....	24
Tabla 6. Peso unitario y promedio de la materia prima .....	54
Tabla 7. Cálculo del porcentaje de humedad de las muestras.....	55
Tabla 8. Rendimiento de los carbones activados.....	58
Tabla 9. Parámetros texturales de los carbones activados químicamente.....	70
Tabla 10. Densidad aparente de los carbones activados.....	72
Tabla 11. Cinética de adsorción de pseudo segundo orden para cada colorante en los carbones activados físicamente.....	77
Tabla 12. Cinética de adsorción de pseudo segundo orden para cada colorante en los carbones activados químicamente.....	79
Tabla 13. Parámetros de Langmuir de los colorantes sobre los carbones activados químicamente.....	81
Tabla 14. Porcentaje de remoción de color.....	83

## Símbolos y abreviaturas

Clave	Significado
A	Absorbancia
AATCC	American Association of Textile Chemists and Colorist
AB74	Azul Ácido 74
AO52	Naranja Ácido 52
$a_t$	Cantidad adsorbida al tiempo t
$a_{eq}$	Cantidad adsorbida cuando se alcanza el equilibrio de adsorción
$a_m$	Capacidad de la monocapa
ASTM	American Society for Testing and Materials
ATR	Reflectancia Totalmente Atenuada
AY73	Amarillo Ácido 73
b	Longitud de paso de la luz a través de la solución
BB3	Azul Básico 3
BB9	Azul Básico 9
BG4	Verde Básico 4
BR18	Rojo Básico 18
BV3	Violeta Básico 3
BY28	Amarillo Básico 28
BET	Brunauer-Emmet-Teller
C	Concentración
$C_{eq}$	Concentración de equilibrio
C.I.	Colour Index
CarFPS400	Carbón activado físicamente con agua y carbonizado a 400 °C
CarFPS350	Carbón activado físicamente con agua y carbonizado a 350 °C
CarFPS300	Carbón activado físicamente con agua y carbonizado a 300 °C
CarQPS400	Carbón activado químicamente con H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> (85 %) y carbonizado a 400 °C
CarQPS400/50	Carbón activado químicamente con H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> (42.5 %) y carbonizado a 400 °C
CarQPS400/25	Carbón activado químicamente con H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> (21.25 %) y carbonizado a 400 °C
CarQPS400/10	Carbón activado químicamente con H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> (10 %) y carbonizado a 400 °C
$D_{PromPoros}$	Diámetro promedio de poros
DBO	Demanda Bioquímica de Oxígeno
DO26	Naranja Directo 26
DQO	Demanda Química de Oxígeno
DSC	Calorimetría Diferencial de Barrido
DT86	Turquesa Directo 86
EPA	Environmental Protection Agency
FD	Factor de dilución
FT-IR	Espectroscopia de Infrarrojo por transformada de Fourier
H	Velocidad de adsorción
$k_2$	Constante cinética de adsorción de pseudo segundo orden

$K_L$	Constante de Langmuir
$\lambda$	Longitud de onda
$\lambda_{\max}$	Longitud de onda de máxima absorbancia
IUPAC	International Union of Pure and Applied Chemistry
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía e Informática
SEM	Scanning Electron Microscope
MBR	Reactores Biológicos de Membrana
NOM	Materia Orgánica Natural
$\text{pH}_{\text{pzc}}$	Punto de carga cero
PH	Peso del material humedo
PS	Peso del material seco
$R^2$	Coefficiente de correlación
RSU	Residuos sólidos urbanos
RME	Residuos de manejo especial
RP	Residuos peligrosos
$R_L$	Parámetro de equilibrio
$S_{\text{BET}}$	Superficie específica por adsorción de $\text{N}_2$
SBR	Reactor Biológico Secuencial
SDC	Society of Dyers and Colourists
SOC	Compuestos orgánicos sintéticos
$t$	Tiempo de contacto entre el adsorbente y el adsorbato
$T_g$	Temperatura de transición vítrea
TGA	Análisis termogravimétrico
$T_m$	Temperatura de fusión
$\nu$	Frecuencia
VA	Volumen de agua
VAC	Volumen de la alícuota o solución de colorante
$V_{\mu\text{P}}$	Volumen de los microporos
$V_{\text{MesOP}}$	Volumen de los mesoporos
$V_{\text{TP}}$	Volumen total de poro
VT	Volumen total
W.W.	Agua residual

## Resumen

El presente trabajo reporta la obtención, caracterización y aplicación de carbones activados física y químicamente obtenidos de pañales desechables para bebés después de cumplir su función. Los pañales son un desecho que se produce en alto volumen, y pueden tardar más de 500 años en degradarse. Este desecho es el 6.52 % en peso del total de los desechos sólidos en la basura, contaminando el medio ambiente. La producción de materiales adsorbentes usando pañales después de que han completado su vida útil, reduciría su impacto en el ambiente.

Los carbones se obtuvieron por activación física y química. Los carbones físicos se activaron con vapor de agua, y se varió la temperatura de carbonización. Los carbones químicos se activaron utilizando  $H_3PO_4$  a diferentes concentraciones. La caracterización de los carbones activados se realizó mediante FT-IR,  $pH_{pzc}$ , TGA, DSC, SEM y  $S_{BET}$ . Las pruebas de absorción revelaron que los carbones activados químicamente eliminan en porcentajes por arriba del 96 %, los colorantes básicos; azul aztrazón (BB3), amarillo oro maxilón GL (BY28), rojo maxilón 2GL (BR18), azul de metileno (BB9), cristal violeta (BV3), verde de malaquita (BG4) y 79 % para los colorantes ácidos; fluoresceína (AY73), naranja de metilo (AO52), índigo carmín (AB74), turquesa sirius (DT86) y naranja difenilo (DO26).

## **Introducción**

En la actualidad la contaminación es un problema con alto impacto negativo a nivel mundial. Gran parte de esta contaminación va directamente a los cuerpos de agua, esto se ve reflejado en su escasez en todo el mundo, por lo cual se han buscado diferentes métodos de tratamiento de aguas residuales. Uno de los métodos que más se han empleado por su eficiencia en la remoción de cualquier contaminante es la adsorción usando de carbones activados (CA). Los CA se obtienen de la madera, lo cual promueve la tala de árboles que afecta negativamente al planeta.

Por esto se ha buscado sustituir la madera con otros materiales para la obtención de los carbones activados. Se ha reportado el uso de huesos de animales, residuos agroindustriales y recientemente los residuos poliméricos postindustriales. Todos estos materiales se han empleado para obtener carbones activados en busca de un doble beneficio, reducir los volúmenes de basura y obtener un material capaz de reducir la contaminación del agua.

El trabajo de esta tesis se divide en tres capítulos. El primer capítulo muestra los antecedentes y conceptos necesarios para desarrollar el trabajo. Se incluye la definición de un polímero, cómo es que estos se encuentran en la sociedad, su uso, su contribución en la contaminación del medio ambiente y como ha incrementado su producción y desecho a lo largo del tiempo. También se incluyen algunos métodos de tratamiento de aguas residuales específicamente el proceso de adsorción usando carbones activados. El capítulo I también incluye algunos CA obtenidos a partir de residuos agroindustriales y CA obtenidos a partir de desechos poliméricos postindustriales.

En el segundo capítulo se presenta la metodología experimental, iniciando con la obtención de los carbones activados, su caracterización y pruebas de adsorción con colorantes textiles.

Por último, en el tercer capítulo se presentan los resultados y discusión, en el cual se muestran los resultados de los datos generales de la materia prima y la caracterización de los carbones activados, realizada por análisis termogravimétrico (TGA), calorimetría diferencial de barrido (DSC), espectroscopía infrarroja por la transformada de Fourier (FT-IR), microscopía electrónica de barrido (SEM),

fisisorción de N<sub>2</sub> (BET), punto de carga cero (pH<sub>pzc</sub>) y su densidad aparente. Las pruebas de adsorción fueron, la adsorción estática, cinética de adsorción, isothermas de adsorción, adsorción de colorantes en aguas residuales y espectros FT-IR de los carbones después de la adsorción.

# Capítulo I. Antecedentes

## **1.1 Polímeros**

Los primeros humanos sólo tenían acceso a un número muy limitado de materiales naturales como: piedra, madera, arcilla, pieles, etc. Con el tiempo descubrieron técnicas para producir materiales que tuvieran propiedades superiores a las naturales, también se descubrió que las propiedades de un material pueden verse alteradas por tratamientos térmicos y por la adición de otros elementos. El empleo de materiales involucra un proceso de selección que implica decidir un conjunto de materiales para una aplicación determinada, comprendiendo así la relación entre los elementos estructurales de los materiales y sus propiedades.

Los materiales poliméricos han evolucionado con características bastante especializadas que satisfacen las necesidades de nuestra sociedad moderna y compleja [1]. Los polímeros son moléculas de gran tamaño, constituidas por “eslabones” orgánicos denominados monómeros, unidos mediante enlaces covalentes. Los eslabones están formados fundamentalmente, por átomos de carbono y pueden poseer grupos laterales con uno o más átomos. Estas moléculas orgánicas son las que constituyen los materiales plásticos que conocemos y también los tejidos de los seres vivos (piel, músculos, tela de araña, seda, etc.) [2].

Un polímero lo define la IUPAC como, molécula de relativo alto peso molecular, cuya estructura está constituida esencialmente por la repetición múltiple de unidades monoméricas. Entendido como relativo alto peso molecular que, al retirar o adicionar una o varias unidades monoméricas, las propiedades del polímero no cambian [3].

## **1.2 Clasificación de polímeros**

Los polímeros a lo largo del tiempo se han clasificado de diferentes formas algunas de estas clasificaciones son por su estructura, número de monómeros, termomecánica, origen, tipo de elementos por los que está conformado, tacticidad, por su mecanismo de polimerización o por su relación de costo-producción [2]. En la Figura 1 se muestra un esquema de algunas clasificaciones de los polímeros.



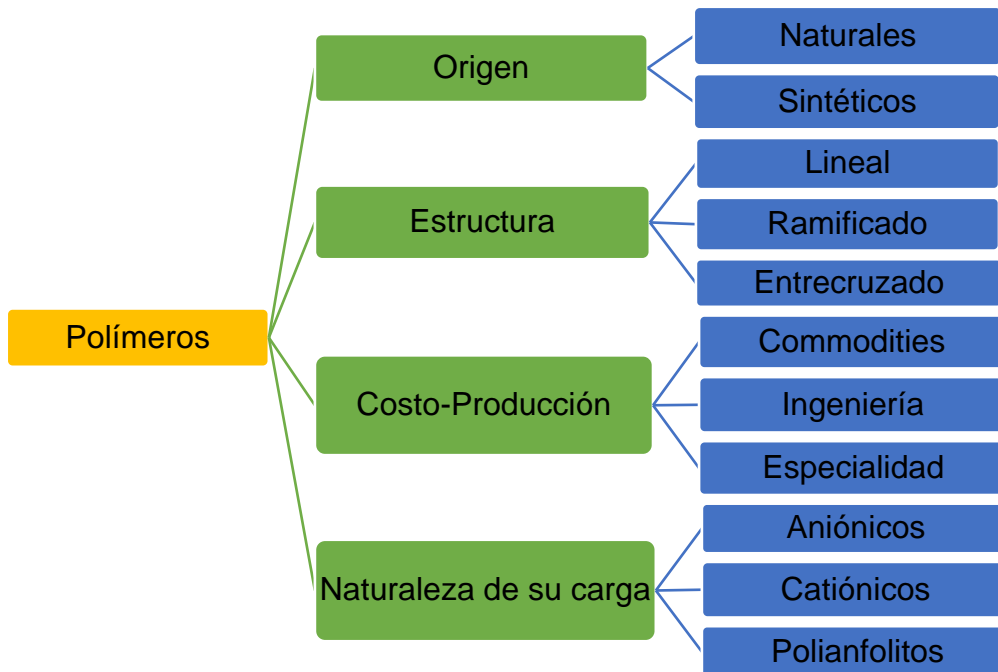


Figura 1. Clasificación de los polímeros.

En la clasificación de los polímeros se consideran diversas características de ellos. Sin embargo, se muestran las de interés para el presente trabajo.

### 1.2.1 Polímeros con base en su origen

Dentro de esta clasificación se encuentran los polímeros naturales y los sintéticos.

Polímeros naturales: están constituidos por moléculas orgánicas de origen natural, esto es, se producen dentro de las células animales o en plantas.

Polímeros sintéticos: estos son producidos por el hombre, mediante reacciones químicas partiendo de sustancias simples. Los polímeros obtenidos pueden ser semejantes a los existentes en la naturaleza o polímeros nuevos. La finalidad de diseñar y sintetizar polímeros es proveerlos de propiedades específicas [2].

### 1.2.2 Polímeros con base en su estructura

Otra clasificación de los polímeros es por la estructura que forman y esta se divide en tres grupos principales:

Polímeros lineales: su característica es que están constituidos por una cadena principal carbono – carbono, compuesto de macromoléculas lineales, un ejemplo es el polipropileno que solo tiene un grupo metilo pudiendo tener ocupar dos posiciones diferentes.

Polímeros ramificados: se caracteriza por tener en la cadena principal puntos de los que emanan cadenas lineales, o cadenas con al menos una bifurcación.

Polímeros entrecruzados: regiones de la cadena polimérica en la cual emanan cadenas poliméricas de diferentes tamaños las cuales están conectadas con otras cadenas poliméricas, en la mayoría de los casos, un entrecruzado es una estructura reticulada [2, 3].

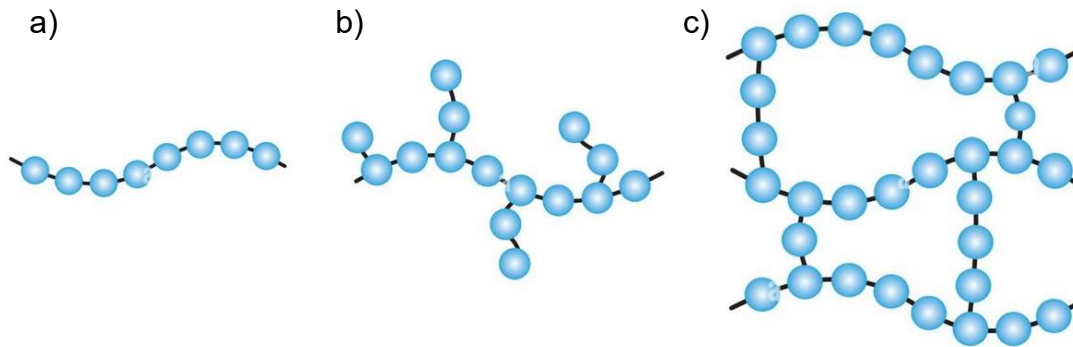


Figura 2. Estructura de polímero a) lineal, b) ramificado y c) entrecruzado.

La variación de la estructura de los polímeros es importante, porque les confiere diferentes características y propiedades. Las ramificaciones a lo largo de las cadenas disminuyen la cristalinidad [4].

### 1.2.3 Polímeros con base en su costo – producción

Los polímeros se han clasificado también por su relación de costo-producción. En la Figura 3 se muestra la pirámide de relación costo-producción de polímeros [5,6].

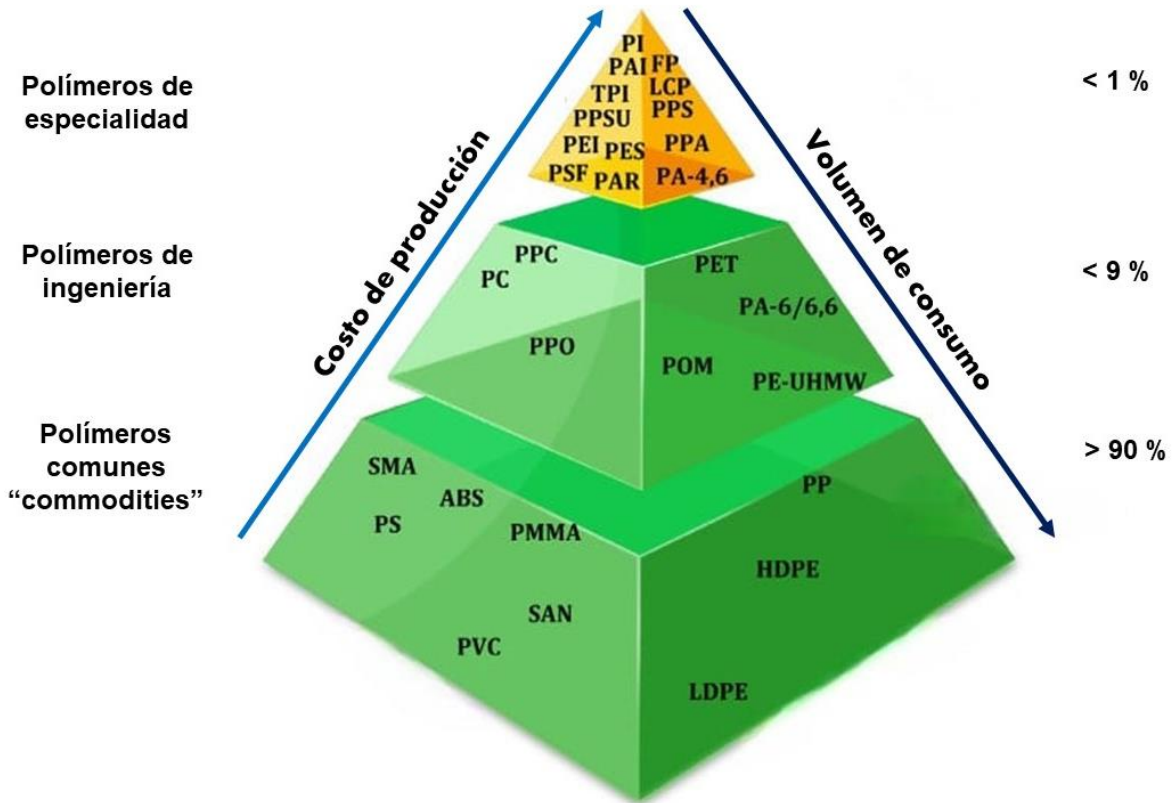


Figura 3. Pirámide de relación costo-producción de polímeros y su demanda.

Los polímeros de especialidad: son los de mayor resistencia mecánica, térmica, química o combinación de propiedades y son sintetizados o formulados de manera única como son los polímeros de cristal líquido [7].

Los polímeros de ingeniería: son polímeros con importantes propiedades físicas, como excelente resistencia mecánica, térmica, química y hasta buenas propiedades dieléctricas con un mayor costo y valor en el mercado, estas características los destacan de los commodities, pero son más comunes que los de especialidad [8].

Los polímeros comunes o commodities: son los más sencillos de sintetizar y con propiedades físicas inferiores [7]. Su principal característica y ventaja es que tienen un bajo costo y un bajo nivel de procesamiento. Se trata de polímeros que se producen en gran cantidad (conocidos también como “commodities”), de gran volumen de consumo y de bajo precio [6, 9].

### 1.3 Polielectrolitos

Un polielectrolito es definido por la IUPAC como un polímero compuesto por macromoléculas en las que una porción sustancial de las unidades constitucionales, contiene grupos iónicos o ionizables o ambos. Estos pueden ser sintéticos o naturales, algunos ejemplos de estos son ácidos nucleicos, proteínas, ácidos teicoicos, algunos polipéptidos y algunos polisacáridos [3].

Dentro de la clasificación de los polielectrolitos se encuentran tres categorías principales; los aniónicos, catiónicos y anfóteros como se muestra en la Figura 4. Los cuales se clasifican por la naturaleza de las cargas contenidas en su estructura, los polielectrolitos aniónicos contienen sólo cargas negativas, en cuanto a los catiónicos poseen sólo cargas positivas y los anfóteros tiene ambas cargas (positivas y negativas) en su estructura, en diferentes proporciones. La presencia de las cargas en su estructura les da aplicaciones específicas a los polielectrolitos.

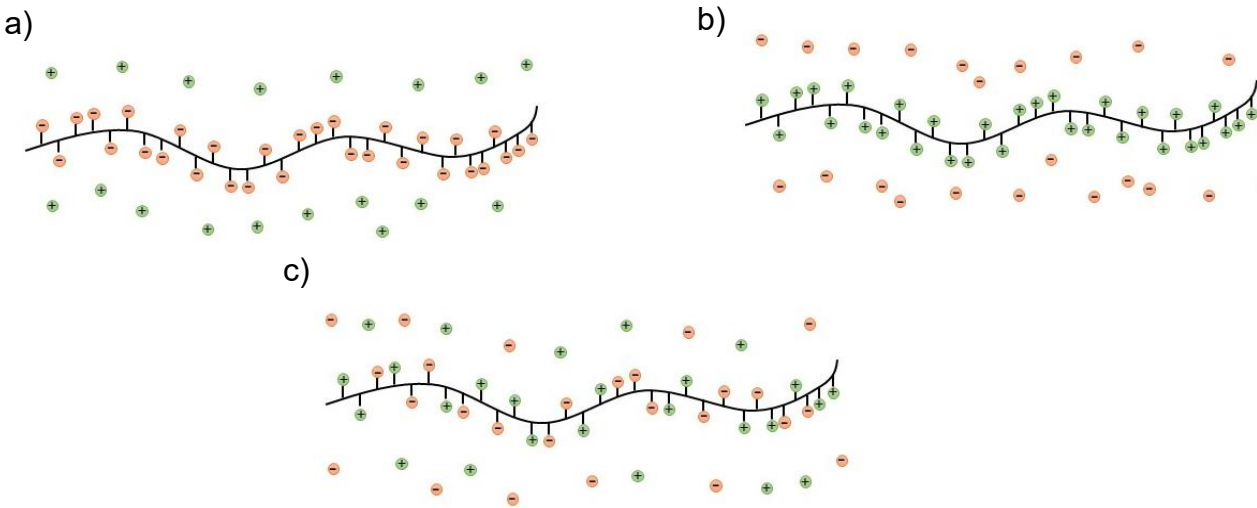


Figura 4. Polielectrolito a) aniónico, b) catiónico y c) anfótero

### 1.4 Aplicaciones de polielectrolitos

Los polielectrolitos han tenido diversas aplicaciones, algunas de ellas son; membranas [10], resinas de intercambio iónico, como retardantes de flama ó ignífugas, super absorbentes, etc [11].

Otra de las aplicaciones de los polielectrolitos es en el tratamiento de aguas incluidas las residuales, estos se han empleado en procesos de la coagulación – floculación [12], de adsorción [13], estos han presentado diversas ventajas como:

- Facilidad de aplicación
- Soluciones homogéneas y rápidas de obtener
- Mejor tamaño y formación de flóculos para facilitar la separación
- Mejor clarificación del agua
- Deshidratación y reducción del volumen de los lodos
- Fácil separación de líquidos y sólidos
- Fácil recuperación de metales presentes en el agua
- Mejor calidad en el proceso de filtrado
- Rendimiento mejorado en la separación del agua

Por estas razones se ha implementado el uso de los polielectrolitos en los sistemas de tratamiento de aguas residuales [14].

### **1.5 Contaminación generada por residuos sólidos urbanos**

La producción de alimentos, así como la fabricación y el consumo de bienes para el hogar y la industria son ejemplos de actividades cotidianas que producen una gran variedad de residuos sólidos. Dependiendo de su composición, la tasa de generación y manejo, pueden tener efectos muy diversos en la población y en el ambiente llegando, en algunos casos, a ser altamente peligrosos, sobre todo cuando involucran compuestos tóxicos que se manejan de manera inadecuada [15].

Los residuos se definen como los materiales o productos que se desechan ya sea en estado sólido, semisólido o líquido que se contienen en recipientes o depósitos, y que necesitan estar sujetos a tratamiento o disposición final con base en lo dispuesto en la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos [16]. Se clasifican de acuerdo a sus características y orígenes en tres grupos: residuos sólidos urbanos (RSU), residuos de manejo especial (RME) y residuos peligrosos (RP) [15].

En 2010 se reportó que en Estados Unidos se generaron, alrededor de 250 millones de toneladas de basura [17]. En el año 2020 se reportó que se generaron en todo el mundo 1.4 billones de toneladas de Residuos Sólidos Urbanos (RSU) al año, esto nos lleva a una media de 1.2 kg generados por persona al día. En el mundo existen cerca de 198 países, pero casi la mitad de todo el residuo es generado por apenas 30 países (15 %) siendo los países más ricos, lo que nos lleva a una clara relación entre la generación de residuos y el poder económico. Se han desarrollado investigaciones por el Banco Mundial de las Naciones Unidas, donde se prevé un aumento del 350 % de los residuos sólidos urbanos para el 2050, ya que la estima poblacional es de 9 billones de habitantes, que generaran 4 billones de toneladas de residuos urbanos hasta ese año. Tiene un fuerte indicio de certeza principalmente por el hecho que, en los últimos 30 años, el total de los residuos producidos en el mundo fue 3 veces mayor que el crecimiento de la población [18].

En México se generan diariamente 102,895 toneladas de residuos, de los cuales se recolectan 83.93 % y se disponen en sitios de disposición final 78.54 %, reciclando únicamente el 9.63 % de los residuos generados. En el país, sigue predominando el manejo básico de los RSU que consiste en recolectar y disponer los residuos en rellenos sanitarios, desaprovechando aquellos residuos que son susceptibles de reincorporarse al sistema productivo, lo que disminuiría la demanda y explotación de nuevos recursos. A diferencia de países como Suiza, Países Bajos, Alemania, Bélgica, Suecia, Austria y Dinamarca; la disposición final de todos los residuos que son colocados en rellenos sanitarios es menor al 5 % [19].

A lo largo de los años ha incrementado la cantidad de RSU que se producen anualmente en México como se muestra en la Figura 5, donde se presentan la cantidad de RSU producidos en cada año desde 1997 hasta el año 2022 [20-23].

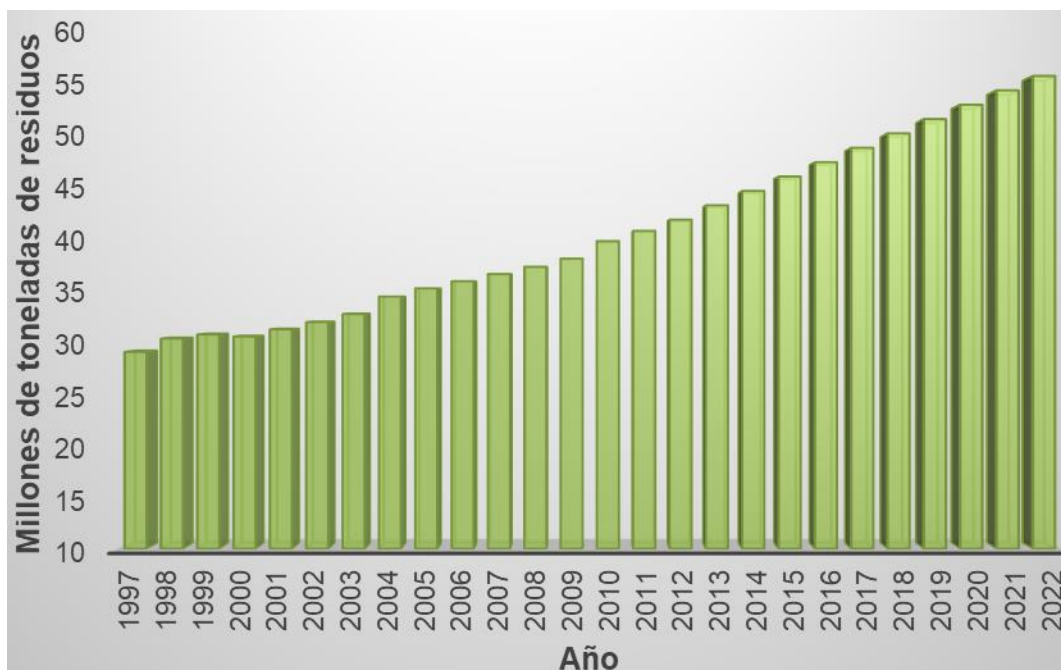


Figura 5. Incremento de RSU por año en México.

Dentro de estos residuos se encuentran gran variedad de productos que como ya se ha mencionado son de uso diario o cotidiano y no todos los residuos llegan a ser recolectados, ni llegan a un sitio de disposición final. Algunos de los residuos tienen la propiedad de ser biodegradables, esto les permite descomponerse en el ambiente gracias a la acción de los microorganismos, en un período de tiempo relativamente corto, siempre y cuando existan las condiciones de aire, temperatura y humedad para que ocurra ello. Esto no significa que se puedan o deban tirar en cualquier lugar, ya que dependiendo del residuo que se trate tardará un tiempo mínimo necesario para descomponerse, considerando las condiciones ya mencionadas. En la Tabla 1 se muestran algunos residuos y el tiempo que requieren para descomponerse [24].

Tabla 1. Tiempo de degradación de algunos productos de consumo frecuente.

Producto	Tiempo de degradación
Cáscara de plátano	2 a 10 días
Papel periódico	2 a 4 semanas
Algodón	1 a 5 meses
Bolsas de papel	2 a 5 meses
Cáscara de naranja	6 meses
Colillas de cigarro	1 a 12 años
Envase de leche	5 años
Zapatos de cuero	25 a 40 años
Ropa sintética	30 a 40 años
Toallas sanitarias y pañales desechables	500 a 800 años
Bolsas de plástico	15 a 1000 años
Botellas de vidrio	1,000,000 de años

### 1.6 Contaminación por residuos poliméricos postindustriales

Muchos de los residuos producidos día a día son residuos poliméricos, que una vez cumplida su vida útil son desechados y en ocasiones no de la manera correcta, estos objetos se conocen como productos de un solo uso (cubre bocas, material de curación, empaque de alimento, toallas femeninas, pañales desechables, etc.) [25]. Los plásticos (commodities) son materiales de bajo costo, ligeros y duraderos, que se pueden transformar en una gran variedad de productos en una amplia gama de aplicaciones, su producción ha incrementado en los últimos 60 años. Se ha reportado que alrededor del 4 % de la producción mundial de petróleo, gas y recursos no renovables se emplean como materia prima para los polímeros plásticos, gran parte se usa para producir envases desechables u otros productos de corta duración que se desecharan en menos de un año de su fabricación.

Estos dos hechos han dado indicio de que el uso actual de los plásticos no es sostenible, considerando su corta durabilidad y cantidades sustanciales. Al final de su vida útil se acumulan en los basureros y en los hábitats naturales de todo el



mundo. Desde los años 60s se han fabricado 8,300 millones de toneladas de plásticos de las cuales 4,900 millones de toneladas están acumuladas en los basureros, rellenos sanitarios o en el entorno natural [8].

Estos residuos poliméricos postindustriales los encontramos en diferentes artículos de uso diario como son los pañales desechables para adultos y bebés. Este desecho en algunas partes del mundo en el año 2010, representaron alrededor del 1.5 % del total de los residuos sólidos municipales. En la Figura 6 se muestran otras categorías de residuos sólidos domésticos [17]:

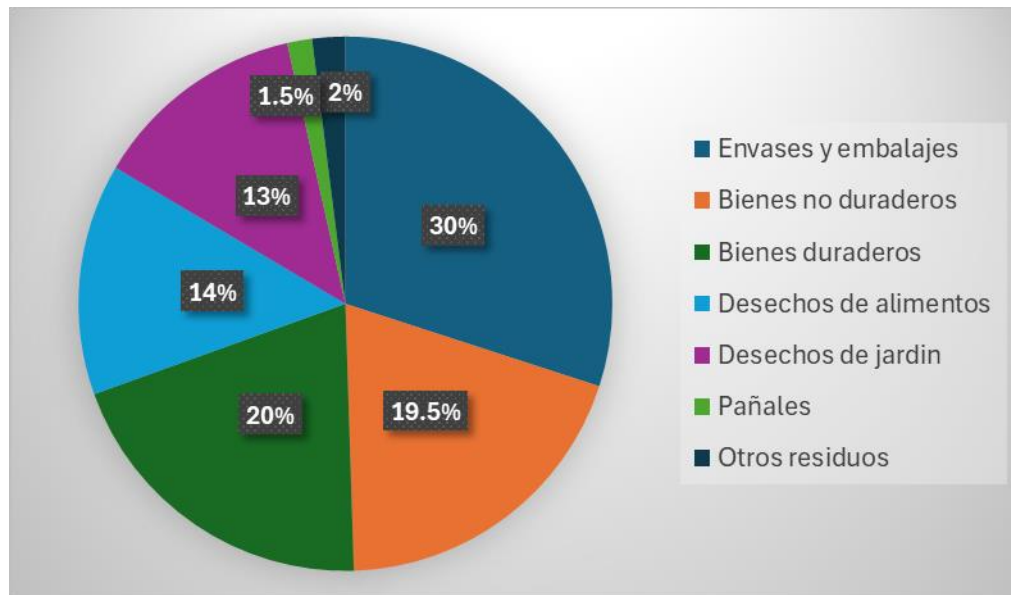


Figura 6. Categorías de residuos sólidos domésticos en 2010.

Alrededor de todo el mundo se ha realizado la recolección de residuos sólidos desechados de forma incorrecta en las costas. Ocean Conservancy reportó en 2021 una recolección de 9,760,227 objetos, de esta colecta se seleccionaron una serie de residuos predominantes, como se muestran en la Figura 7 [26].



Figura 7. Cantidad de residuos predominantes mal desechados en las costas a nivel mundial.

El residuo predominante que se reportó corresponde a los envoltorios y envases de comida, seguido de las colillas de cigarro y en tercer lugar están las botellas de bebidas (plástico), estos desechos son de un solo uso, lo cual promueve sus altos volúmenes de producción y desecho.

### 1.7 Reciclaje de polímeros postindustriales

Los polímeros se han hecho tan imprescindibles en la vida diaria que resulta difícil creer que sólo llevan unas décadas produciéndose. Los polímeros tienen la característica de ser lo suficientemente flexibles sin deformarse lo que hace que sean de gran utilidad en la vida diaria [27].

Para disminuir los volúmenes de desecho se han desarrollado métodos de reciclado los cuales se realizan mediante diferentes procesamientos. Hasta el momento se han identificado cuatro métodos generales de procesamiento; el reciclaje primario es un reciclaje que ocurre dentro de la empresa que lo produce, son de residuos limpios, no contaminados y de un solo tipo que genera el mismo producto con la misma aplicación, el reciclaje secundario o reciclado mecánico

procesa los materiales por medios físicos, como el corte, trituración, molido, lavado, reprocesado, etc. para convertirlos nuevamente en productos con diferente aplicación, el reciclado terciario o también conocido como reciclado químico es el proceso que conduce a la depolimerización total de un polímero a sus monómeros u otros productos de interés, y el reciclaje cuaternario o recuperación de energía, lo que constituye una forma eficaz de reducir el volumen de materiales orgánicos, la incineración para la recuperación de energía es actualmente la forma más eficaz de reducir su volumen [8].

Para poder aplicar alguno de los procesamientos antes mencionado debe existir una clasificación y separación de los diferentes materiales para posteriormente tratarlos de la manera más eficiente posible. La Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (American Society for Testing and Materials (ASTM)) han codificado el reciclado de ciertos plásticos [8] como se muestra en la Figura 8 [27].



Figura 8. Códigos de reciclado para separación de plásticos de acuerdo con la ASTM.

Este código clasifica los plásticos de mayor a menor facilidad para poder ser reusados o reciclados para reducir su producción.

PET: Se usa en las botellas de agua o de bebidas, envases de shampoo, etc. Se ha reportado que el PET postindustrial tiene aplicación en creación de fibras textiles, como el tejido de forro polar, o vestiduras de automóviles.

HDPE: Se emplea en envases como botellas de leche, productos de limpieza o aceite para motores, también se utiliza en algunos juguetes, cubos, contenedores de basura, entre otros. Se funden y se moldean laminas y tubos.

PVC: Se usa en las tarjetas de crédito, tuberías, revestimiento de cables, pieles sintéticas, algunos marcos de puertas y ventanas, entre otros productos. Posteriormente se emplea en mangueras, tarimas, conos de señalización, etc.

LDPE: Se emplea para hacer películas, el plástico de embalaje, botellas flexibles, bolsas de basura, entre otros. Reciclado se emplea mayormente en botes de basura, contenedores de compostaje, madera plástica, etc.

PP: Se encuentra en las tapas de botellas, focos, neveras portátiles, popotes, algunas fibras de tejido, alfombras, pañales, toallas higiénicas, lonas, entre otros. Empleado posteriormente en la industria del embalaje.

PS: Se utiliza en vasos térmicos, bandejas de comida, ganchos de ropa, aislantes, envases desechables de huevo, envases de yogur entre otros.

OTROS (PA, PC): usados en productos como biberones, discos compactos, envases para uso médico o piezas de carrocerías, etc. [27, 28].

### **1.8 Polímeros postindustriales**

Con el tiempo se han reportado diferentes desechos poliméricos que se han reciclado dándoles una utilidad diferente a la original por ejemplo el uso del PET en fibras, concreto, toallas de microfibras, no tejidos (textiles no tejidos), etc. [29], las bolsas de plástico y poliestireno expandido después se usan en la fabricación de espuma aislante de fuego y agua [30]. Se ha desarrollado una espuma a base de celulosa que se obtiene de las colillas de cigarro [31], de igual forma los pañales desechables de bebé se han empleado en la agricultura para composta [32], estas son algunas aplicaciones que se le ha dado al reciclaje de diversos polímeros que generamos día con día.

En México se reporta, con cifras del Instituto Nacional de Estadística y Geografía e Informática (INEGI), que en 2019 la generación per cápita de residuos sólidos urbanos fue de 865 g al día por persona, lo que nos da una equivalencia de 107,055 toneladas al día a nivel nacional. Dentro de estos residuos, se reportó que el 6.52 % corresponde a pañales desechables [32].

Algunos de los productos utilizados en higiene personal se pueden clasificar según su disposición como: pañales para bebés, calzoncillos para la incontinencia urinaria y compresas o tampones de higiene femenina. Los pañales desechables son considerados como los productos más comunes y de gran producción dentro de este segmento; sin embargo, en México no se cuenta con una técnica para su tratamiento cuando se convierten en basura, por lo que son enviados a rellenos sanitarios con el resto de los residuos sólidos urbanos.

Un pañal desechable común tarda en degradarse 500 años, porque además de contener alrededor de 35 % de fibra de celulosa, está constituido de materiales poliméricos sintéticos no biodegradables, como el polietileno, polipropileno y un polímero iónico poliácido (poliacrilato de sodio) que tiene características de ser un polímero super absorbente [32].

En promedio un bebé utiliza 6700 pañales desechables en tres años. Se han reportado datos de la Agencia de Protección Ambiental ((EPA) Environmental Protection Agency) que, a nivel mundial, Estados Unidos, China y México son los países que más pañales desechables consumen [33].

### **1.9 Características de los pañales**

Los pañales desechables se encuentran disponibles desde la década de 1960. A lo largo del tiempo han pasado por diversos cambios y modificaciones en los materiales utilizados para su fabricación. Lo que se busca es que tengan mayor durabilidad y comodidad. Para su elaboración se utilizan materiales comunes seguros para su uso diario. El pañal tiene un peso aproximado de 50 g. En la Figura 9 se muestra la posición de los principales polímeros que están contenidos en un pañal desechable [34].

- Celulosa
- Polipropileno
- Polímero super absorbente (polielectrolito)
- Cintas y cubierta (polietileno)
- Elásticos (poliestireno)
- Materiales adhesivos (resinas acrílicas)

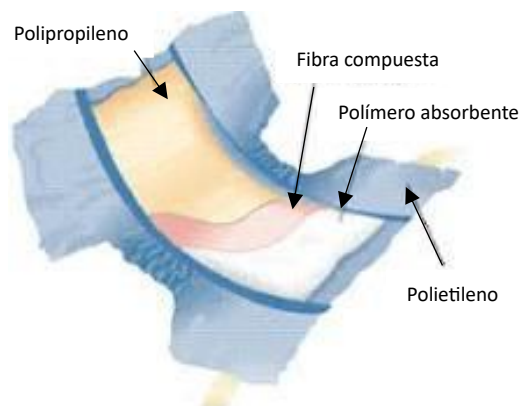


Figura 9. Posición de los polímeros que forman parte de un pañal desechable.

A continuación, se describen algunas características de los polímeros de un pañal:

Polipropileno y polietileno: son fibras suaves, con un historial de uso seguro en productos de consumo. Se emplean en las diferentes partes del pañal para ofrecer un nivel óptimo de rendimiento y de comodidad para el bebé. Se usan habitualmente en la fabricación de prendas textiles, como la ropa deportiva, y en una gran variedad de productos de consumo y de higiene personal.

Celulosa regenerada: son fibras suaves y esponjosas que se obtienen a partir de pulpa de madera y que ayudan a absorber el líquido. La celulosa es un componente clave del núcleo del pañal y contribuye a absorber y retener líquidos.

Poliéster: hilado en forma de fibra suave, el poliéster permite el paso de la humedad y proporcionar comodidad al bebé encontrándose dentro de la fibra compuesta del pañal.

Polímero super absorbente (polielectrolito): son gránulos translúcidos pequeños con apariencia de granos de azúcar refinada, cuando están secos, y cuando están mojados se convierten en un gel que absorbe el líquido y evita que la piel del bebé vuelva a mojarse, manteniéndola seca. Un solo grano puede absorber hasta 30 veces su peso [35].

### **1.10 Agua residual**

El agua es uno de los recursos naturales que forma parte del desarrollo de cualquier país, es el compuesto químico más abundante del planeta, siendo indispensable para el desarrollo de la vida en general. Su disponibilidad se ha visto disminuida debido a su contaminación por diversos medios, incluyendo a los mantos acuíferos, lo cual ha representado un desequilibrio ambiental, económico y social [36, 37].

Se considera que el agua está contaminada cuando se ven alteradas sus características químicas, físicas, biológicas o su composición, por lo que se pierde su potabilidad para su consumo diario o para su uso en actividades domésticas, industriales o agrícolas. Las aguas residuales se definen como aguas de composición variada provenientes de las descargas de usos municipales, industriales, comerciales, de servicios, agrícolas, domésticos incluyendo cualquier otro uso, así como la mezcla de ellas [37, 38].

El agua es un recurso de suma importancia para la humanidad, el cual se ha visto afectado por los niveles elevados de contaminación. Las industrias son responsables de su contaminación ya que utilizan grandes volúmenes de agua, dando como resultado la escases en diversas partes del mundo. Debido a esto, en la actualidad se realizan diferentes esfuerzos para resolver el problema de su contaminación, desarrollando una gran variedad de métodos para mejorar su calidad y eliminar los contaminantes presentes en el agua. Particularmente, la industria textil genera efluentes altamente coloridos, que contienen además de los colorantes utilizados durante el proceso de teñido, una gran cantidad de productos químicos y agentes surfactantes [39]. México se encuentra dentro de los quince países del mundo con el mayor comercio de textiles y prendas de vestir, lo que agrava la problemática de contaminación de sus ríos, por lo que la implementación de tratamientos eficientes de los efluentes textiles altamente coloridos después de los procesos de teñido es una necesidad [40].

Los volúmenes de agua empleados en los procesos textiles son elevados de 0.2 m<sup>3</sup>/kg de la tela procesada por día [41, 42], por lo que se debe tratar el agua proveniente de la industria textil, antes de ser desechada a cuerpos del agua.

## 1.11 Colorantes

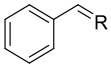
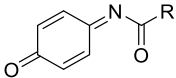

Los colorantes se definen como los compuestos que, al aplicarse a un sustrato, ya sea fibra textil, cuero, papel, plástico o alimento los dotan de color. En la industria textil los colorantes son sustancias empleadas en el proceso de teñido, su finalidad principal es dar color a los textiles. Una de las características de los colorantes es que deben ser partículas pequeñas, solubles en agua o en otro medio para penetrar en la fibra, la permanencia de este sobre el textil dependerá del tipo de colorante empleado, de la fibra por teñir y del método que se empleó en el proceso de teñido.

Las moléculas de los colorantes están constituidas por dos grupos principalmente:

1. Cromóforo
2. Auxocromo

El cromóforo es el encargado de absorber la luz, dándole la propiedad de color a la molécula. Los auxocromos, se encargan de darle afinidad por la fibra, intensifican o modifican el color y también se encargan de incrementar la solubilidad de la molécula de colorante [43, 44]. Los cromóforos más comunes se muestran en la tabla 2. Siendo el grupo azo (-N=N-) el más común.

Tabla 2. Cromóforos más comunes.

Grupo	Cromóforo
Azo	-N=N-
Nitroso	-N=O
Nitro	-NO <sub>2</sub>
Arilmetino	
Metino	R <sub>1</sub> -CH=R <sub>2</sub>
Iminoquinona	
Quinona	



El azobenceno, es una molécula que contiene un grupo azo y dos anillos aromáticos, su estructura química se presenta en la Figura 10. Es uno de los cromógenos más usados en la síntesis de colorantes.

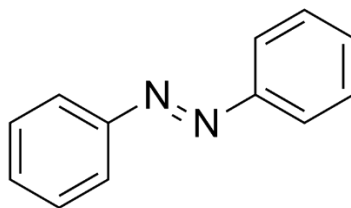


Figura 10. Estructura química del azobenceno.

Los grupos funcionales de los auxocromos más comunes se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Auxocromos más comunes.

Grupo	Auxocromo
Hidroxilo	-OH
Amina 1 <sup>a</sup>	-NH <sub>2</sub>
Amina 2 <sup>a</sup>	-NHCH <sub>3</sub>
Amina 3 <sup>a</sup>	-N(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>
Amina 4 <sup>a</sup>	-N <sup>+</sup> (CH <sub>3</sub> ) <sub>3</sub>
Ácido carboxílico	-COOH
Ácido sulfónico	-SO <sub>3</sub> H

Los colorantes representan una clase importante de compuestos químicos producidos en todo el mundo en grandes cantidades, más de 7x10<sup>8</sup> kg por año y se utilizan en muchas industrias, tales como alimenticia, cosmética, papel, farmacéutica, tintas de impresión, textil, curtiduría, entre otras. Entre estas

aplicaciones, la industria textil consume el 50 % de la producción total de colorantes [45].

### **1.12 Clasificación de los colorantes**

Los colorantes ya sean orgánicos o inorgánicos, naturales o sintéticos, se pueden clasificar de diferentes formas a continuación se mencionan algunas:

- Clasificación por su procedencia
- Clasificación según el Colour Index (C.I.)
- Clasificación por su aplicación
- Clasificación por su estructura química
- Clasificación por su nombre común

#### **1.12.1 Clasificación por su procedencia**

Esta es una de las clasificaciones más sencilla de los colorantes ya que solo está dividido en dos categorías (naturales y sintéticos) considerando su procedencia.

Colorantes naturales: son extraídos de materiales provenientes de la naturaleza, se pueden subdividir en orgánicos e inorgánicos, dependiendo de donde se obtenga el colorante (flora, fauna o mineral).

Colorantes sintéticos: son sintetizados a nivel industrial, actualmente estos colorantes son los más importantes debido a la alta demanda que han tenido en la industria de la moda [43].

#### **1.12.2 Clasificación según el Colour Index (C.I.)**

A finales del siglo XIX empezaron a fabricarse nuevos colorantes, la sociedad de coloristas y colorantes ((SDC) Society of Dyers and Colourists) publicó en 1924 un índice con todas las materias colorantes, donde se daba información acerca de 1200 colorantes orgánicos sintéticos. Se realizó una segunda edición en colaboración con la asociación americana de químicos textiles y coloristas ((AATCC) American

Association of Textile Chemists and Colorist), publicando en los años 1956 y 1958 cuatro volúmenes conteniendo casi 3600 colorantes de constitución diferente. El Colour Index se ha convertido en la referencia obligada para la clasificación de los colorantes [43]. Su consulta desde el año 2001 se realiza online.

### 1.12.3 Clasificación por su aplicación

Los colorantes textiles están subdivididos recibiendo cada compuesto un C.I. Generic Name (nombre genérico) seguido por un número de serie. El nombre genérico indica la aplicación y el color del colorante [43].

La aplicación de los colorantes se hace dependiendo del tipo de fibra textil que se requiera teñir, en la Tabla 4 se muestra el uso de algunos colorantes para cada tipo de fibra textil [46].

Tabla 4. Uso de diferentes colorantes en fibras textiles

Fibra	Colorante
Celulósica	Directo, reactivo, cuba, azufrado, azoico
Poliéster	Disperso
Poliamida	Disperso, ácido, premetalizado
Acetato de celulosa	Disperso
Lana y seda	Ácido, premetalizado
Acrílico	Disperso, básico

### 1.12.4 Clasificación por su estructura química

A los colorantes de estructura conocida el Colour Index, les asigna un número C.I. Constution number (número de constitución), formado por cinco cifras. Las clases químicas están ordenadas por cromóforo a manera de ejemplo en la Tabla 5 se muestra parte de la clasificación del C.I. [43].

Tabla 5. Selección del número de constitución (C.N.) del C.I.

<b>Cromóforo</b>	<b>C. N.</b>
<b>Nitroso</b>	10000
<b>Nitro</b>	10300
<b>Monoazo</b>	11000
<b>Diazo</b>	20000
<b>Triazo</b>	30000
<b>Poliazo</b>	35000
<b>Azoicos Insolubles</b>	37000
<b>Estilbeno</b>	40000
<b>Carotenoides</b>	40800
<b>Difenilmetano</b>	41000
<b>Triarilmetano</b>	42000
<b>Antraquinona</b>	58000

#### **1.12.5 Clasificación por su nombre comercial**

Esta clasificación está dividida en tres partes, la primera considera las principales compañías productoras de colorantes, la segunda todas las marcas conocidas de un mismo colorante bajo su nombre genérico y la tercera ordena alfabéticamente todos los nombres comerciales relacionandolos con su nombre genérico, número de constitución y la compañía productora [43].

#### **1.13 Métodos de tratamiento de aguas residuales**

El tratamiento del agua puede definirse como el conjunto de procesos que tiene como objetivo alcanzar una calidad del agua, que cumpla las normas especificadas por la legislación, con base en el tipo de usuario final [47]. La elección de qué método o combinación de métodos se deben usar para el tratamiento de un agua residual, dependerá del tipo de contaminantes presentes.

Actualmente, existen diversos métodos de tratamiento para los efluentes industriales como son la coagulación–floculación, sedimentación, los electroquímicos, los métodos biológicos y la adsorción, entre otros.

Durante la producción textil, cuyos efluentes contienen colorantes y diversos productos se utilizaron en el teñido, debe seleccionarse el tratamiento más efectivo y económico, que permita incluso el reciclaje de dichas aguas residuales [48].

### **1.13.1 Coagulación – floculación**

La importancia de los procesos de coagulación y floculación en el tratamiento de aguas se compone de dos partes principales como su nombre lo menciona, la primera es la coagulación y la segunda es la floculación. La coagulación, implica la adición de un reactivo químico coagulante con el fin de desestabilizar la materia suspendida, coloidal y disuelta. La coagulación por la adición de químicos como el alumbre ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ), sales de hierro ( $\text{Cl}_3\text{Fe}$  y  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ ) y polímeros orgánicos puede implicar:

1. La desestabilización de pequeñas partículas, materia coloidal y suspendida.
2. La adsorción y reacción de porciones de materia orgánica natural (MON) coloidal y disuelta.
3. La creación de precipitados floculantes que se extienden por el agua atrapando todo el material suspendido, coloidal y disuelto en el momento en que sedimenta.

La segunda parte implica la unión de las partículas desestabilizadas (partículas cuya carga eléctrica superficial se ha reducido) y los productos formados por la adición del floculante que los convierten en flóculos que precipitan. El flóculo agregado puede eliminarse por sedimentación o filtración.

El propósito de la floculación es producir partículas mediante agregación, las cuales se pueden eliminar mediante procedimientos como la sedimentación por gravedad y la filtración. Se pueden identificar dos tipos generales de floculación: 1) microfloculación (también conocida como floculación peri-cinética), donde la agregación de partículas se produce por el movimiento térmico aleatorio de moléculas fluidas (conocido como el movimiento browniano) y 2) macrofloculación (también conocida como floculación orto-cinética), la agregación de partículas se produce mediante la introducción de gradientes de velocidad mezclando

suavemente el fluido que contiene las partículas. Por lo general, el tiempo del mezclado o la floculación depende del floculante. [47].

### **1.13.2 Sedimentación**

El agua que contiene naturalmente partículas suspendidas, observables, que le confieren turbidez, si se coloca en un tanque extenso y se deja ahí en reposo, con el tiempo el material suspendido podrá caer hacia el fondo. Las partículas de una suspensión caen a través del fluido, porque son lo suficientemente grandes para ello, gracias a la fuerza gravitacional. A este proceso se le llama sedimentación.

La mayor parte del agua sin tratamiento contiene partículas minerales y orgánicas. Las primeras suelen tener densidades que van de 2000 a 3000 kg/m<sup>3</sup> y se depositan con facilidad por gravedad, mientras que las segundas, con densidades de 1010 a 1100 kg/m<sup>3</sup>, pueden requerir mucho más tiempo para sedimentar de la misma manera, con base en su densidad. Las partículas suspendidas mayores de 1 µm pueden eliminarse mediante la sedimentación, la cual puede emplearse en las fases iniciales de una planta de tratamiento de aguas para eliminar las partículas minerales de aguas altamente turbias, a lo que se denomina presedimentación o después de los procesos de coagulación y floculación a lo que se conoce como sedimentación convencional [49].

### **1.13.3 Electroquímicos**

Los procesos electroquímicos para el tratamiento de aguas residuales están adquiriendo cada día más importancia por su versatilidad, reducido tamaño y capacidad de automatización. En este tipo de procesos es necesario el uso de la electricidad para el tratamiento de aguas, la electrodeposición, electrocoagulación, electrodesinfección, entre otros son algunos de los procesos electroquímicos empleados en el tratamiento de aguas.

Electrodeposición: El mecanismo de recuperación de metales es muy simple, básicamente una deposición en el cátodo. Estos procesos recuperan el metal depositado. Como cátodo se puede utilizar un cátodo del mismo metal a recuperar o grafito.

Electrocoagulación: El proceso de electrocoagulación implica la generación del coagulante in situ disolviendo electrolíticamente ánodos de aluminio o hierro para formar los respectivos cationes  $Al^{+3}$ ,  $Fe^{+2}$ . Los ánodos empleados se llaman ánodos de castigo ya que se consumen en el proceso. En el cátodo se produce hidrógeno liberado como pequeñas burbujas que suben a la superficie. Este hidrógeno generado puede ayudar a que las partículas floculadas floten en la superficie recogiendo de ésta.

Electrodesinfección: En este tipo de reacción es similar a la oxidación indirecta, en el ánodo se genera cloro gas por la oxidación de los iones cloruros, que disuelto en el agua genera iones hipoclorito/hipocloroso, considerados desinfectantes. La mayor parte de las aguas tratadas contienen suficiente cantidad de iones cloruro para lograr la desinfección [50, 51].

#### **1.13.4 Biológicos**

Su principal objetivo es la eliminación de nutrientes y materia orgánica, sustancias consideradas contaminantes. Un porcentaje muy elevado de las aguas residuales los contienen, en forma suspendida o disuelta. El tratamiento biológico de aguas residuales se lleva a cabo a través de unos procesos que se basan en el uso de microorganismos para realizar la eliminación de componentes con un alto porcentaje de solubilidad en el agua.

El tratamiento biológico favorece el desarrollo de microorganismos que metabolizan la materia orgánica biodegradable contenida en el agua residual y que es responsable de la DBO. Es necesario airear el agua para proporcionar el oxígeno indispensable.

En los tratamientos biológicos, se engloban distintos tipos de tecnologías, dentro de este tipo de tratamiento se encuentra el tratamiento con reactor biológico secuencial, reactores biológicos de membrana, lodos activos, solo por mencionar algunos.

Reactor biológico secuencial (SBR): Se le conoce también como SBR y su característica principal es que utiliza un único depósito para realizar las operaciones habituales de un proceso de lodos activados.

Reactor biológico de membrana (MBR): Tiene la particularidad de que dispone de un módulo de membranas de ultrafiltración para la separación sólido-líquido. Este módulo es el que permite que los fangos se separen del líquido a través de membranas.

Lodos activos: Es un tipo de tratamiento de aguas residuales que se basa en la aplicación de microorganismos que se desarrollan con el objetivo de convertir la materia orgánica disuelta en productos mucho más simplificados.

Las numerosas variantes de los tratamientos biológicos pueden diferenciarse por el tipo de respiración y la situación de los microorganismos, influyen otros factores como la carga aplicada y la edad de la masa biológica [52, 53].

### **1.13.5 Adsorción**

Aunque como se ha mencionado, existen diferentes estrategias para el tratamiento de aguas residuales la adsorción es un método de tratamiento efectivo y de fácil implementación operacional y es accesible desde la perspectiva económica. Además, ha probado ser un método viable debido a la eficiencia que presenta en la adsorción de colorantes textiles [54]. En la adsorción se han utilizado diferentes tipos de adsorbentes, naturales y sintéticos.

La adsorción es un proceso en el cual se extrae materia de una fase líquida y se almacena sobre la superficie de otra fase, por lo general sólida. A la sustancia que se encuentra adherida a la superficie se le denomina adsorbato y al sólido que lo contiene se le denomina adsorbente. Siendo los contaminantes los adsorbatos que serán retenidos en la superficie del adsorbente.

Existen numerosos adsorbentes que pueden ser utilizados para remover los contaminantes, como la bentonita, los polielectrolitos, adsorbentes lignocelulósicos. Sin embargo, el carbón activado es uno de los adsorbentes más utilizados y eficientes [55]. Entre sus aplicaciones están la eliminación de contaminantes industriales como son los colorantes textiles, metales pesados, compuestos orgánicos e inorgánicos, herbicidas, microorganismos, eliminación de olores, etc. [40].



Durante el proceso de adsorción, las especies disueltas se difunden en la extensa superficie interna del carbón activado [56]. Una característica clave de los carbones es un alto grado de porosidad en los gránulos, lo cual se traduce en una extensa área superficial interior en la que puede ocurrir la adsorción. Puesto que la adsorción sucede en la superficie, una gran extensión de área superficial es una característica esencial de un carbón eficaz. Una alta área superficial se logra usando materiales que tengan un alto número de poros diminutos en el interior de un material granular. Además, la magnitud del adsorbato que puede entrar al poro está limitada por el tamaño de este. Existen dos tipos de adsorción, que se definen a continuación:

**Fisorción:** Tipo de adsorción donde las moléculas del adsorbato permanecen unidas al adsorbente a través de interacciones intermoleculares, que pueden ser fuerzas de Van der Waals, puentes de hidrógeno, entre otras.

**Quimisorción:** Tipo de adsorción que implica reacciones químicas entre la superficie del adsorbente y el adsorbato, que cambian la naturaleza química del adsorbente a través de la formación de enlaces químicos.

### **1.14 Factores que influyen en la adsorción**

En el proceso de adsorción intervienen diferentes factores los cuales se deben conocer y considerar en caso de que se quiera o necesite reproducir la adsorción, ya que estos influyen o afectan el proceso de adsorción. Algunos de los factores que influyen en la adsorción se enlistan a continuación:

**Adsorbente:** los adsorbentes se pueden clasificar en orgánicos (lignocelulósicos, carbones activados, etc.) e inorgánicos (alúmina, sílica gel, etc.), teniendo diferente capacidad de adsorción según el sustrato con el que interactúen.

**Disolvente:** la adsorción regularmente se lleva a cabo en soluciones acuosas, influyendo la atracción entre el soluto y la superficie del adsorbente, o repulsión entre el soluto y el disolvente, o una combinación de ambos factores.

pH: este es uno de los principales factores que afectan la capacidad de adsorción del adsorbente. Ya sea que tenga un pH ácido o básico, la carga de la superficie del adsorbente puede cambiar en función del pH de la solución.

Temperatura: generalmente la adsorción se realiza a temperatura controlada para que los resultados puedan ser comparables, debe cuidarse este parámetro ya que al tener una temperatura mayor o menor los resultados varían, aunque no de forma significativa.

Tamaño de partícula: el tamaño de partícula empleado en las pruebas de adsorción debe ser de un tamaño controlado para poder analizarlo, pues se conoce que a menor tamaño de partícula hay más capacidad de adsorción, incrementándose la superficie específica.

Tiempo de contacto: este es importante ya que la adsorción debe de llegar al equilibrio y hasta que esto suceda se puede analizar o evaluar el efecto del tiempo de contacto necesario. La cinética de adsorción da información importante sobre el tiempo requerido para alcanzar el equilibrio de adsorción [55, 57].

### **1.15 Carbón activado (CA)**

El carbón activado por tradición se produce de la madera de los árboles, sin embargo, actualmente puede ser producido usando residuos vegetales, que son ricos en celulosa y lignina, por lo tanto, ahora es un material económicamente accesible y no consume recursos naturales [57].

Comercialmente los carbones activados se preparan mediante pirólisis oxidativa a partir de maderas blandas y duras como, turba, lignito, carbón mineral, huesos y cáscaras de coco. Se considera un material costoso por su activación química, su bajo rendimiento y el alto consumo de energía durante su producción [58]. El carbón activado puede presentarse en diversas formas dependiendo de su aplicación y del precursor utilizado en su preparación. Se puede encontrar como gránulos (GAC), polvo (PAC), fibras (ACF), telas de fibras de carbón activado (ACFC), nanotubos de carbono (CNT), monolitos, compósitos y formas extruidas o

de pellets. Para el tratamiento de las aguas residuales, el carbón activado puede ser utilizado en su forma granular [40] para sistemas de flujo y como polvo fino en sistemas estáticos. Los carbones activados son ampliamente utilizados en la adsorción de colorantes textiles, debido a que la industria textil se considera una de las principales consumidoras de agua, y muchas veces descarga sus aguas residuales directamente a ríos. De esta forma modifican las propiedades de los cuerpos de agua receptores como son: temperatura, el color que inhibe la penetración de la luz, la demanda química y bioquímica de oxígeno, pH y turbiedad [55].

De acuerdo con la IUPAC los poros se clasifican según su tamaño, en microporos ( $< 2$  nm), mesoporos (2 – 50 nm) y macroporos ( $> 50$  nm) [59, 57]. Por lo general, la porosidad de los adsorbentes no es mayor de 50 %, debido al proceso de manufactura y la estructura rígida del adsorbente. Si la porosidad es muy grande, los adsorbentes incrementan su nivel adsorción y de fragilidad, esto provoca que se rompan cuando se les transporta. En la Figura 11 se representa esquemáticamente la porosidad de un adsorbente.

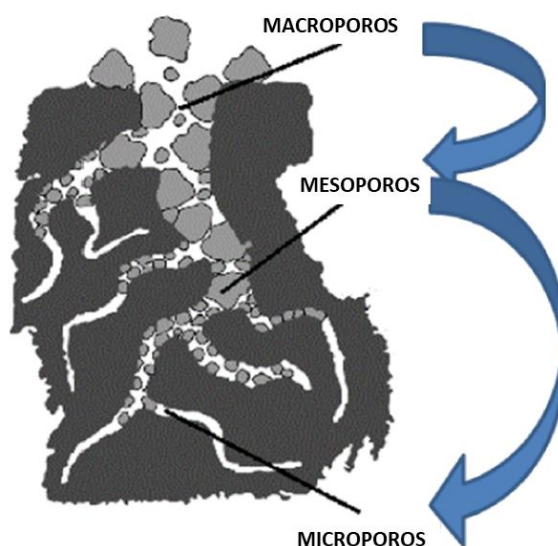


Figura 11. Representación esquemática de la porosidad de un adsorbente.

La mayoría de los carbones activados tienen un amplio rango de tamaños de poros y pueden albergar un gran número de moléculas orgánicas y compuestos orgánicos sintéticos como pesticidas, disolventes y combustibles. La adsorción se

puede llevar a cabo en sistemas de adsorción estática o batch y en sistemas de flujo o continuos [47].

#### **1.15.1 Carbones activados a partir de residuos agroindustriales**

Como ya se había descrito, el carbón activado se ha producido de diversos residuos, los más comunes son los residuos agroindustriales. Se ha reportado la producción de carbón activado a partir de residuos de maíz, para la adsorción de colorantes textiles. Este residuo se seleccionó por su abundancia en México, en 2004 su producción fue de 22 millones de toneladas [60]. Los carbones activados del residuo del maíz presentan un rendimiento de 12 – 15 % y una adsorción de colorante tartrazina en medio acuoso de 20–23 mg/g [61].

En 2016 se reportó la producción de carbón activado a partir de la cáscara de tuna. Las capacidades máximas de adsorción calculadas a partir de las isothermas de adsorción de Langmuir oscilaron entre 131.6 y 312.5 mg/g para colorantes ácidos, y entre 277.8 y 500.0 mg/g para colorantes básicos [40]. Se han probado carbones activados usando el tallo del brócoli (CarBrocQ), en soluciones acuosas que contienen colorantes catiónicos y aniónicos, así como efluentes textiles generados después del proceso de teñido. El CarBrocQ presentó porcentajes de remoción cercanos al 100 % para colorantes reactivos. La capacidad de adsorción de CarBrocQ se comparó con la de carbones activados comerciales, y resultó ser similar [48].

Las semillas de zapote negro también se han empleado como materia prima para la elaboración de carbón activado, siendo empleado para la adsorción de metales pesados y de colorantes textiles. Estos carbones presentaron una adsorción de colorantes catiónicos de 58–59.8 mg/g, y con los colorantes aniónicos 10–58.8 mg/g [41]. El estudio de la obtención de carbones activados a partir de diferentes residuos vegetales tales como el tallo de brócoli, cáscara de tuna, semillas de zapote negro, etc. han sido reportados [39, 40]. También pueden prepararse a partir de materias primas de bajo costo y fácil adquisición en México [57].

En 2024 se reportó en la literatura el uso de semillas de chirimoya como materia prima en la obtención de los carbones activados, los cuales se aplicaron en la adsorción de colorantes textiles, básicos y ácidos, presentando superficies específicas de hasta 1253 m<sup>2</sup>/g. Utilizando diferentes partes de las semillas y diferentes temperaturas de carbonización se logró optimizar las condiciones de adsorción [62].

### **1.15.2 Carbones activados a partir de residuos poliméricos postindustriales**

Se han reportado en la literatura el uso de residuos poliméricos abundantes para la producción de carbones activados, se ha reportado carbón activado del tereftalato de polietileno (PET), obteniendo de su caracterización un tamaño de poro entre 0.5–2 nm y su superficie específica de 648–1391 m<sup>2</sup>/g, del cual no se reportan su aplicación [63].

En 2015 se reportaron dos carbones activados a partir del policarbonato contenido en CDs y DVDs, los cuales fueron aplicados en la adsorción de contaminantes como es el CO<sub>2</sub> [64]. En el año 2021 se reportó la preparación de carbón activado a partir de tres materiales de desecho generados de forma abundante como el poliéster de botellas de plásticos (PET), la goma de neumáticos fuera de uso y una mezcla de un plástico (PP) y una goma, se dan a conocer diferentes parámetros obtenidos de la caracterización de cada uno de ellos, sin reportar su aplicación en adsorción [65]. En el mismo año se reportó un carbón activado obtenido del poliuretano, aplicado eficazmente a la adsorción de azul de metileno [66].

En la literatura también se han reportado la obtención y caracterización de carbones activados de caucho a partir del desecho de las llantas. Los carbones activados los obtienen con diferentes agentes activantes y temperaturas durante la carbonización. Estos fueron los empleados para la adsorción de fenol, procion rojo y azul de metileno [67]. En 2022 se reportó un carbón activado a partir de los cubrebocas, los cuales son desechos poliméricos y que fueron desechados en grandes cantidades durante la pandemia de COVID 19. La aplicación de este CA es en la adsorción de CO<sub>2</sub> [68].

De igual forma se han empleado residuos textiles de algodón, poliéster, para la producción de CA, considerando diferentes parámetros para su activación y pirólisis [69].

En 2024 se reportó el uso de acetato de celulosa proveniente de las colillas de cigarro, empleados en la adsorción de colorantes básicos y ácidos, utilizados en la industria textil, reportando una superficie específica de 1082 m<sup>2</sup>/g [70].

## **Justificación**

Existen diferentes métodos para el tratamiento del agua residual, cada uno de ellos presenta diferentes características, efectividad y costos. Debido a los costos de instalación, operación y mantenimiento de las plantas de tratamiento de agua residual, las industrias optan por no tratar los efluentes. Esto se debe a que dichos costos deben sumarse a los costos de producción, lo cual se verá reflejado en el precio final del producto, haciendo que sus mercancías sean menos competitivas en el mercado. Al emplear adsorbentes elaborados con un residuo o desecho abundante, se reduce el costo del adsorbente. Además, dar tratamiento al agua residual de las industrias, incrementa las posibilidades de que exista un beneficio tanto para las industrias como para el medioambiente. La conservación del medioambiente es una prioridad para la humanidad, además, en la formación académica del estudiante se hace consciencia del deterioro ambiental que los procesos industriales originan. Para lograr la sustentabilidad del medioambiente se deben mejorar los procesos de tratamiento del agua residual dentro de las industrias.

El presente trabajo se direcciona a la obtención de carbones activados a partir de un desecho polimérico postindustrial, buscando reducir los volúmenes de basura y dar valor agregado a un desecho polimérico. Los nuevos carbones activados son materiales adsorbentes de colorantes textiles y pueden ser potencialmente útiles en la remediación de aguas residuales provenientes de la industria textil.

## **Planteamiento del problema**

La contaminación es un tema importante en la actualidad y se refleja en la gran producción de desechos sólidos durante la vida cotidiana, los cuales contaminan suelo, aire y agua. El creciente incremento de desechos ha hecho que su manejo sea difícil, ya que se ha llegado al límite de muchos de los rellenos sanitarios. Además, en muchas ocasiones los residuos sólidos urbanos no son desechados de forma correcta por lo que llegan a cuerpos de agua o suelos donde se pueden filtrar al subsuelo sus contaminantes.

Cuando estos residuos llegan a cuerpos de agua, producen contaminación, que se ve reflejada actualmente en su escasez. La escasez del agua es un tema que actualmente preocupa a nivel mundial y, las causas de tal problemática son muy diversas. Entre algunas de esas causas se tienen: la sobreexplotación de los mantos acuíferos debido al alto consumo de agua durante las actividades humanas, simultáneamente se presenta el problema de su contaminación.

La industria textil y minera se encuentran entre las industrias que emplean grandes volúmenes de agua durante y después de los procesos de acabado y extracción respectivamente. En muchas ocasiones el agua residual es descargada en alcantarillas o cuerpos de agua, sin un tratamiento previo, que reduzca la cantidad de contaminantes presentes.

Por lo que el presente trabajo se enfoca en el desarrollo de carbones activados útiles en la remoción de colorantes textiles. Además, como materia prima se utilizarán polímeros postindustriales, que se encuentran clasificados como desechos sólidos urbanos de gran abundancia.



## **Objetivos**

### **Objetivo general**

Preparar adsorbentes a partir de un residuo postindustrial abundante de tipo polimérico, mediante activación física y química, para la adsorción de colorantes textiles.

### **Objetivos específicos**

- Encontrar las condiciones adecuadas para la obtención de adsorbentes a partir de polímeros postindustriales.
- Caracterizar química y fisicoquímicamente los adsorbentes preparados, utilizando espectroscopia infrarroja con transformada de Fourier (FTIR), calorimetría diferencial de barrido (DSC), análisis termogravimétrico (TGA), adsorción de nitrógeno (fisisorción),  $pH_{pzc}$ , densidad aparente e isothermas.
- Estudiar el fenómeno de adsorción de colorantes textiles en soluciones modelo, para conocer la capacidad de adsorción de los adsorbentes obtenidos.
- Eliminar colorantes textiles presentes en aguas residuales, para darles a los materiales adsorbentes una aplicación ambiental y conocer su eficiencia.
- Analizar la calidad del agua después de ser tratada con los adsorbentes.

## **Hipótesis**

Los carbones activados obtenidos a partir de un desecho postindustrial constituido por polímeros, como el poliacrilato de sodio, celulosa, poliestireno y polipropileno son capaces de remover colorantes textiles, de presentes en soluciones acuosas, así como en el agua residual, por medio del proceso de adsorción. Los grupos funcionales de algunos de estos polímeros como el acrilato de sodio, hidroxilo, ésteres y anillos aromáticos tienen la capacidad de llevar a cabo el proceso de adsorción a través de intercambio iónico, interacciones dipolo – dipolo como puentes de hidrógeno y Van der Waals.

# Capítulo II. Metodología experimental

## 2.1 Recolección de la materia prima

Los pañales desechables fueron seleccionados como el polímero postindustrial como materia prima para la elaboración de los carbones activados debido a su gran producción dentro de los residuos urbanos. Se recolectaron pañales usados de una misma marca, los cuales tenían solo un par de días de ser desechados y además provenían de un solo bebé. Posteriormente, se secaron a la intemperie simulando un basurero. Después de 21 días de secado, se comprobó que la materia prima se encontraba completamente seca y relativamente inodora, se pesó cada pañal, para calcular el peso promedio individual.

## 2.2 Propiedades de los polímeros que constituyen los pañales

En la Figura 12 se muestra la unidad constitucional repetitiva (UCR) de los polímeros que componen los pañales.

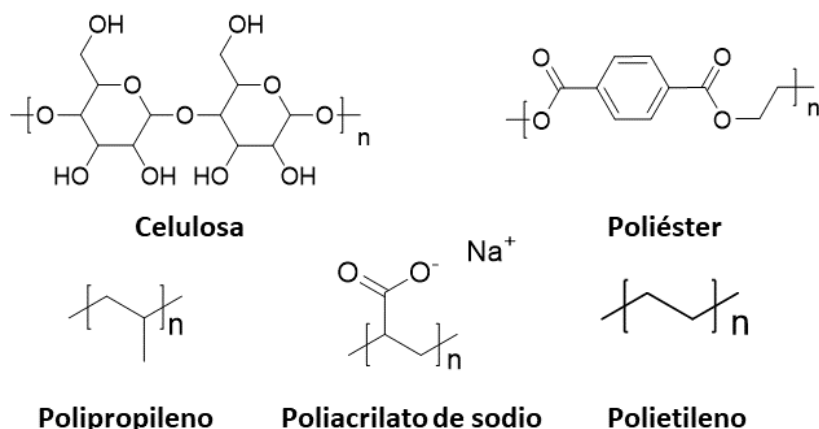


Figura 12. Estructura química de los polímeros que constituyen al pañal.

Algunas de las propiedades de los polímeros que conforman el pañal son:

**Polipropileno:** es resistente químicamente, es hidrofóbico reduciendo el crecimiento microbiano, es difícil de teñir por lo que se tiñe antes de su extrusión, tiene un bajo coeficiente de fricción y los textiles son suaves.

Polietileno: se caracterizan por su alta elasticidad y flexibilidad, se moldea con calor, es hidrofóbico lo que reduce el crecimiento de microorganismos, alta resistencia al impacto y a la intemperie.

Celulosa: constituye el componente principal de las paredes celulares de la mayoría de las plantas, es insoluble en agua, altamente cristalina, alta capacidad de adsorción de agua.

Poliéster: bajo punto de fusión, cristalino, puede moldearse como fibra [53] y mezclarse con cualquier tipo de fibra.

Poliacrilato de sodio: carácter aniónico, capacidad de absorber y retener grandes volúmenes de agua, muchas veces mayor que su propio volumen [71].

### 2.3 Porcentaje de humedad

Todos los sólidos contienen de forma superficial o interna una cantidad de agua o algún líquido, a esta cantidad de agua o líquido se le conoce como el porcentaje de humedad.

El cálculo del porcentaje de humedad de la materia prima se realizó de la siguiente manera:

Un vaso de precipitados de 150 mL se colocó en una estufa a 120 °C durante 2 h, posteriormente se introdujo en un desecador hasta que alcanzó la temperatura ambiente. Dicho procedimiento se realiza con la finalidad de que el vaso este completamente seco y libre de humedad. Se pesó el vaso vacío y después con 3 g de muestra. Se colocó la muestra en la estufa a una temperatura de 120 °C para eliminar la humedad que contenía la materia prima, diariamente se pesó hasta que el peso se mantuvo constante.

El procedimiento anterior se realizó por triplicado y se obtuvo un promedio del porcentaje de humedad, utilizando la ecuación (1):

$$\% \text{ Humedad} = 100 - \frac{PS * 100}{PH} \quad (1)$$

Donde:

PS = peso del material seco (g)

PH = peso del material húmedo (g)

## **2.4 Obtención de carbón activado (CA)**

Los carbones activados se activaron física y químicamente, los procedimientos se describen a continuación.

### **2.4.1 Obtención de carbones activados químicamente**

Se obtuvieron cuatro CAs químicamente, partiendo de la misma metodología únicamente se varió la concentración del  $H_3PO_4$  con la que fueron activados.

Una vez secos los pañales como se describió en la sección 2.2, se cortaron en su totalidad sin quitar o excluir ninguna parte del pañal, para obtener cuadros de  $1\text{ cm}^2$  aproximadamente. Posteriormente, se pesó la cantidad de materia prima necesaria (15 g) para producir el CA.

Para la obtención de los CAs químicamente, al inicio se impregnó por inmersión la materia prima con  $H_3PO_4$  concentrado (85 %), a la mitad de concentración (42.5 %), a una cuarta parte (21.25 %) y al 10 % durante 24 horas, terminado el tiempo de impregnación, se dejó escurrir durante 2 h. A continuación, se colocó el material en un crisol para iniciar la carbonización en la mufla. La carbonización se realizó incrementando la temperatura  $5\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$  hasta alcanzar los  $400\text{ }^\circ\text{C}$ , posteriormente se mantuvo esta temperatura durante 1 h. Después de la carbonización se realizaron 3 lavados con 400 mL de agua destilada para los carbones activados con  $H_3PO_4$  concentrado (CarQPS400) y al 42.5 % (CarQPS400/50). Durante cada lavado se colocó 1 h en una cuba de ultrasonido Branson 2510 hasta alcanzar un pH de 3. Para los carbones activados al 21.25 % (CarQPS400/25) y al 10 % (CarQPS400/10) se lavaron 3 veces con 150 mL, y también en cada lavado se colocó 1 h en ultrasonido.

Posteriormente, se secaron durante 12 horas en la estufa a  $120\text{ }^\circ\text{C}$ , una vez a temperatura ambiente se obtuvo el peso de cada CA para calcular su rendimiento.

Finalmente, los CA se trituraron y tamizaron para obtener un tamaño de partícula controlada de 0.25-0.42 mm y <0.25 mm. El tamaño de partícula que se empleó en la adsorción fue el de 0.25-0.42 mm.

#### **2.4.2 Obtención de carbones activados físicamente**

Se obtuvieron tres carbones activados físicamente variando únicamente la temperatura de carbonización. En un crisol se colocaron 15 g de la materia prima y 63 mL de agua para realizar la carbonización. La temperatura se incrementó 5 °C/min hasta alcanzar temperaturas de 400 °C (CarFPS400), 350 °C (CarFPS350) y 300 °C (CarFPS300). Posteriormente, se mantuvieron estas temperaturas durante 1 h. Al término de este proceso, el CA se pesó para calcular el rendimiento. Finalmente, se tamizó para obtener tamaños de partículas 0.25-0.42 mm y <0.25 mm. El tamaño de partícula que se empleó en el proceso de adsorción fue el de 0.25-0.42 mm.

#### **2.5 Caracterización por calorimetría diferencial de barrido (DSC)**

Este análisis de calorimetría diferencial de barrido (DSC) se realizó a los componentes de la materia prima (pañal) por separado como son la cubierta, el relleno y el super absorbente. Se utilizó el analizador DSC822<sup>e</sup> de Mettler – Toledo. Los DSC se realizaron en el rango de temperatura de 25 – 250 °C con una velocidad de calentamiento de 7 °C/min, en una atmósfera de N<sub>2</sub> en tres ciclos. En el primero se incrementó la temperatura de 25 – 250 °C, en el segundo ciclo disminuyó la temperatura 250 – 25 °C y en el tercer ciclo se incrementó la temperatura en el mismo rango de 25 – 250 °C.

#### **2.6 Caracterización por análisis termogravimétrico (TGA)**

Este análisis se realizó a la materia prima nueva y después de su vida útil a algunos de sus componentes por separado como fueron: la cubierta, el relleno, el super absorbente y a los carbones activados. Se utilizó el analizador termogravimétrico TGA/SDTA 851\* de Mettler – Toledo. Los TGA se realizaron en el rango de

temperatura de 50 – 900 °C con una rampa de calentamiento de 10 °C/min, en una atmósfera de N<sub>2</sub>.

### **2.7 Análisis de espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier (FT-IR)**

Los grupos funcionales presentes en los carbones activados fueron identificados mediante espectroscopía FT-IR. Los espectros fueron obtenidos en un espectrofotómetro Perkin Elmer FT-IR Frontier con un accesorio de Reflectancia Totalmente Atenuada (ATR) en el rango de número de onda de 4000 a 400 cm<sup>-1</sup>.

### **2.8 Análisis por microscopía electrónica de barrido (SEM)**

Por medio de la imagen tridimensional que se obtiene por SEM se obtuvo la morfología superficial de los carbones activados, utilizando un microscopio electrónico de barrido JEOL modelo JSM 6300 operado a 20 kV, con aumentos de X100, X500, X1200 y X2500. Para realizar esta caracterización las partículas de los carbones activados se dispersaron en cinta de grafito y luego se cubrieron con oro.

### **2.9 Parámetros texturales por adsorción de N<sub>2</sub> (BET)**

Las propiedades texturales de los carbones activados se obtuvieron por adsorción de nitrógeno a 77 K, utilizando un analizador de superficie específica y porosidad Micrometrics ASAP 2020, a una temperatura de desgasificación de 300 °C por dos horas, para posteriormente iniciar la adsorción de nitrógeno. Las propiedades texturales de los CAs se calcularon con el software del equipo.

### **2.10 Determinación del punto de carga cero (pH<sub>pzc</sub>)**

En 11 frascos de 100 mL con tapa se colocaron 50 mL de solución de NaCl 0.01M. Posteriormente, se ajustó el pH en un rango de 2 a 12 con HCl o NaOH al 0.1N, según se requiera. Para esta determinación se usó un potenciómetro OAKTON pH 550.

Posteriormente, se agregó a cada frasco 0.15 g del carbón activado, se taparon y se mantuvieron en agitación constante a temperatura ambiente durante



48 h. Al término del tiempo se filtraron para separar el carbón de la solución y se midieron los pH finales. El punto de carga cero se realizó graficando pH inicial vs pH final, el punto de intersección de la curva  $pH_{inicial}$  vs  $pH_{final}$  con la línea recta  $pH_{inicial} = pH_{final}$  corresponde al  $pH_{pzc}$ .

### **2.11 Densidad aparente**

Se pesó un matraz aforado de 1 mL, después se llenó con el carbón hasta la marca del aforo, posterior a esto se tapó y se trató de reducir el espacio vacío entre las partículas del adsorbente, si fue necesario se agregó más carbón al matraz, repitiendo este proceso hasta que se mantiene en la línea del aforo. Una vez que se acomodó el adsorbente en el matraz, nuevamente se pesó para obtener el peso final. Por diferencia de peso del matraz con carbón y vacío, se determinó la masa del carbón contenida en el volumen de 1 mL. Este procedimiento se realizó por triplicado y los valores obtenidos se promediaron.

### **2.12 Selección de colorantes para el proceso de adsorción**

Para el desarrollo de las pruebas de adsorción del presente trabajo se emplearon soluciones acuosas de diferentes colorantes con concentraciones conocidas.

Se realizaron las pruebas de adsorción sobre los carbones con colorantes ácidos y básicos. Colorantes básicos con carácter catiónico: azul básico 3 (BB3), amarillo básico 28 (BY28), rojo básico 18 (BR18), azul de metileno (BB9), cristal violeta (BV3) y verde de malaquita (BG4), se muestran en la Figura 13. Colorantes ácidos con carácter aniónico: fluoresceína (AY73), anaranjado de metilo, (AO52), índigo carmín (AB74), turquesa Sirius (DT86) y naranja directo 26 (DO26), sus estructuras e información relevante se presenta en la Figura 14.

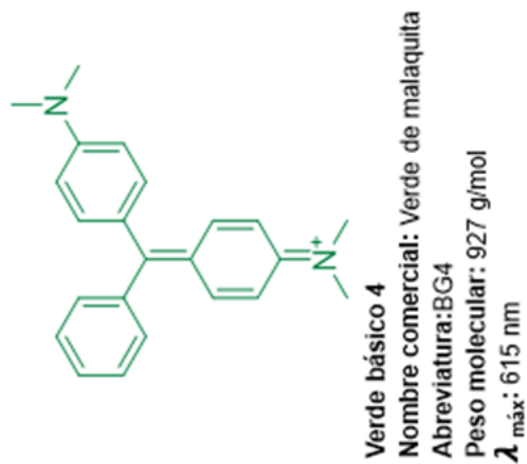
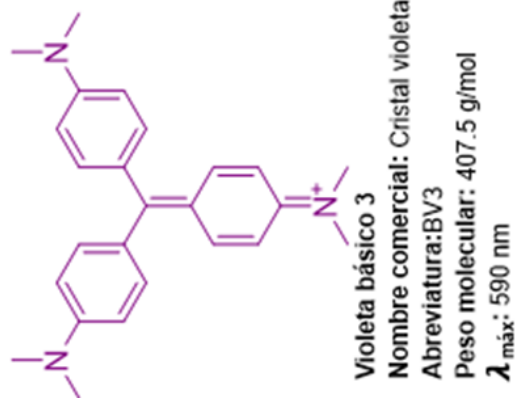
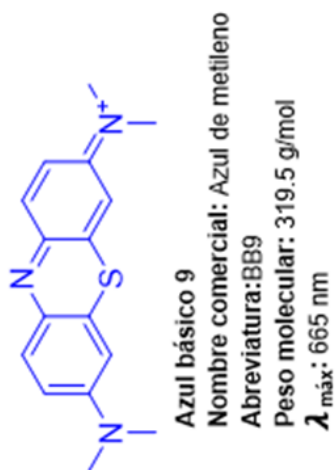
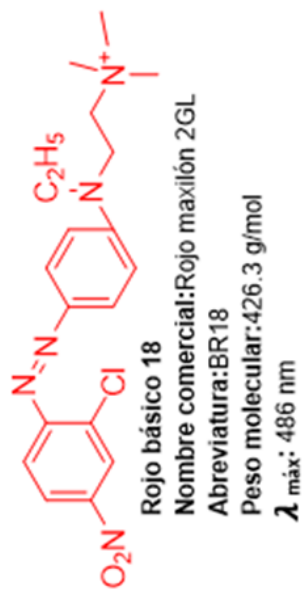
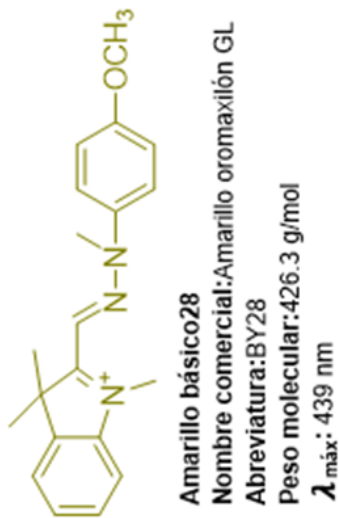
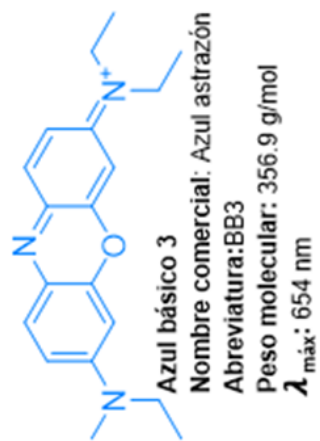


Figura 13. Estructura química y características de los colorantes textiles básicos o catiónicos.

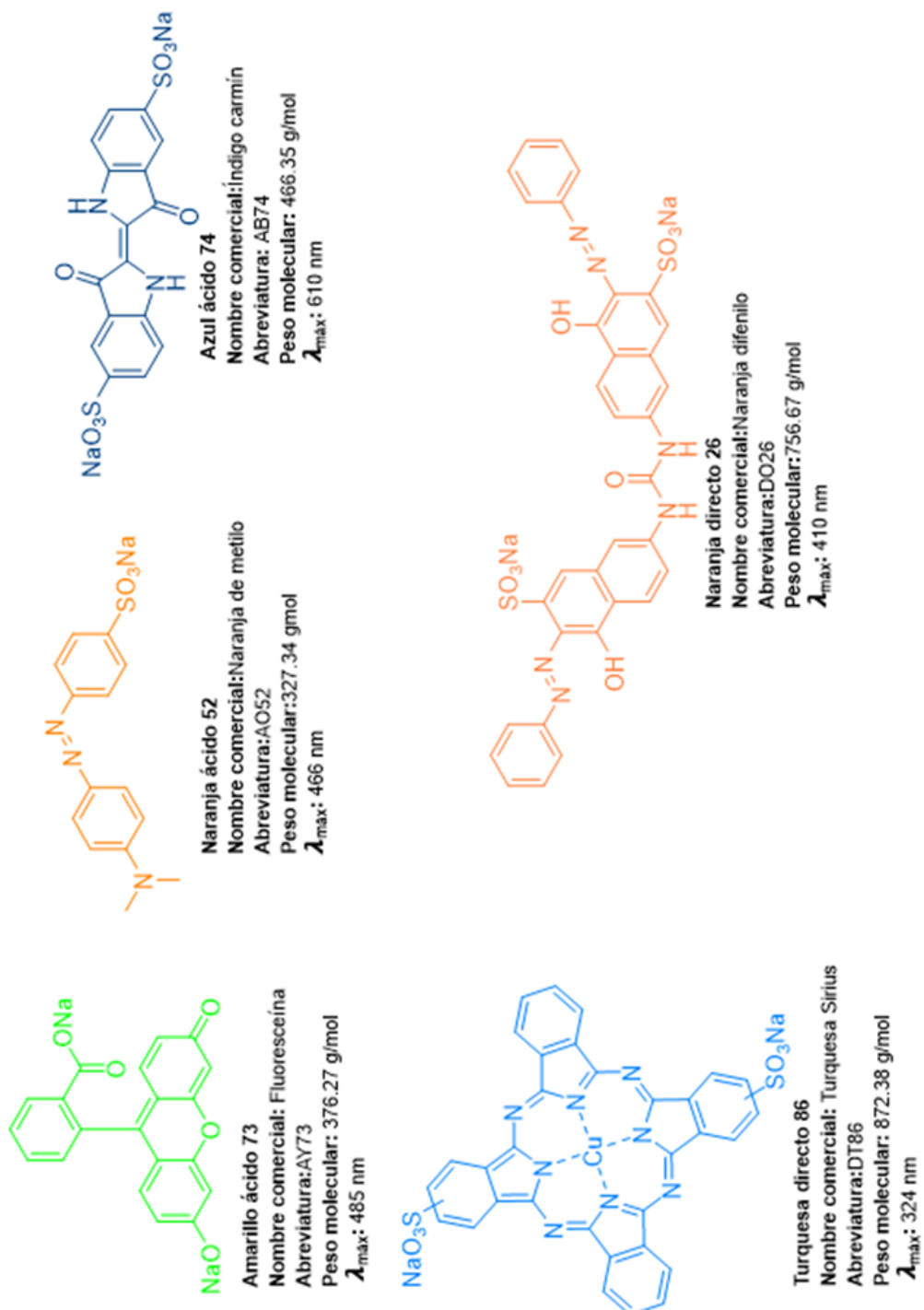


Figura 14. Estructura química y características de los colorantes textiles ácidos o aniónicos.

### 2.13 Adsorción estática

Esta de prueba se realizó en celdas de 20 mL de vidrio con tapa en las cuales se colocan 10 mL de la solución de cada colorante y 0.045 g del carbón activado. Las celdas se mantuvieron 48 h en agitación constante en un agitador orbital.

Transcurrido el tiempo de contacto entre el adsorbente y la solución, se muestreo un volumen determinado, de ser necesario se realizó una disolución, para ser analizada por espectroscopía en la región visible, utilizando un espectrofotómetro HACH modelo DR2500. Para hacer un correcto tratamiento de los datos se empleó la ecuación 2 para determinar el factor de dilución.

$$FD = \frac{VAC + VA}{VAC} = \frac{VT}{VAC} \quad (2)$$

Donde:

FD = Factor de dilución

VAC = Volumen de la alícuota o solución del colorante

VA = Volumen de agua

VT = Volumen total

### 2.14 Cinética de adsorción

La cinética de adsorción es una prueba en la cual se determina la velocidad de adsorción del colorante sobre el adsorbente, con esta prueba se determina el tiempo necesario para que el colorante sea retenido sobre la superficie del adsorbente. Para esta prueba se colocaron 10 mL de solución del colorante con una concentración inicial de 300 mg/L con 0.045 g tanto para los carbones químicos como físicos.

Se colocaron las celdas en un agitador orbital KJ-201BD y se muestrearon cada hora durante las primeras 4 h, después se realizan muestreos más espaciados cada 12, 24, 48 y 72 h sucesivamente, se midió la absorbancia de las soluciones, se analizaron los datos y se construyeron las gráficas de cinética de adsorción.

Los datos obtenidos se trataron con el modelo de H<sub>o</sub> de pseudo segundo orden, la forma lineal de este modelo se muestra en la ecuación 3.

$$\frac{t}{a_t} = \frac{1}{k_2 a_{eq}^2} + \frac{t}{a_{eq}} \quad (3)$$

Donde:

$a_{eq}$  = Cantidad adsorbida cuando se alcanza el equilibrio de adsorción (mg/g)

$a_t$  = cantidad adsorbida al tiempo t (mg/g)

t = tiempo de contacto entre el adsorbente y el adsorbato (h)

$k_2$  = Constante cinética de adsorción de pseudo segundo orden (g/mg·h)

Se calculó la constante de velocidad de adsorción (H) mediante la ecuación 4.

$$H = k_2 a_{eq}^2 \quad (4)$$

### 2.15 Construcción de curvas de calibración

Las curvas de calibración son necesarias para determinar la concentración de las soluciones durante el proceso de adsorción. Se construyeron graficando la concentración inicial de la solución del colorante vs absorbancia. Se prepararon siete soluciones de cada uno de los colorantes seleccionados en el rango de concentración entre 200 – 2000 mg/L, con incrementos de 300 mg/L. De cada una de las soluciones se realizó una dilución para obtener lecturas de absorbancia de cada colorante. Las absorbancias leídas se multiplican por el factor de dilución para obtener la absorbancia real.

Con los datos obtenidos se construyen las gráficas de las curvas de calibración, absorbancia contra concentración inicial, los puntos se graficaron y se ajustaron a líneas rectas, para obtener su ecuación y su coeficiente de correlación ( $R^2$ ). En la Figura 15 se muestran las curvas de calibración de los diferentes colorantes empleados, con sus respectivas ecuaciones y coeficientes de correlación.

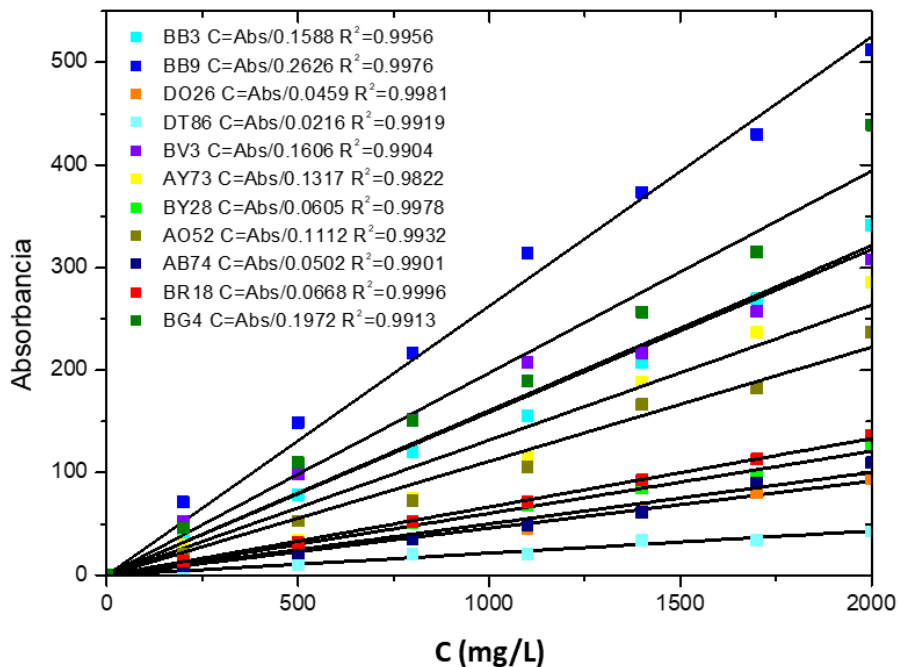


Figura 15. Curvas de calibración de colorantes en soluciones acuosas.

### 2.16 Construcción de isotermas de adsorción

Las isotermas de adsorción describen el equilibrio de adsorción de los colorantes en la superficie de los carbones activados a temperatura constante. Para la construcción de las isotermas de adsorción de los colorantes textiles se prepararon soluciones de cada uno de los colorantes seleccionados en el rango de 200 – 2000 mg/L, en incrementos de 300 mg/L, se pesaron siete muestras de carbón activado ( $m/V = 4.5 \text{ g/L}$ ), para cada solución de cada colorante a estudiar.

Se agregaron 10 mL de cada solución en celdas de vidrio de 20 mL para cada concentración de colorante a cada muestra de carbón, se cerraron las celdas, posteriormente se pusieron en agitación orbital y se mantuvieron durante 48 h a temperatura ambiente.

Terminado el tiempo de contacto se extrajeron las soluciones para medir en el espectrofotómetro la absorbancia de cada muestra. Se realizaron diluciones para las muestras que lo requirieron, multiplicando la absorbancia obtenida por el factor de dilución correspondiente. Se analizaron los datos obtenidos, mediante la

construcción de las gráficas de las isothermas, concentración de equilibrio vs cantidad adsorbida. Los datos obtenidos se trataron con la ecuación de Langmuir (ecuación 5), con la ecuación 6 se calculó el parámetro de equilibrio ( $R_L$ ) el cual indica la naturaleza favorable ( $0 < R_L < 1$ ) o no favorable ( $R_L > 1$ ) de la adsorción y con la ecuación 7 se calculó el porcentaje de adsorción.

$$\frac{C_{eq}}{a} = \frac{1}{a_m} C_{eq} + \frac{1}{K_L a_m} \quad (5)$$

$$R_L = \frac{1}{1 + K_L C_i} \quad (6)$$

$$\% \text{ Adsorción} = \frac{C_i - C_{eq}}{C_i} * 100 \quad (7)$$

Donde:

$a$  = Cantidad adsorbida (mg/g)

$a_m$  = Capacidad de la monocapa (mg/g)

$K_L$  = Constante de Langmuir (L/mg)

$C_{eq}$  = Concentración de equilibrio (mg/L)

$C_i$  = Concentración inicial (mg/L)

$R_L$  = Parámetro de equilibrio (adimensional)

De las isothermas que se ajustan al modelo de Langmuir ( $R^2 > 0.9$ ) se obtuvieron valores de capacidad de la monocapa y la constante de Langmuir.

## 2.17 Adsorción estática en aguas residuales

Las aguas residuales se prepararon en el laboratorio realizando dos teñidos, uno de tela de algodón con el colorante BB9 y de lana con el colorante AY73.

Para el teñido del algodón se colocaron 75 mL de agua destilada en un vaso de precipitado con 5 mL de solución de colorante BB9 al 1 %, se elevó la temperatura a 60 °C y se incorporó el textil, se agregaron 2 g de sulfato de sodio, se mantuvo la temperatura durante 10 min. Por último, se retiró el textil de la solución

y se enjuagó en repetidas ocasiones, el agua residual se utilizó cuando se encontraba a temperatura ambiente.

Para el teñido de lana se colocaron en un vaso de precipitado 75 mL de agua destilada y 5 mL de solución de colorante AY73 al 1 %, 0.5 ml de ácido sulfúrico, se elevó la temperatura a 70 °C, se incorporó la lana, se mantuvo la temperatura y se agregaron 3 g de sulfato de sodio, manteniendo la temperatura por 10 min más. Por último, se retiró el textil de la solución, se enjuagó en repetidas ocasiones y el agua residual se trató a temperatura ambiente.

El tratamiento del agua residual se realizó siguiendo la misma metodología de la adsorción estática descrita en 2.13.

Transcurrido el tiempo de contacto entre el adsorbente y el agua residual, se muestreo un volumen determinado, de ser necesario se realizó una disolución, para ser analizada.



# Capítulo III. Resultados y discusión

### 3.1 Datos generales de la materia prima

Los pañales empleados para obtener los CA solo se encontraban sucios de orina y fueron de un solo bebé. Los pesos por unidad y promedio de los pañales para la elaboración de los carbones activados se muestran en la Tabla 6. Los pesos se tomaron después de 21 días de secado.

Tabla 6. Peso unitario y promedio de la materia prima.

No. Muestra	Peso (g)
1	41.0097
2	42.9233
3	43.2869
4	50.553
5	40.8288
6	42.5349
7	54.9264
8	43.6378
9	42.789
10	43.6707
11	46.2906
12	42.2026
13	44.0708
14	52.7076
Promedio	<b>45.1023</b>

Con los datos recopilados de los pañales sucios y secos se obtuvo un peso promedio de 45.1023 g, este valor es cercano al peso de un pañal limpio (en promedio 50 g). De esta forma se determinó que ya se podían emplear para la elaboración de los carbones activados.

### 3.2 Porcentaje de humedad

En la Tabla 7 se muestran los resultados del cálculo del porcentaje de humedad para los pañales limpios y sucios.

Tabla 7. Cálculo del porcentaje de humedad de las muestras.

<b>Muestra</b>	<b>Agua eliminada (g)</b>	<b>Humedad (%)</b>	<b>Promedio (%)</b>
<b>Pañales limpios</b>	0.1889	6.66	6.74
	0.1994	6.83	
<b>Pañales sucios</b>	0.4512	14.26	13.53
	0.408	12.81	

Para los pañales limpios se obtuvo un promedio de humedad menor (6.74 %) que para los pañales sucios (13.53 %). Esto se debe a los residuos orgánicos que prevalecen en el pañal después del secado.

### 3.3 Obtención de carbones activados (CAs)

Los pañales desechables son un contaminante para el medio ambiente porque son un desecho abundante de difícil tratamiento y no biodegradables. Es por ello que se empleó como materia prima en la elaboración de adsorbentes por pirólisis. Utilizar un residuo sólido de difícil tratamiento y recuperación de sus componentes ayuda al medio ambiente de dos formas, reduciendo su volumen en la basura y generando nuevos materiales adsorbentes sin el uso del carbón mineral, madera, etc. Así, el costo de la materia prima para la producción de adsorbentes es prácticamente nulo, reduciendo los costos de producción.

Es importante destacar que se utilizó un residuo polimérico postindustrial que ya había cumplido con su vida útil. Los carbones activados se obtuvieron de todos los componentes de los pañales sucios, sin discriminar ninguna parte. Los CAs se activaron físicamente utilizando agua y químicamente usando  $H_3PO_4$ .

#### 3.3.1 Obtención de carbones activados físicamente

Se obtuvieron tres carbones físicos, nombrados como CarFPS400, CarFPS350 y CarFPS300 a diferentes temperaturas como se especificó en la sección 2.4.2. Para cada uno se construyó su propia rampa de calentamiento durante la carbonización.

A manera de ejemplo en la Figura 16, se muestra la rampa de calentamiento de CarFPS300 de 4.65 °C/min durante el proceso de pirólisis.

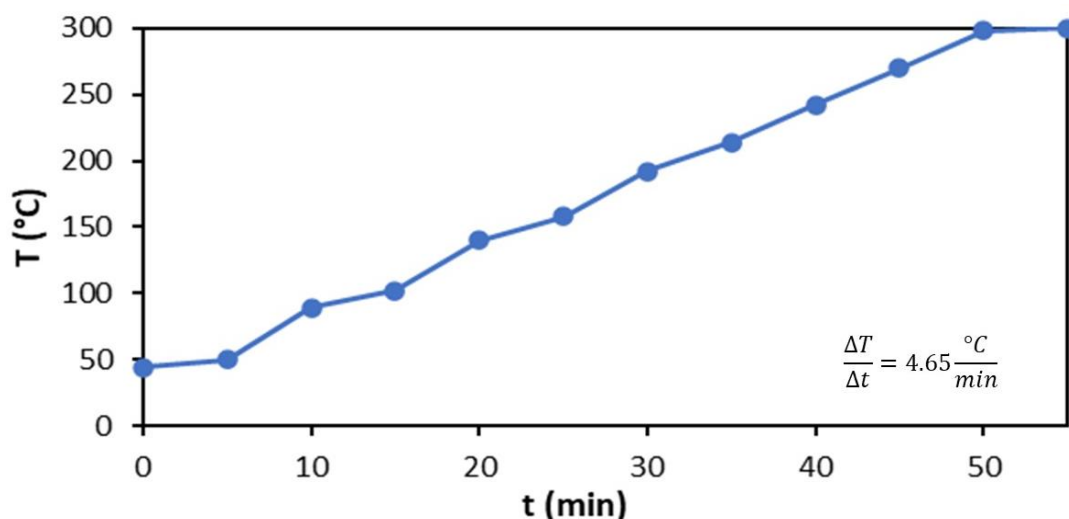


Figura 16. Rampa de calentamiento de CarFPS300.

En el Anexo 1, Figura A1.1 y A1.2 se presentan las rampas de los carbones CarFPS350 y CarFPS400.

El primer carbón físico que se obtuvo fue a 400 °C etiquetado como CarFPS400. Al término de la pirólisis del CarFPS400 se observó la presencia de ceniza. Para evitar la formación de ceniza se utilizó menor temperatura 350 y 300 °C (CarFPS350 y CarFPS300). Encontrando que la temperatura óptima de pirólisis para obtener los CAs activados físicamente fue de 300 °C. Para CarFPS300 se requirieron 50 min para alcanzar la temperatura de 300 °C.

El carbón físico de menor rendimiento fue CarFPS400 debido a que la temperatura de carbonización de 400 °C produce una gran cantidad de cenizas. Para CarFPS300 se obtuvo el rendimiento más alto (67.1 %). En este carbón se observaron pequeñas partículas de color gris. Estas partículas son del polielectrolito poliácido de sodio parcialmente degradado, el cual es el material super absorbente contenido en los pañales.

### 3.3.2 Obtención de carbones activados químicamente

Se obtuvieron cuatro carbones químicamente activados de los pañales sucios a 400 °C, etiquetados como CarQPS400, CarQPS400/50, CarQPS400/25 y CarQPS400/10. Durante la carbonización se obtuvieron rampas de calentamiento. En la Figura 17 a manera de ejemplo se muestra la rampa de calentamiento de CarQPS400/25 con una velocidad de calentamiento de 4.95 °C/min.

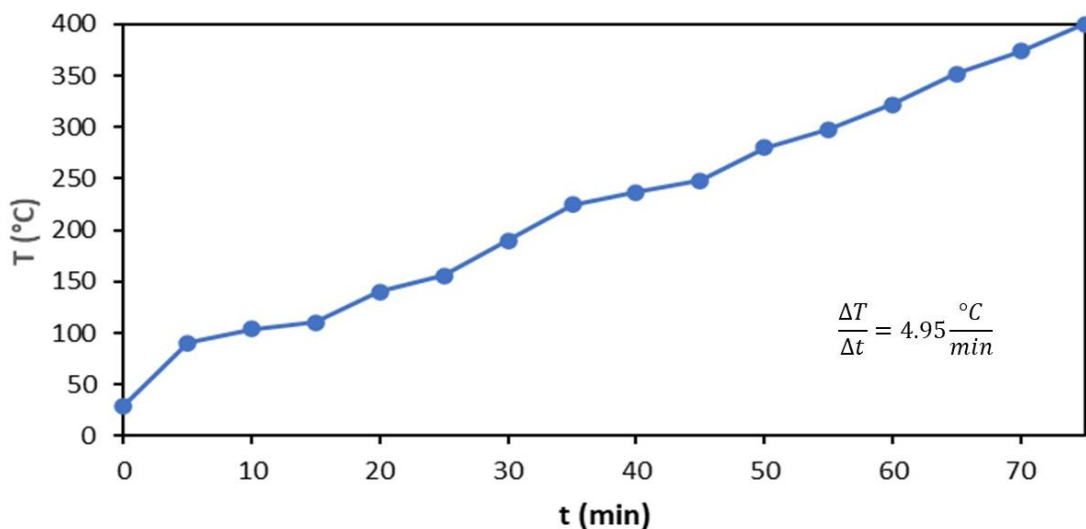


Figura 17. Rampa de calentamiento del CarQPS400/25.

Las rampas de calentamiento de los carbones CarQPS400, CarQPS400/50 y CarQPS400/10, se presentan en el Anexo 2, Figura A2.1 – A2.3. Para los carbones químicos no hubo variación en la temperatura, pero si en la concentración del ácido H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>. Durante la obtención de los carbones activados químicamente se disminuyó la concentración de H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>. La finalidad de reducir la concentración fue disminuir el volumen de agua en el lavado de los CAs después de su obtención.

Para alcanzar la temperatura de pirolisis de los CAs químicamente se requirieron 75 min.

De los cuatro carbones químicos, el carbón CarQPS400/10 se obtuvo con el menor rendimiento (28.8 %), esto se debe a la menor concentración de H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> usado en su activación. En el caso de CarQPS400/50 obtuvo el mayor rendimiento, atribuido a la concentración de H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> con la que fue activado. En la Tabla 8 se

muestran los rendimientos de los CAs obtenidos en este trabajo, así como de CAs reportados en la literatura.

Tabla 8. Rendimiento de los carbones activados.

Activación	Carbón activado	Rendimiento (%)	Referencia
Física	CarFPS400	28.5	Este trabajo
	CarFPS350	48.2	Este trabajo
	CarFPS300	67.1	Este trabajo
Química	CarQPS400	42.3	Este trabajo
	CarQPS400/50	44.3	Este trabajo
	CarQPS400/25	34.8	Este trabajo
	CarQPS400/10	28.8	Este trabajo
Química	PET	13	[63]
	Acetato de celulosa	38.6	[70]
	Poliuretano	18	[66]
	Cubrebocas	35	[68]

En la literatura se han reportado la obtención de carbones activados químicamente de residuos agroindustriales con rendimientos del 15 – 47 % [41, 61, 62]. También existen reportes de carbones activados químicamente a partir de residuos poliméricos como el PET, acetato de celulosa, polipropileno y los cubrebocas, donde se reportan rendimientos del 13 – 38 % [63 66, 68, 70]. Comparando el rendimiento de los carbones del presente trabajo con los reportados, es importante resaltar que el rendimiento de los carbones CarFPS300, CarFPS350 y CarQPS400/50 son más altos. Esto puede explicarse por la estabilidad térmica del polielectrolito utilizado como material super absorbente en los pañales. El polielectrolito es el poliácido de sodio parcialmente entrecruzado, lo que lo hace insoluble y térmicamente estable hasta los 300 °C, esta información fue corroborada por TGA.

### 3.4 Caracterización por análisis termogravimétrico (TGA)

Con este análisis térmico se puede medir la pérdida en porcentaje en peso, como función del incremento de temperatura. El análisis termogravimétrico se realizó incrementando la temperatura 10 °C/min en atmósfera de N<sub>2</sub>. Con el estudio termogravimétrico es posible conocer la estabilidad térmica del material [72].

En la Figura 18 se muestran los TGA obtenidos de la materia prima, tanto limpia como sucia, que se empleó para la obtención de los carbones activados.

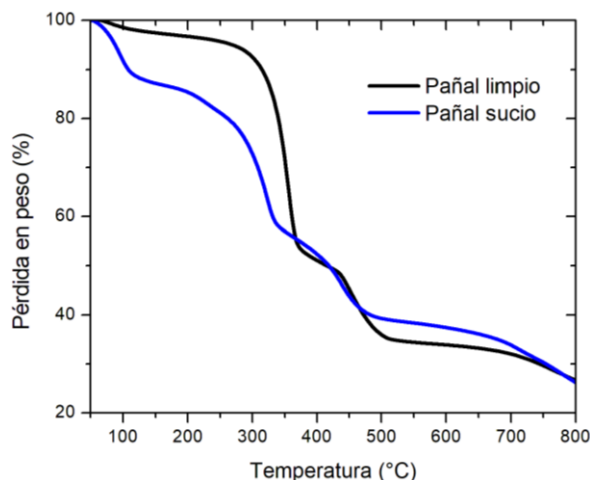


Figura 18. Termogramas de TGA de la materia prima utilizada.

Ambas muestras son significativas porque no se excluyó ninguna parte del pañal. Es importante remarcar que los pañales sucios utilizados en este trabajo sólo contenían desechos de orina. Los TGA de ambas muestras presentan una pérdida en peso a 100 °C. La primera pérdida en masa se atribuye a pérdida de agua, 3 % para el pañal limpio y 12 % para el pañal sucio, ya que contenía más agua proveniente de la orina y permanecía ocluida en el material super absorbente. Entre los 100 °C y 200 °C en la muestra de pañal sucio hay una pérdida continua del porcentaje en peso debido a compuestos orgánicos de bajo peso molecular. En ambos pañales, limpio y sucio, se observó entre 300 a 350 °C un evento térmico, debido a la descomposición de la celulosa y los polímeros PP y PE que forman al pañal [74]. Posteriormente, se observó una pérdida en peso entre 350 y 500 °C, para el pañal limpio y sucio. Esta pérdida en peso se le atribuye a la descomposición aleatoria del polímero entrecruzado y de alto peso molecular presente en el pañal, poliacrilato de sodio, lo cual concuerda con lo reportado en la literatura [75, 76].

Finalmente, el porcentaje de carbón residual en ambas muestras es cercano al 28 % en peso a 800 °C.

En la Figura 19 se muestran los TGA de los carbones activados físicamente a partir del pañal sucio, el CarFPS300, CarFPS350 y CarFPS400. CarFPS300 y CarFPS350 presentan un comportamiento térmico muy similar de 50 a 100 °C presentan una pequeña pérdida (5 %) atribuida a agua. Posteriormente, a 450 °C se observa una pérdida del 40 % para el CarFPS300 y 35 % de pérdida en peso para el CarFPS350 correspondiente al poliacrilato de sodio que no se degrada durante la pirólisis. Posteriormente a 770 °C se observa una pérdida en peso (20 %) atribuido a la pirólisis del resto de la red polimérica entrecruzada de alto peso molecular [75,76]. Finalmente, a 900 °C se observa 33 % de carbón residual para ambos carbones.

El carbón CarFPS400 muestra una mayor estabilidad térmica, a los 100 °C presenta una pérdida en peso atribuida a agua (3 %). Posteriormente, una pérdida (10 %) en peso a los 300 - 700 °C atribuida a la descomposición térmica de los polímeros de bajo peso molecular, después se muestra una pérdida de (16 %) a los 700 – 900 °C atribuida a la degradación del polímero entrecruzado de alto peso molecular, poliacrilato de sodio, que no se degradó durante la carbonización. Finalmente, el carbón residual es superior al 70 % en peso. Mostrando que el CarFPS400 debido a la mayor temperatura de carbonización es el que tiene menor cantidad de polímero sin carbonizar.

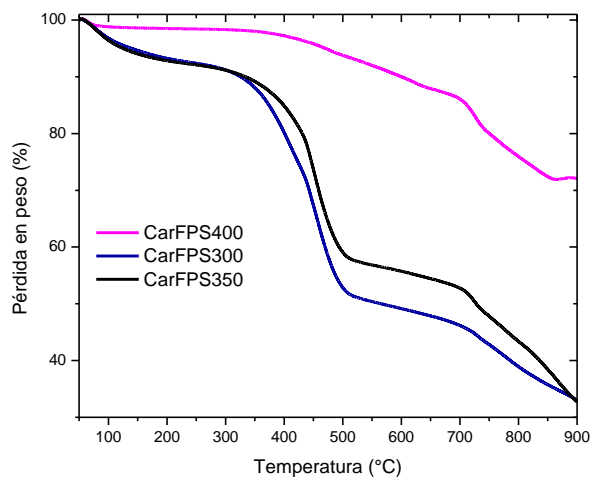


Figura 19. Termogramas de TGA de los carbones activados físicamente.



En la Figura 20 se muestran los termogramas de tres carbones activados químicamente. En el caso de CarQPS400/50 y CarQPS400/25 muestran una primera pérdida de 50 – 100 °C del 5 % para CarQPS400/50 y del 12 % para el CarQPS400/25, atribuida al agua ocluida. En 525 - 590 °C atribuida a la descomposición aleatoria de la materia orgánica sin degradarse después de la pirólisis, sin observar carbón residual. Esto puede deberse a que el H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> acelera la degradación de los polímeros que forman el pañal.

En el caso de CarQPS400 presentó la mayor estabilidad térmica. Presentó una primera pérdida en peso del 2 % atribuida al agua ocluida. A 400 - 480 °C muestra una pérdida en peso del 15 % atribuida a la descomposición del polímero de bajo peso molecular y en 480 - 900 °C muestra una pérdida en peso del 18 % atribuida a la descomposición del polímero de alto peso molecular que no se degradó durante la carbonización. Finalmente, se obtuvo 65 % en peso de carbón residual.

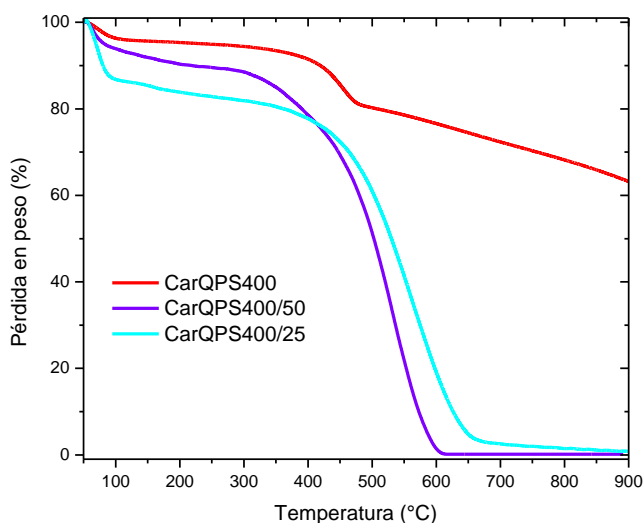


Figura 20. Termogramas de TGA de los carbones activados químicamente.

En el Anexo 3, Figuras A3.1 – A3.11, se muestran los termogramas realizados con su respectiva primera derivada.

### 3.5 Caracterización por calorimetría diferencial de barrido (DSC)

La calorimetría diferencial de barrido (del inglés Differential Scanning Calorimetry), se basa en registrar la temperatura de una muestra en comparación con la de un material inerte cuando la muestra es calentada o enfriada a una velocidad constante en una atmósfera controlada. Los cambios de temperatura en la muestra con respecto a la referencia se deben a los procesos exotérmicos o endotérmicos que tienen lugar en ella, como los producidos por fusión, ebullición, sublimación, vaporización, cambios de estructura cristalina, procesos de adsorción, descomposición, oxidación, reducción, etc. [72].

Se separaron los principales componentes del pañal, considerados los de mayor relevancia por su proporción en los pañales para el presente trabajo. Los seleccionados fueron tres: el relleno del pañal (celulosa), la cubierta (PE y PP) y el polielectrolito super absorbente (poliacrilato de sodio) que se encuentra en el interior del pañal.

En la Figura 21 se muestran las gráficas de DSC de los componentes del pañal. La celulosa en el ciclo de calentamiento - enfriamiento no hay eventos térmicos, endotérmicos o exotérmicos, en el rango de temperatura empleada (25 a 250 °C) por lo que en el material no se observó temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ) o temperatura de fusión ( $T_m$ ).

El poliacrilato de sodio, absorbente que se encuentra en el interior del pañal en forma de pequeños gránulos, no presentó ningún evento térmico. Lo que demuestra que es un polímero sin  $T_m$  y  $T_g$  en el intervalo de 50 y 250 °C.

El último de los componentes del pañal que se analizó por medio de DSC fue el material de la superficie del pañal, el cual presenta un primer evento endotérmico de 125 a 130 °C posiblemente debido a un re-arreglo cristalino. El segundo evento térmico es atribuido a su temperatura de fusión a 160 °C, el cual coincide con la  $T_m$  del polipropileno, por lo tanto, la cubierta del pañal está constituida por polipropileno, como esta reportado por el fabricante.

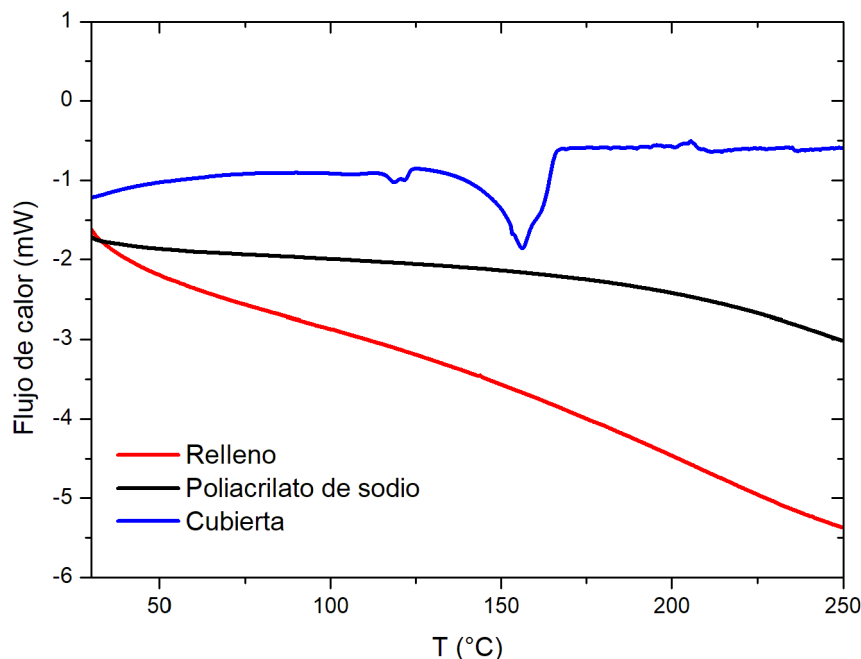


Figura 21. Termograma de DSC de los componentes del pañal.

En el Anexo 4, Figura A4.1 se muestra la gráfica de DSC de enfriamiento y calentamiento de la cubierta del pañal.

### 3.6 Caracterización por espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier (FT-IR)

La espectroscopia infrarroja estudia la interacción entre la materia y la radiación infrarroja correspondiente a la región del espectro electromagnético que abarca el número de onda entre  $12800 - 10 \text{ cm}^{-1}$  [72].

En la Figura 22 se muestra el espectro de FT-IR del super absorbente poliacrilato de sodio presente en los pañales. El polielectrolito poliacrilato de sodio tiene en su estructura el grupo carboxilato de sodio el cual tiene cuatro bandas de absorción características, la primera es la banda de absorción en  $3300 \text{ cm}^{-1}$  corresponde al modo de vibración de elongación del grupo hidroxilo  $\nu\text{OH}$ , cuando esta parcialmente modificado se encuentra en su forma ácida. La segunda se encontró en  $1670 \text{ cm}^{-1}$  asignada al carbonilo  $\nu\text{C}=\text{O}$ . Finalmente, en  $1550$  y  $1400 \text{ cm}^{-1}$  se observan dos bandas de absorción correspondientes a  $\nu\text{OCO}$ . En  $2920 \text{ cm}^{-1}$  se observa una banda debida al modo de vibración de elongación de  $\nu\text{C-H}$  que

corresponden a los metinos y metilenos de la cadena principal del poliacrilato de sodio [77].

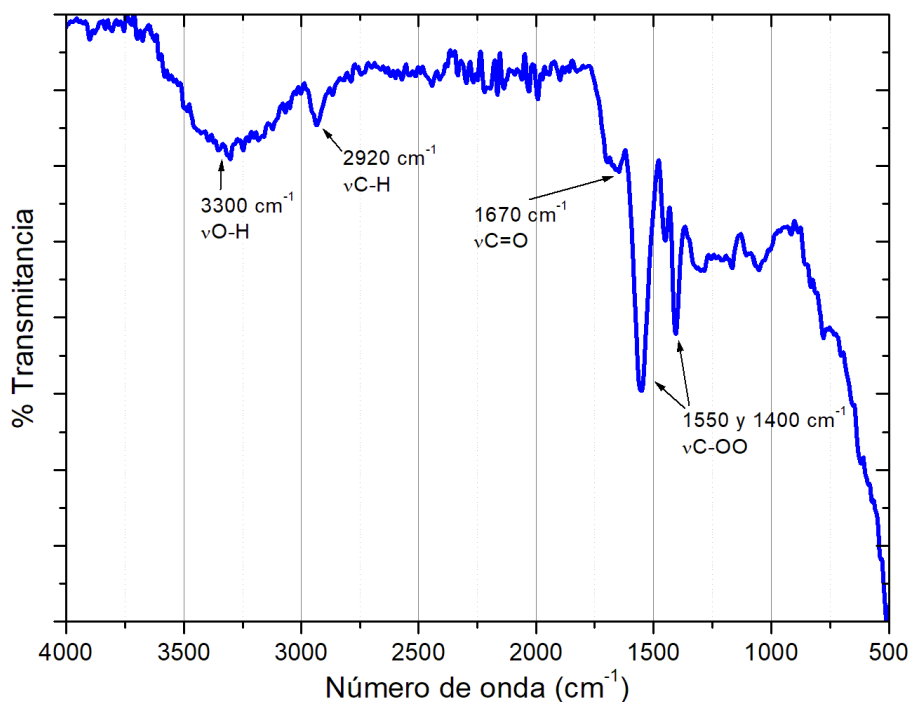


Figura 22. Espectro FT-IR del poliacrilato de sodio absorbente presente en los pañales.

En la Figura 23 se muestran los espectros FT-IR de los carbones activados físicamente, en los cuales se observan tres bandas de absorción características del poliacrilato de sodio. En 1700 cm⁻¹ se observa una banda de absorción asignada al carbonilo  $\nu$ C=O; en 1556 y 1400 cm⁻¹  $\nu$ OCO. Los tres carbones físicos presentaron estas tres bandas de absorción sin importar que fueron obtenidos a diferentes temperaturas, mostrando que los tres CAs tienen poliacrilato de sodio parcialmente degradado o grupos funcionales del poliacrilato de sodio remanentes.

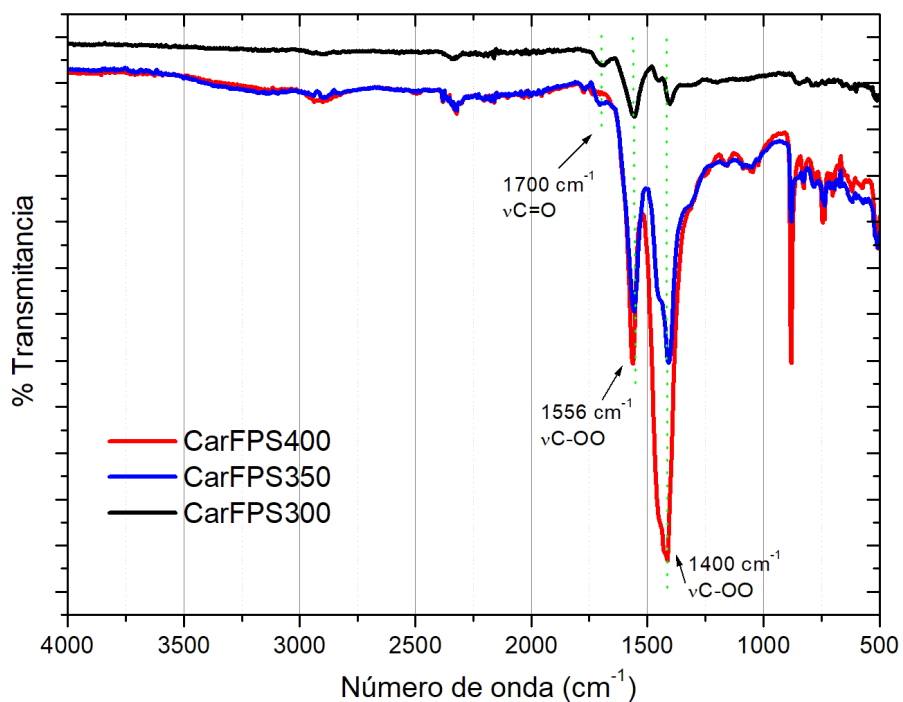


Figura 23. Espectro FT-IR de carbones activados físicamente.

La Figura 24 muestra los espectros de FT-IR de los carbones activados químicamente. En los espectros se muestran bandas de absorción que se encuentran en el poliacrilato de sodio. La banda de absorción en  $2915\text{ cm}^{-1}$  se asignó al modo de vibración de elongación de  $\nu\text{C-H}$  que corresponden a los metinos y metilenos de la cadena principal del poliacrilato de sodio, en  $1700\text{ cm}^{-1}$  correspondiente al grupo carbonilo  $\nu\text{C=O}$ , y las bandas  $1590$  y  $1435\text{ cm}^{-1}$  que corresponden al  $\nu\text{OCO}$ . Lo que indicó la presencia de poliacrilato de sodio o de grupos funcionales remanentes de la cadena polimérica del poliacrilato de sodio después de la pirólisis. Además, se observaron dos bandas de absorción en  $1200\text{ cm}^{-1}$  y en  $1000\text{ cm}^{-1}$  asignadas al grupo fosfato  $\nu\text{OP(OH)}$ , debido a la activación química con  $\text{H}_3\text{PO}_4$ .

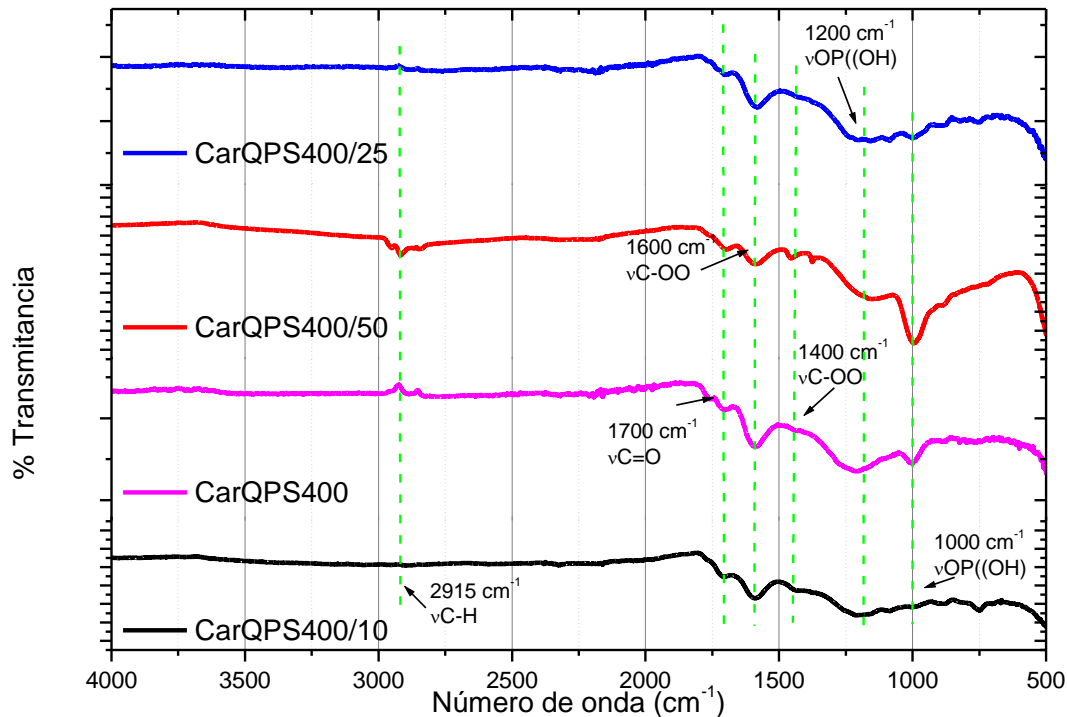


Figura 24. Espectro FT-IR de carbones activados químicamente.

### 3.7 Análisis por microscopía electrónica de barrido

En la Figura 25 se muestran las micrografías de los carbones activados físicamente, las cuales fueron tomadas con aumentos de X500 (a), d) y g)), X1200 (b), e) y h)) y X2500 (c), f) y i)), para observar la morfología de la superficie de los carbones.

En el carbón CarFPS400 se observan cavidades de formas y tamaños irregulares. En CarFPS350 la morfología muestra una superficie rugosa y granular, con cavidades de varios tamaños. CarFPS300 muestra una superficie menos rugosa con relieves, y huecos irregulares. Comparando los tres carbones activados físicamente, el CarFPS400 es el carbón que presenta mayor cantidad de cavidades, mientras que CarFPS300 muestra huecos y no cavidades.

En la Figura 26 se muestran las micrografías de los carbones activados químicamente. En el caso de CarQPS400 presenta una morfología variada zonas lisas, rugosas con gran cantidad de cavidades de diferentes tamaños. CarQPS400/50 presenta mayor cantidad de zonas con morfología parcialmente

lisas con canales y zonas rugosas con cavidades de diferentes tamaños. El carbón CarQPS400/25 presenta una morfología más homogénea que los dos carbones anteriores porque es mayormente rugosa con cavidades irregulares, sin observar zonas lisas.

En general los carbones físicos y químicos muestran una morfología distinta, aunque todos se obtuvieron de la misma materia prima, como se mencionó en la sección 1.9 y 2.1. Esto puede explicarse porque durante la carbonización los diferentes polímeros que forman el pañal reaccionan y descomponen en la pirólisis de diferente forma. Porque los pañales contienen varios polímeros con diferentes propiedades térmicas y químicas como su  $T_g$ ,  $T_m$ , temperatura de degradación, estructura, etc. En el Anexo 5, Figuras A5.1 – A5.6 se muestra las micrografías de los carbones activados con un aumento de X100.

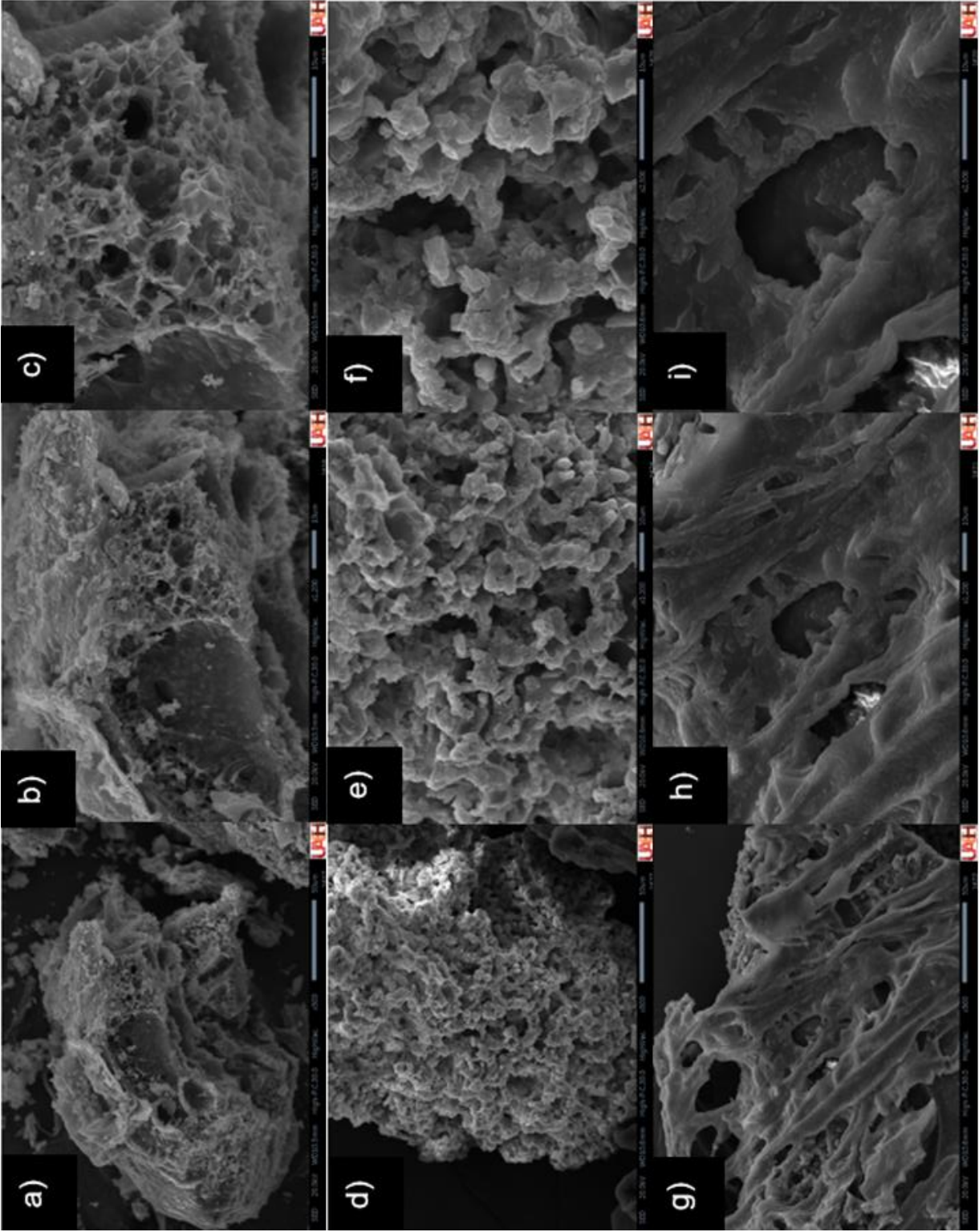


Figura 25. Micrografías de SEM de CarFFPS400 a), b) y c) CarFFPS350 d), e) y f) CarFFPS300 g), h) e i).



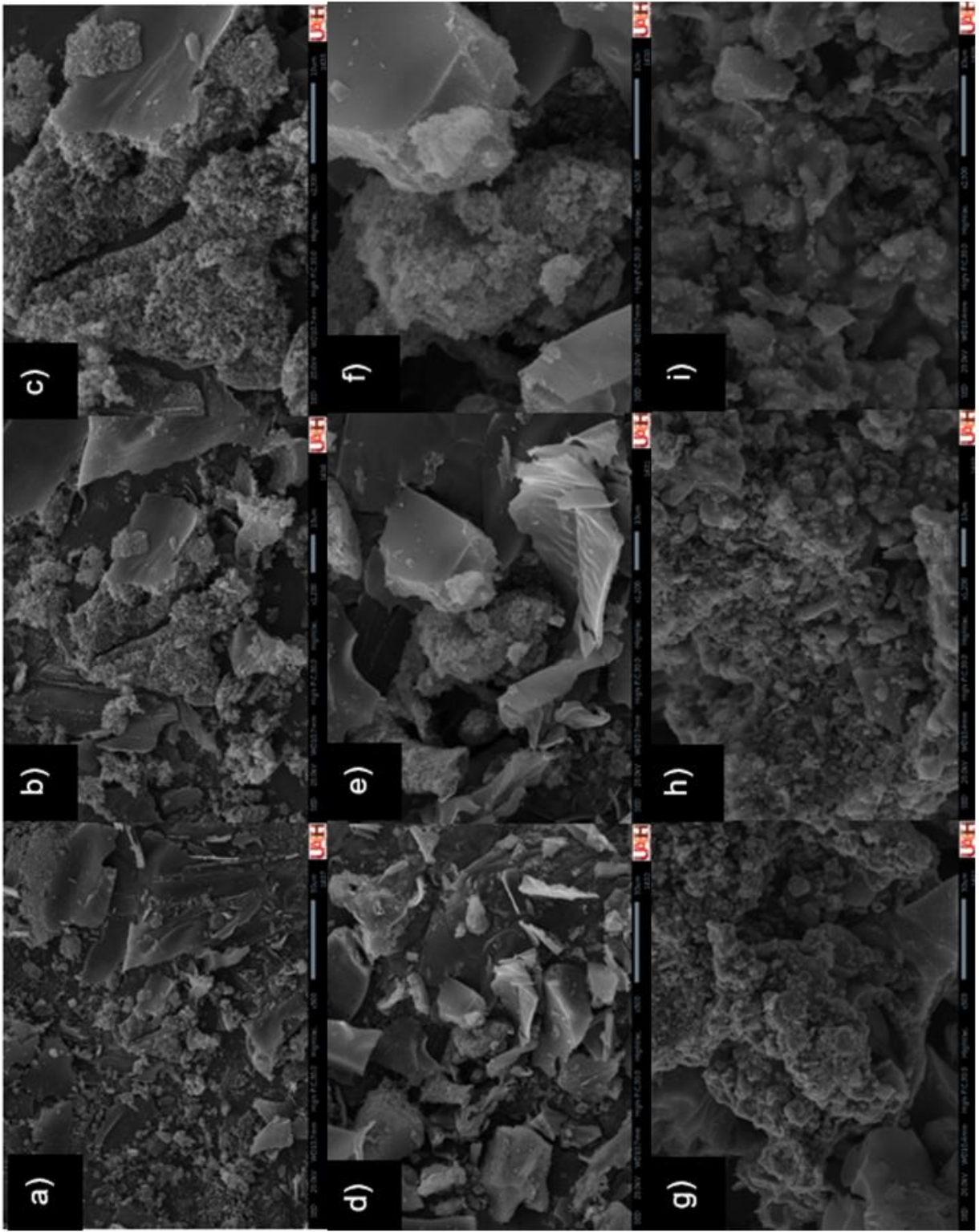


Figura 26. Micrografías de SEM de CarQPS400 a), b) y c) CarQPS400/50 d), e) y f) CarQPS400/25 g),

### 3.8 Parámetros texturales por isoterma de adsorción de N<sub>2</sub> (BET)

Mediante el análisis de las isotermas de adsorción y desorción de N<sub>2</sub>, fue posible determinar los parámetros texturales de los carbones activados químicamente, los cuales se reportan en la Tabla 9. Los resultados de los carbones activados físicamente no se reportan en la Tabla 9 porque sus superficies específicas están en el rango de 3 a 0.2351 m<sup>2</sup>g<sup>-1</sup>, depreciables para carbones activados.

Tabla 9. Parámetros texturales de los carbones activados químicamente.

Carbón	S <sub>BET</sub> (m <sup>2</sup> g <sup>-1</sup> )	V <sub>TP</sub> (cm <sup>3</sup> g <sup>-1</sup> )	V <sub>μP</sub> (cm <sup>3</sup> g <sup>-1</sup> )	V <sub>MesoP</sub> (cm <sup>3</sup> g <sup>-1</sup> )	%MesoP	D <sub>PromPoro</sub> (nm)
CarQPS400	541.3	0.766	0.080	0.686	89.6	5.66
CarQPS400/50	56.1	0.257	0.0	0.257	100	18.31
CarQPS400/25	913.8	1.266	0.140	1.126	88.9	5.54
CarQPS400/10	302.5	0.271	0.074	0.197	72.7	3.59

El valor más alto de superficie específica para los carbones activados químicamente fue para el CarQPS400/25 de 913.8 m<sup>2</sup>g<sup>-1</sup> con un volumen total de poro de 1.266 cm<sup>3</sup>g<sup>-1</sup>. Los carbones químicos al variar la cantidad de H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> con la que fueron activados afecta significativamente en la porosidad que se desarrolla en los carbones activados.

Los polímeros en presencia de altas concentraciones de H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> se degradan rápidamente sin generar porosidad y alta superficie específica. La concentración con la que se evita la rápida degradación y si genera porosidad y mayor superficie específica es con la concentración de 21.25 %.

En el Anexo 6, Figura A6.1 – A6.4 se muestran las isotermas de adsorción – desorción de N<sub>2</sub>. Por su forma todas las isotermas de los carbones químicos son del tipo IV de acuerdo con la clasificación de la IUPAC, lo que corresponden a materiales sólidos mesoporosos. Las isotermas de todos los carbones químicos presentan lazo de histéresis de tipo H3, debido a que la concentración de N<sub>2</sub> adsorbida no es la misma que en las isotermas de desorción. Sin embargo, estos lazos de histéresis son muy pequeños, esto puede explicarse cuando se comparan

los valores del volumen del  $V_{\text{MesoP}}$  con el  $V_{\text{TP}}$ , cuyos valores son casi iguales en cada uno de los carbones, por la homogeneidad del tamaño de poro.

### 3.9 Determinación del punto de carga cero ( $\text{pH}_{\text{pzc}}$ )

El punto de carga cero sirve para determinar la acidez o basicidad de la superficie de los materiales adsorbentes. En la Figura 27 se observan las gráficas de las curvas de los puntos de carga cero de los carbones. En el caso de los carbones físicos los valores son básicos y este fue incrementando con la temperatura de carbonización, atribuido a que al elevar la temperatura hubo degradación del polímero de carácter ácido dentro de los pañales. Esto promovió a que la superficie de los carbones fuera cada vez más básica. En el caso de los carbones químicos estos presentaron puntos de carga cero de 2 o muy cercanos a 2, atribuido a su activación química con  $\text{H}_3\text{PO}_4$ , y a los grupos ácidos del polielectrolito poliacrilato de sodio.

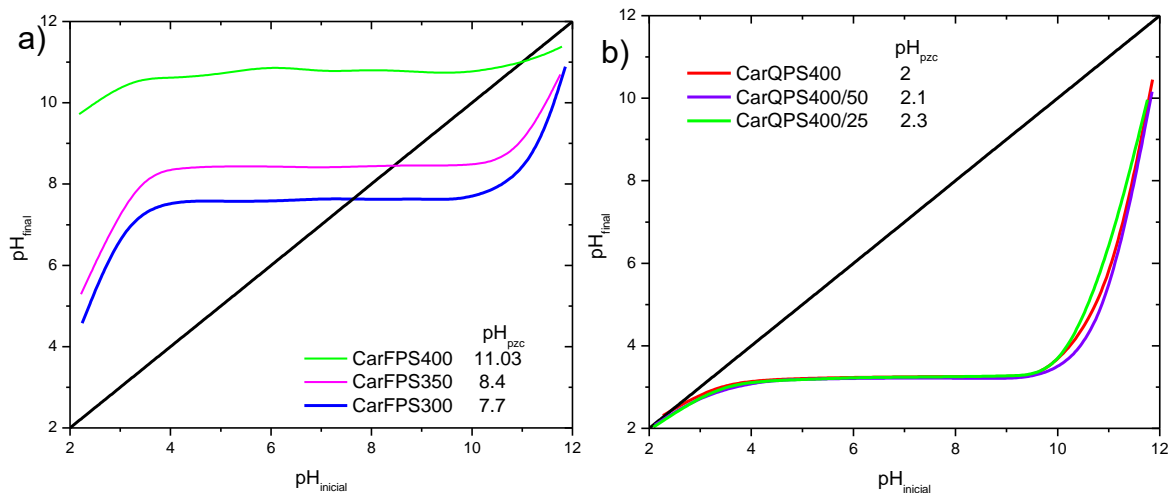


Figura 27.  $\text{pH}_{\text{pzc}}$  de los carbones activados a) física y b) químicamente.

### 3.10 Densidad aparente

La densidad aparente o densidad volumétrica se puede definir como el peso de un sólido en aire dividido entre el volumen total que ocupa. Es una propiedad intrínseca que puede cambiar dependiendo de cómo se maneje el material. En el volumen se consideran las partículas de carbón activado, la porosidad y el espacio existente

entre las partículas. Esta es una prueba física no destructiva de caracterización, donde se determina el peso del carbón por unidad de volumen (g/mL). Esta propiedad física indica que tan ligero o pesado es el carbón activado. Los valores de la densidad aparente que se obtuvieron para los carbones físicos y químicos se muestran en la Tabla 10.

Tabla 10. Densidad aparente de los carbones activados.

Activación	Carbón	Densidad aparente (g/mL)
Física	CarFPS400	0.2862
	CarFPS350	0.4417
	CarFPS300	0.3831
Química	CarQPS400	0.1437
	CarQPS400/50	0.1578
	CarQPS400/25	0.2237

De los carbones físicos el CarFPS350 es el más pesado, atribuido a que al disminuir la temperatura de carbonización se disminuyó la cantidad de ceniza y porosidad.

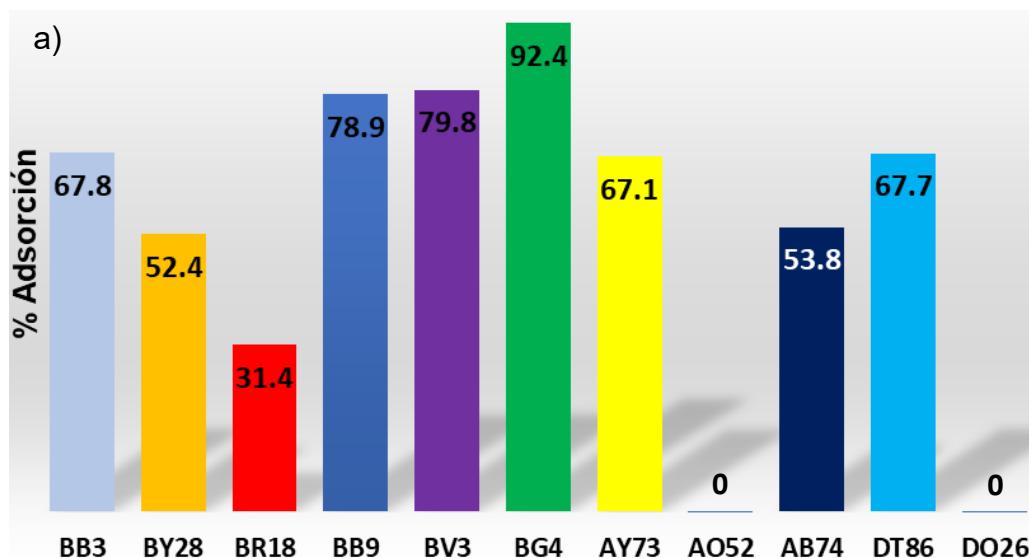
En el caso de los carbones químicos el CarQPS400/25 fue el de valor mayor, de densidad aparente atribuida a la cantidad de  $H_3PO_4$  que se empleó en su activación. Esta concentración evitó la degradación completa de los polímeros que conforman el pañal y con ello incrementó la densidad aparente.

### 3.11 Adsorción estática

Se obtuvieron tres CAs físicos CarFPS400, CarFPS350 y CarFPS300. Los carbones físicos no presentaron una adsorción favorable con todos los colorantes seleccionados. El CarFPS350 fue el que presentó menor adsorción, el gráfico de los resultados de la adsorción estática se encuentra en el Anexo 7, Figura A7.1. En la Figura 28 a) y b) se muestra que los porcentajes de adsorción sobre CarFPS400 y CarFPS300 es favorable con los colorantes básicos y no con los colorantes ácidos.

Los colorantes básicos se adsorben en mayores porcentajes con ambos carbones debido a los grupos carboxilato sin degradar durante la pirólisis. Estos grupos carboxilatos remanentes pueden quimisorber los colorantes básicos y por eso presentan mayor porcentaje de adsorción. La presencia de los grupos carboxilato se corroboró con la caracterización de FT-IR en la sección 3.6. La nula adsorción que presentan algunos colorantes ácidos puede deberse a factores estructurales del colorante, como tamaño y grupos funcionales. Sin embargo, los colorantes ácidos AY73, AB74 y DT86 presentaron los porcentajes de adsorción más altos (67, 53 y 67 %) con CarFPS400. Esto puede deberse a que CarFPS400 se obtuvo con la mayor temperatura de pirólisis y por lo tanto tiene menor cantidad de grupos carboxilato, disminuyendo las repulsiones con los colorantes ácidos.

Se considera de los tres carbones físicos que CarFPS300 fue el mejor para colorantes básicos por la menor energía requerida en su obtención, mayor rendimiento y poca diferencia en los porcentajes de adsorción. En este carbón también se adsorbe bien AY73.



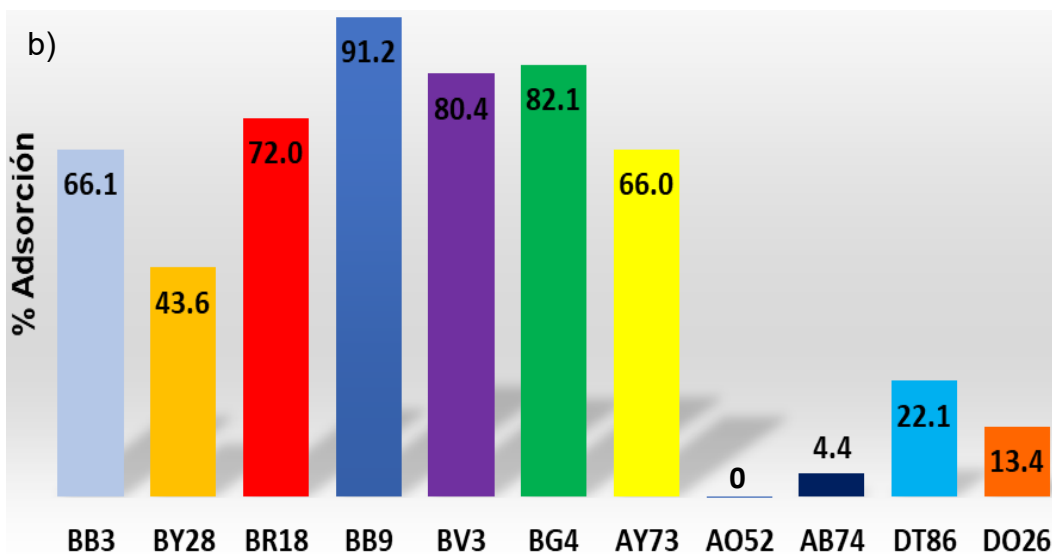


Figura 28. Adsorción estática sobre a) CarFPS400 y b) CarFPS300.

Se obtuvieron cuatro CAs químicamente CarQPS400, CarQPS400/50, CarQPS400/25 y CarQPS400/10. Los resultados de adsorción estática del CarQPS400 y CarQPS400/10 se encuentran en el Anexo 7, Figura A7.2 y A7.3, porque son los que presentan menores porcentajes de adsorción. En la Figura 29 se muestran los porcentajes de adsorción sobre a) CarQPS400/50 y b) CarQPS400/25, en todos los colorantes empleados la adsorción es favorable, observando mayores porcentajes de adsorción en los colorantes básicos que en los ácidos.

Los porcentajes de adsorción sobre CarQPS400/50 Figura 29 a), es superior al 96% para los colorantes básicos y superiores al 79% para los colorantes ácidos. Para CarQPS400/25 (Figura 29 b) los porcentajes de adsorción para los colorantes básicos fueron superiores al 97% y para los colorantes ácidos fueron superiores al 73%.

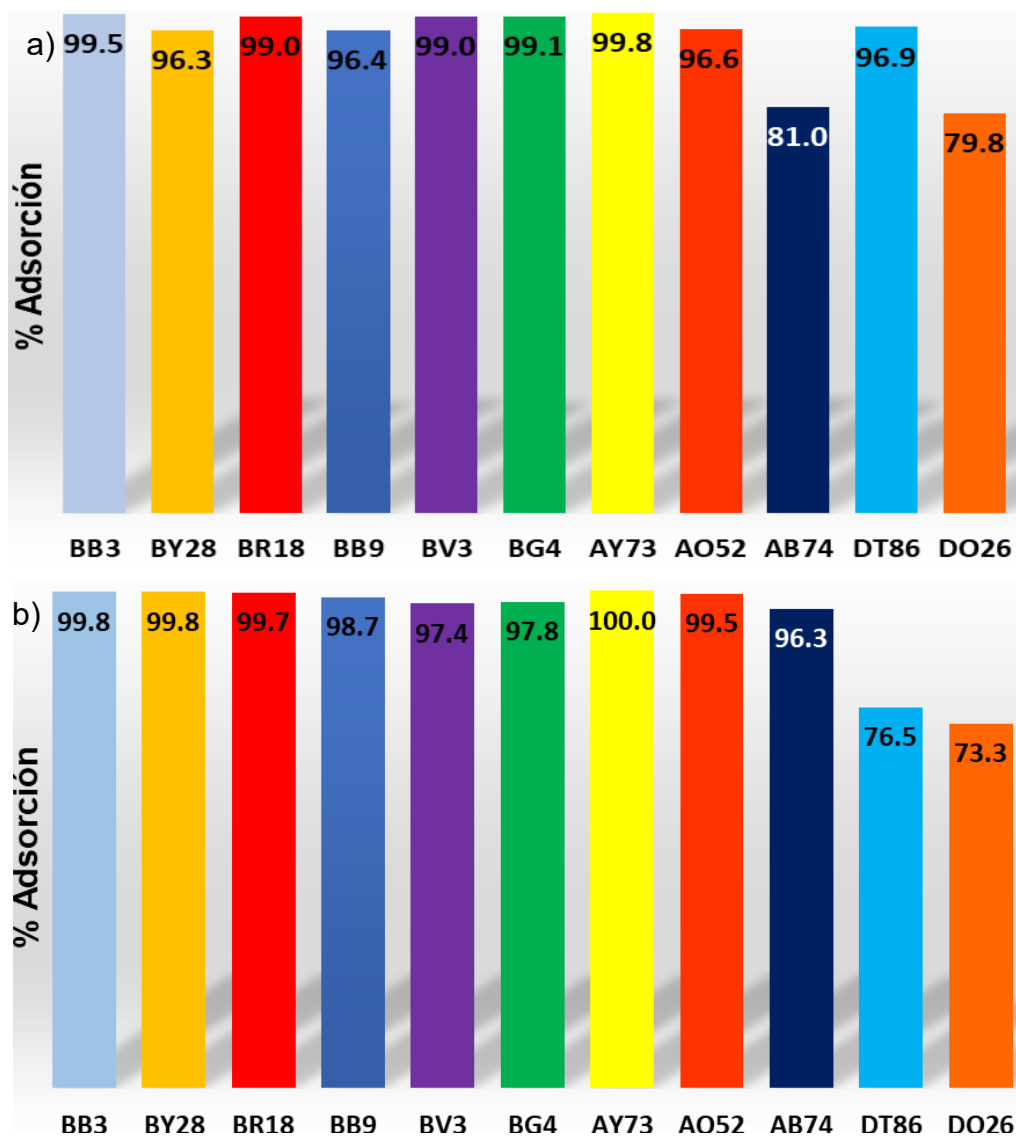


Figura 29. Adsorción estática sobre a) CarQPS400/50 y b) CarQPS400/25.

La adsorción de colorantes básicos es atribuida a la presencia de los grupos carboxilato del polielectrolito (poliacrilato de sodio) y a la atracción química del  $H_3PO_4$  que le confieren el carácter ácido a su superficie ( $pH_{pzc} = 2$ ). Ambos factores contribuyen a que exista una quimisorción de los colorantes básicos con el adsorbente CarQPS400/25 y CarQPS400/50.

Por otro lado, la adsorción de los colorantes básicos se debe a la porosidad que genera la activación química en ambos carbones activados ( $913.85 \text{ m}^2/\text{g}$  para CarQPS400/25 y  $56.1 \text{ m}^2/\text{g}$  para CarQPS400/50).

De ambos carbones CarQPS400/50 y CarQPS400/25 se considera mejor adsorbente CarQPS400/25 por la menor concentración del  $H_3PO_4$  utilizado durante su activación. El uso de una menor concentración de  $H_3PO_4$  durante su producción además de ahorrar ácido usa menor cantidad de agua durante el proceso de lavado en la producción del CA. Además, el porcentaje de adsorción de algunos colorantes ácidos son menores para CarQPS400/25 sin embargo estos porcentajes no disminuyen drásticamente como se disminuyó la concentración del  $H_3PO_4$  en la producción del CarQPS400/25 que usa la mitad de ácido que CarQPS400/50.

### **3.12 Cinética de adsorción**

La cinética de adsorción permite determinar el tiempo de contacto necesario para alcanzar el equilibrio de adsorción de los colorantes textiles sobre los carbones activados, así como la velocidad de adsorción de los colorantes seleccionados. El tratamiento de los datos sólo se realizó para los colorantes básicos que si mostraron adsorción en la sección 3.11.

El tratamiento de los datos con la ecuación de la cinética de pseudo segundo orden presentó un buen ajuste para los carbones CarFPS400 y CarFPS300, como se muestra en la tabla 11. El tratamiento de los resultados de la cinética de adsorción con la ecuación de pseudo segundo orden, permitió determinar la constante de equilibrio ( $k_2$ ), la cantidad de colorante adsorbido cuando se ha alcanzado el equilibrio ( $a_{eq}$ ) y la velocidad de adsorción de cada colorante sobre los carbones activados (H).

Los coeficientes de correlación son mejores para los colorantes básicos que para los colorantes ácidos, así como la velocidad de adsorción es superior con los colorantes básicos alcanzando una H de 5000 mg/h\*g con el BG4 sobre el CarFPS400. CarFPS300 alcanzó una H de 50.51 mg/hg con el colorante BB3. La  $a_{eq}$  de mayor valor fue de 22.27 mg/g.



Tabla 11. Cinética de adsorción de pseudo segundo orden para cada colorante en los carbones activados físicamente.

Carbón	Carácter	Colorante	$a_{eq}$ ( $mgg^{-1}$ )	$K_2$ ( $gh^{-1}mg^{-1}$ )	H ( $mggh^{-1}g^{-1}$ )	$R^2$
CarFPS400	Catiónico	BB3	22.17	0.073	36.23	0.9987
		BY28	21.93	0.277	133.33	0.9949
		BR18	21.97	0.025	12.32	0.974
		BB9	22.27	10.08	5000	0.9977
		BV3	21.98	0.108	52.36	0.9978
		BG4	22.22	10.12	5000	0.9997
	Aniónico	AY73	21.98	0.084	40.49	0.9882
CarFPS300	Catiónico	BB3	22.22	0.102	50.51	0.9988
		BY28	21.74	0.04	18.94	0.9841
		BB9	22.22	0.085	0.085	0.9946
		BV3	22.12	0.067	0.067	0.9958
		BG4	22.27	0.325	0.325	0.9996

A manera de ejemplo en la Figura 30 se muestran las gráficas correspondientes a la cinética de adsorción del CarFPS300 con los colorantes básicos. La formación de mesetas está entre las 3 y 6 h, alcanzando el equilibrio a diferentes tiempos.

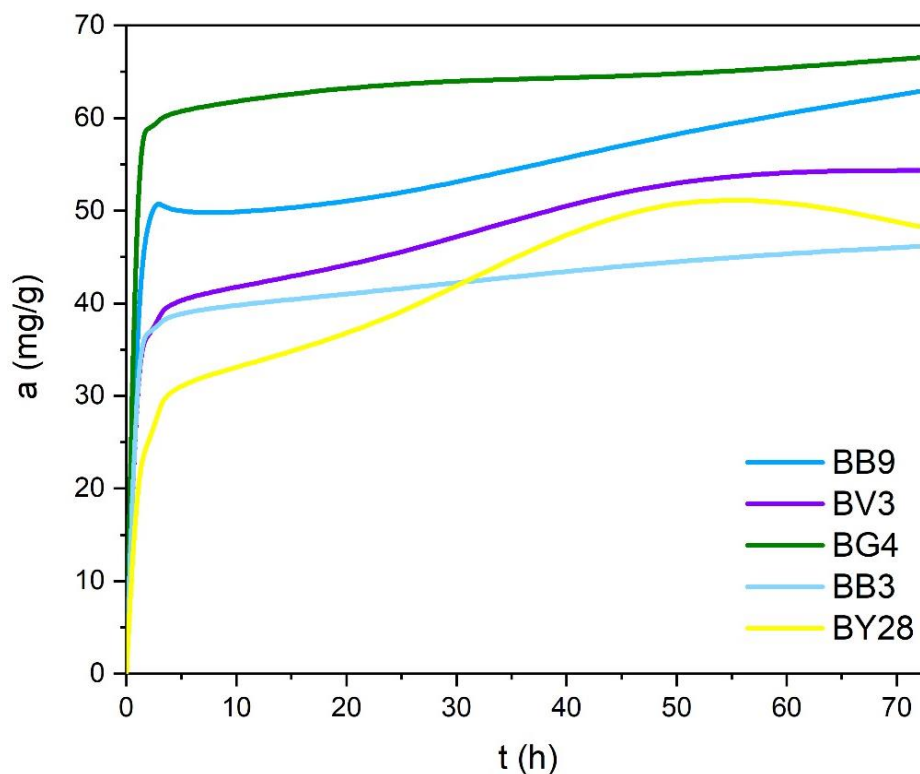


Figura 30. Cinética de adsorción sobre CarFPS300 con colorantes básicos.

En la Tabla 12 se presentan los resultados de los datos tratados con la ecuación de pseudo segundo orden, de los carbones químicos CarQPS400/50 y CarQPS400/25. Para los carbones químicos, CarQPS400/50 y CarQPS400/25, el tratamiento de los datos con la ecuación cinética de pseudo segundo orden presentan un buen ajuste al modelo  $H_0$ . Los datos del CarQPS400 se muestran en el Anexo 8, Tabla A8.2.

La  $a_{eq}$  de mayor valor fue de 22.73 mg/g en los CAs. Los coeficientes de correlación fueron superiores a 0.9444 con los colorantes básicos y de 0.9703 con los colorantes ácidos, la H de mayor valor fue con el colorante AY73 de 204 mg/hg sobre el carbón CarQPS400/50 y de 192 mg/hg sobre el carbón CarQPS400/25.

Tabla 12. Cinética de adsorción de pseudo segundo orden para cada colorante en los carbones activados químicamente.

Carbón	Carácter	Colorante	$a_{eq}$ ( $mgg^{-1}$ )	$K_2$ ( $gh^{-1}mg^{-1}$ )	H ( $mggh^{-1}g^{-1}$ )	$R^2$
CarQPS400/50	Catiónico	BB3	22.73	0.077	40	0.9999
		BY28	22.22	0.105	51.81	0.9999
		BR18	22.73	0.125	64.52	0.9999
		BB9	21.98	0.042	20.41	0.9992
		BV3	22.08	0.109	52.91	0.9998
	BG4	22.12	0.178	86.96	1	
	Aniónico	AY73	21.88	0.426	204.1	1
		AO52	22.73	0.125	64.52	0.9998
		AB74	22.73	0.015	7.92	0.9703
		DT86	21.83	0.04	18.9	0.9994
DO26		22.22	0.02	10.07	0.9894	
CarQPS400/25	Catiónico	BB3	21.93	0.359	172.4	1
		BY28	22.27	0.19	94.34	1
		BR18	22.02	0.189	91.74	0.9999
		BB9	22.32	0.084	42.02	0.9998
		BV3	21.88	0.044	20.96	0.9996
	BG4	22.12	0.039	18.98	0.9997	
	Aniónico	AY73	22.12	0.393	192.3	1
		AO52	22.42	0.276	138.9	1
		AB74	22.27	0.029	14.2	0.9984
		DT86	22.27	0.019	9.38	0.9987
DO26		22.32	0.015	7.72	0.9817	

A manera de ejemplo en la Figura 31 se muestran las gráficas correspondientes a la cinética de adsorción del CarQPS400/25 con los colorantes básicos y ácidos. Con ambos colorantes la formación de mesetas está entre las 10

y 30 h, alcanzando el equilibrio a diferentes tiempos. Los colorantes básicos BB9; BR18, son los más rápidos en alcanzar el equilibrio, mientras que los colorantes ácidos más rápidos en alcanzar el equilibrio fueron el AY73 y AO52.

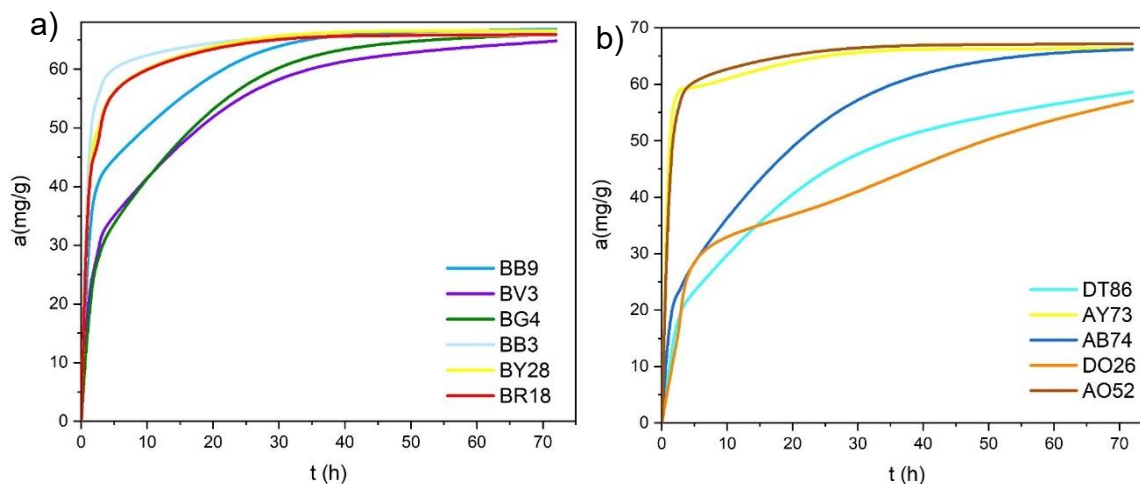


Figura 31. Cinética de adsorción sobre CarQPS400/25 con colorantes a) básicos y b) ácidos.

Los gráficos de cinética de adsorción de los carbones que no se presentan, están en el Anexo 8 Figuras A8.1 – A8.6 y en el Anexo 9 Figura A9.1 – A9.9 se presentan las gráficas del perfil de concentración.

### 3.13 Isotermas de adsorción

En todas las isotermas con los CAs químicamente se observa la formación de la monocapa, lo que indica un comportamiento que se ajusta al modelo de Langmuir.

Los valores de la capacidad de la monocapa ( $q_m$ ), la constante de Langmuir ( $K_L$ ) y el coeficiente de correlación ( $R^2$ ) se muestra en la Tabla 13 para los carbones químicos y cada colorante.

Para CarQPS400/50 y CarQPS400/25 los valores de la capacidad de la monocapa ( $q_m$ ) de los colorantes catiónicos está en el rango de 42 – 384 mg/g y para los colorantes aniónicos 94 – 333 mg/g. Los valores del coeficiente de correlación son superiores a 0.9071 con los colorantes catiónicos y superiores a 0.9804 con los colorantes aniónicos.

Tabla 13. Parámetros de Langmuir de los colorantes sobre los carbones activados químicamente.

Carbón	Carácter	Colorante	$a_m$ ( $mgg^{-1}$ )	$K_L$ ( $Lmg^{-1}$ )	$R_L$	$R^2$
CarQPS400/50	Catiónico	BB3	128.21	0.025	0.019 – 0.165	0.9494
		BY28	169.49	0.017	0.029 – 0.232	0.9807
		BR18	322.58	0.009	0.051 – 0.349	0.9932
		BB9	119.05	0.031	0.016 - 0.139	0.9915
		BV3	156.25	0.009	0.053 - 0.358	0.9605
	BG4	42.37	0.008	0.057 - 0.377	0.9071	
	Aniónico	AY73	138.89	0.028	0.018 - 0.154	0.9861
		AO52	322.58	0.028	0.018 – 0.151	0.9931
		AB74	333.33	0.004	0.115 – 0.565	0.9804
		DT86	222.22	0.017	0.028 - 0.223	0.9850
DO26		111.11	0.026	0.019 – 0.162	0.9827	
CarQPS400/25	Catiónico	BB3	344.83	0.046	0.011 – 0.098	0.9919
		BY28	357.14	0.058	0.009 – 0.080	0.9961
		BR18	384.62	0.054	0.009 – 0.084	0.9904
		BB9	172.41	0.018	0.027 – 0.218	0.9177
		BV3	128.21	0.016	0.030 – 0.233	0.9617
	BG4	196.08	0.039	0.013 – 0.115	0.9967	
	Aniónico	AY73	94.34	0.037	0.013 – 0.118	0.9937
		AO52	322.58	0.059	0.008 – 0.078	0.9965
		AB74	322.58	0.021	0.024 – 0.196	0.9912
		DT86	172.41	0.012	0.039 – 0.286	0.9903
DO26		172.41	0.007	0.067 – 0.419	0.9909	

El tiempo de contacto se estandarizó en 48 h para las pruebas de adsorción, con agitación orbital y a temperatura ambiente.

Los valores de  $R_L$ , cercanos a cero indican que la adsorción es favorable. Observando que todos tienen valores cercanos a cero, pero con un comportamiento

aleatorio en ambos tipos de colorantes (catiónicos y aniónicos) con ambos carbones químicos.

Los colorantes básicos en CarQPS400/50 se adsorben en concentraciones que van desde 42.37 hasta 322.58 mg/g por el carácter aniónico de la superficie de los carbones indicado en su punto de carga cero cercano a dos. También esta interacción iónica se debe a la presencia de grupos fosfato generados durante la activación. Los colorantes aniónicos son adsorbidos en concentraciones que van desde 111.11 hasta 333.33 mg/g gracias a la porosidad generada durante su activación. Además, también puede deberse a la presencia de interacciones tipo puente de hidrógeno. en la adsorción de estos colorantes es importante considerar la forma y tamaño de la estructura de los colorantes, adsorbiéndose en menor cantidad.

Los colorantes básicos en CarQPS400/25 se adsorben en concentraciones que van desde 128.21 hasta 384.62 mg/g por el carácter aniónico de la superficie, y con los colorantes aniónicos son adsorbidos en concentraciones que van desde 94.34 hasta 322.58 mg/g gracias a su porosidad.

En la Figura 32 a manera de ejemplo se muestran las gráficas correspondientes a las isotermas de adsorción del CarQPS400/25 con los colorantes básicos y ácidos. Los puntos en las gráficas muestran datos experimentales y las líneas son los datos tratados con el modelo de Langmuir.

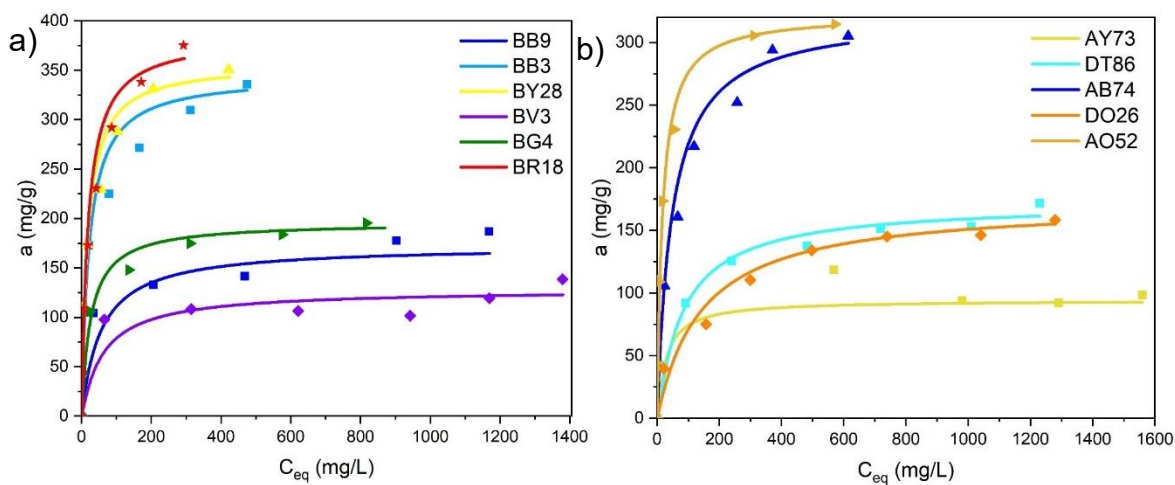


Figura 32. Isotermas de adsorción sobre CarQPS400/25 con colorantes a) básicos y b) ácidos.

Las isotermas de adsorción de los carbones químicos CarQPS400 y CarQPS400/50, se presentan en el Anexo 10 de la Figura A 10.1 – 10.6.

### 3.15 Adsorción en agua residual

En la Tabla 14 se muestran los porcentajes de remoción de color del agua residual azul (BB9) y amarilla (AY73) sobre los cuatro carbones activados, CarFPS350, CarFPS300, CarQPS400/50 y CarQPS400/25. Con el agua residual que contenía el colorante azul de metileno (BB9) el que presentó mayor remoción de color fue el CarQPS400/25. Lo cual corrobora que es el adsorbente con mayor desempeño.

Los porcentajes de remoción de color con el agua residual que contenía el color amarillo (AY73), no presentó remoción con los carbones físicos, mientras que con los carbones químicos presentó porcentajes de remociones de color superiores al 99.9% para ambos carbones químicos CarQPS400/50 y CarQPS400/25.

Tabla 14. Porcentaje de remoción de color.

<b>Carbón activado</b>	<b>W.W. BB9 (%)</b>	<b>W.W. AY73 (%)</b>
<b>CarFPS350</b>	34.8	--
<b>CarFPS300</b>	31.7	--
<b>CarQPS400/50</b>	73.7	99.9
<b>CarQPS400/25</b>	91.6	100

Los carbones activados químicamente presentaron los valores más altos en la remoción de color en aguas residuales, sin importar la presencia de otros agentes empleados durante el teñido, estos no afectaron al proceso de adsorción, debido a las interacciones intermoleculares como los puentes de hidrógeno y a la porosidad de los carbones activados.

### 3.16 Análisis de FT-IR del carbón activado después de la adsorción

En la Figura 33 se muestra los FT-IR de a) CarQPS400/25 después de la adsorción de BB9, el carbón CarQPS400/25 y colorante BB9. En el espectro del carbón activado después de la adsorción de BB9 muestra bandas de adsorción correspondientes al colorante y al CarQPS400/25 esto da evidencia de la adsorción del colorante BB9 sobre la superficie de CarQPS400/25.

En el rango de  $1700 - 1320 \text{ cm}^{-1}$  se observan múltiples bandas de absorción correspondiente a la presencia del BB9 en el carbón activado, en  $1591 \text{ cm}^{-1}$  se muestra una banda de absorción correspondiente al doble enlace carbono – carbono del anillo aromático  $\nu\text{C}=\text{C}_{\text{Aro}}$  y en  $1320 \text{ cm}^{-1}$  una banda correspondiente al modo de vibración de deformación del grupo funcional metilos germinales ( $\delta\text{CH}_3$ ), estas no aparecen en el FT-IR del carbón antes de estar en contacto con el colorante BB9.

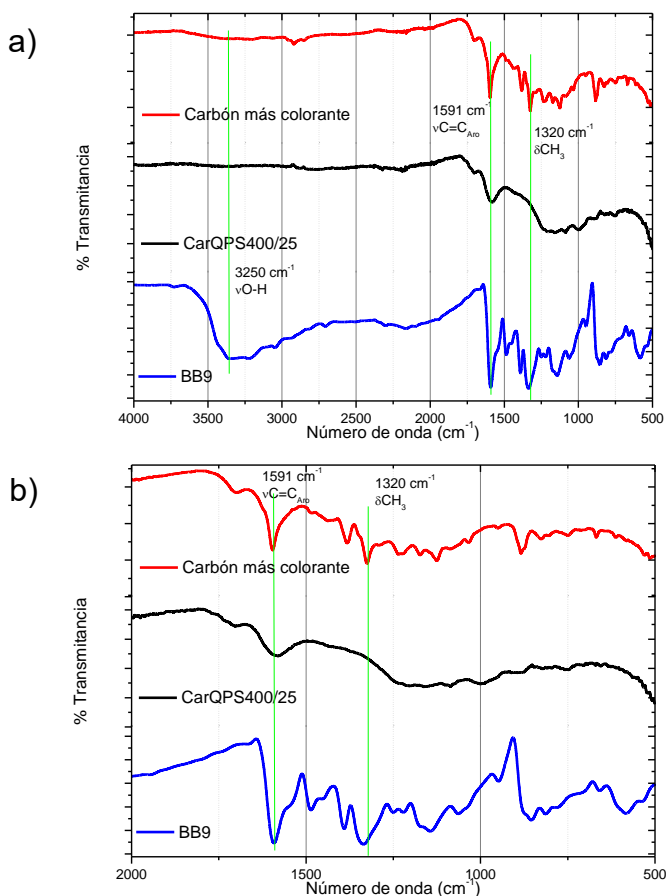


Figura 33. Espectros FT-IR de a) CarQPS400/25 después de la adsorción de BB9, CarQPS400/25 y BB9 en el rango de  $4000 - 500 \text{ cm}^{-1}$  b) ampliación de  $2000 - 500 \text{ cm}^{-1}$ .



En el caso del colorante AY73, como se muestra en la Figura 34, las bandas características que evidencian la presencia del colorante sobre el carbón después de la adsorción, se muestra una banda de absorción en  $1591\text{ cm}^{-1}$  correspondiente al doble enlace carbono – carbono del anillo aromático  $\nu\text{C}=\text{C}_{\text{Aro}}$  y en  $1637\text{ cm}^{-1}$  una banda correspondiente al grupo funcional carbonilo  $\nu\text{C}=\text{O}$  del carboxilato.

Estas bandas se encuentran en el rango de  $1591 - 1108\text{ cm}^{-1}$  en las cuales se puede observar un pequeño corrimiento, debido a la interacción del carbón con el colorante ya que este colorante se adsorbe por interacciones de puentes de hidrógeno.

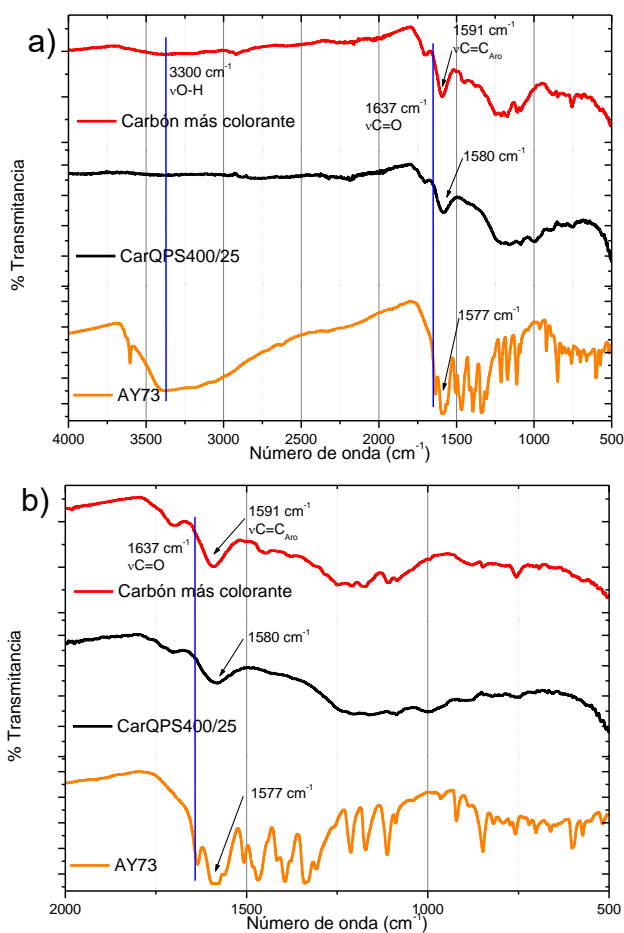


Figura 34. Espectros FT-IR de a) CarQPS400/25 después de la adsorción de AY73, CarQPS400/25 y AY73 en el rango de  $4000 - 500\text{ cm}^{-1}$  b) ampliación de  $2000 - 500\text{ cm}^{-1}$ .

## Conclusiones

Los pañales desechables de bebé fueron seleccionados como materia prima en la preparación de nuevos materiales de tipo carbones activados con aplicaciones en remediación ambiental.

Los carbones se obtuvieron mediante activación física y química. La adsorción en soluciones acuosas de colorantes muestra que los carbones activados físicamente son buenos adsorbentes de colorantes básicos. Esto se debe a que el material super adsorbente en los pañales es el polielectrolito poliacrilato de sodio, el cual es térmicamente estable por su entrecruzamiento y muchos de los grupos ácidos, permanecen en la estructura del carbón físico, aún después de su pirólisis. Los grupos ácidos permiten el proceso de adsorción a través de intercambio iónico, a pesar de que presentan una superficie específica despreciable.

Los CAs con mejor desempeño en el proceso de adsorción fueron los activados químicamente, considerando el mejor CarQPS400/25 con una alta superficie específica de  $914 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$ . Este carbón se activó con una baja concentración de  $\text{H}_3\text{PO}_4$  (21.25 %), cuando es comparado con la concentración que se utiliza en la obtención de carbones activados químicamente (85 %), y necesitó bajas cantidades de agua en su proceso de lavado. Además, esta concentración es óptima porque produce suficiente porosidad en todos los polímeros del pañal sin degradar completamente los grupos funcionales orgánicos. Esto permite la formación de porosidad y la adsorción de colorantes ácidos conservando la adsorción de colorantes básicos. CarQPS400/25 presentó porcentajes de remoción mayores al 97 % para los colorantes catiónicos y al menos 73 % de remoción para los colorantes aniónicos.

No obstante, el agua residual textil presenta en su composición no solo colorantes, también contiene otros auxiliares de teñido. A pesar de esta compleja combinación el CarQPS400/25 presentó remociones del 91.6 al 100 %.

Finalmente, se considera que la producción de nuevos materiales adsorbentes a partir de pañales es sustentable y ecológica considerándolos amigables con el medio ambiente. Sustentado en que se obtienen a partir de un residuo que ocupa un volumen significativo en la basura, reduciendo el volumen en

la basura y produciendo nuevos materiales. Los carbones activados físicamente no utilizan ningún reactivo químico en su obtención y pueden adsorber colorantes básicos en porcentajes de hasta 92 %, mientras que los obtenidos con  $\text{H}_3\text{PO}_4$  al 21.25 %, adsorben hasta el 99 % de colorantes ácidos y básicos.

## Referencias

- [1] R. B. Seymour, C. E. Carraher, *Polymer Chemistry*. 7<sup>th</sup> Edition. Florida, U. S. A. CRC Press. 2006.
- [2] É. Hermida, *Polímeros Guía Didáctica*. 1<sup>a</sup> Edición. República Argentina: Colección Encuentro INET, 2011.
- [3] International Union of Pure and Applied Chemistry, *Compendium of Chemical Terminology Gold Book*. Zurich, Suiza, IUPAC. 2012.
- [4] S. L. Reynoso, *Los polímeros plásticos*. 2<sup>a</sup> Edición. CDMX, México, 2019.
- [5] M. Rezakazemi, M. Sadrzadeh, T. Matsuura. Thermally stable polymers for advanced high-performance gas separation membranes, *Progress in Energy and Combustion Science*, 66, (2018) 1 – 41.
- [6] J. A. González Vidal. Efecto del Contenido de Fibra de Vidrio sobre las Propiedades Mecánicas en Probetas de Polibutilentereftalato (PBT) Reforzado (Tesis de ingeniería). Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT), Murcia, España, 2013.
- [7] Todo en polímeros (2021, diciembre 29). Tipos de polímeros [Online]. Disponible: <https://todoenpolimeros.com/tipos-de-polimeros/>
- [8] S. L. Reynoso, *Reciclado de plásticos*. 1<sup>a</sup> Edición. Jalisco. México, 2021.
- [9] Universidad de la Sabana (2017). Todo lo que debe saber de commodities. [Online]. Disponible: <https://www.unisabana.edu.co/portaldenoticias/al-dia/lo-que-debe-saber-de-los-commodities/#:~:text=Los%20commodities%20son%20bienes%20b%C3%A1sicos,nivel%20de%20procesamiento%20y%20utilidad>
- [10] A. Montes Rojas, J. A. Q. Rentería, N. B. J. Chávez, J. G. Ávila Rodríguez, B. Yañez Soto. Influence of anion hydration status on selective properties of a commercial anion exchange with polyaniline deposits. *RSC Adv*, 7, (2017) 25208 – 25219.

- [11] L. Zhang, D. Yi, J. Hao, Poly(diallyldimethylammonium) and polyphosphate polyelectrolyte complex as flame retardant for char-forming epoxy resins, *J Fire Sci*, 38, (2020) 333 – 347.
- [12] Cahesa S. A. Industria química (2017). Polielectrolitos como auxiliares de coagulación [Online]. Disponible: <https://cahesa.com/detalle-novedades.php?id=31>
- [13] M. Caldera Villalobos, A. A. Peláez Cid, A. M. Herrera González. Removal of textile dyes and metallic ions using polyelectrolytes and macroelectrolytes containing sulfonic acid groups, *J Environ Manag*, 177, (2016) 65 – 73.
- [14] Pochteca, Guatemala (2023, Julio 27). Polielectrolitos y su papel en el tratamiento de aguas residuales [Online]. Disponible: <https://guatemala.pochteca.net/polielectrolitos-en-el-tratamiento-de-aguas-residuales/>
- [15] SEMARNAT (2016). Residuos [Online]. Disponible: <https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe18/tema/cap7.html>
- [16] Secretaria de Servicios Parlamentarios (2003, Octubre 08), Ley general para la prevención y gestión integral de los residuos [Online]. Disponible: [https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGPGIR.pdf&ved=2ahUKEwjSoKCY7fCFAXF6skDhQg\\_DRYQFnoECCQQAQ&usg=AOvVaw1-uFuEuhsGYUqjsatDC5l](https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGPGIR.pdf&ved=2ahUKEwjSoKCY7fCFAXF6skDhQg_DRYQFnoECCQQAQ&usg=AOvVaw1-uFuEuhsGYUqjsatDC5l)
- [17] BAHP (2017). Pañales y eliminación de residuos sólidos [Online]. Disponible: <https://www.diaperanswers.org/es/panales-y-el-medio-ambiente/panales-y-eliminacion-de-residuos-solidos/>
- [18] MeuResiduo (2020, diciembre 15). Una visión general de los residuos sólidos en nuestro planeta [Online]. Disponible: <https://www.meuresiduo.com/blog-es/una-vision-general-de-los-residuos-solidos-en-nuestro-planeta/>
- [19] SEMARNAT (2017, enero 10). Residuos Sólidos Urbanos [Online]. Disponible: <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/residuos-solidos-urbanos-rsu>

- [20] SEMARNAT (2020). Diagnostico básico para la gestión integral de los residuos [Online]. Disponible: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/554385/DBGIR-15-mayo-2020.pdf>
- [21] Consejo Nacional de Población (CONAPO) (2012, diciembre). Proyecciones de la población de México 2010 – 2050 [Online]. Disponible: [https://www.conapo.gob.mx/work/models/CONAPO/Resource/1529/2/images/DocumentoMetodologicoProyecciones2010\\_2050.pdf](https://www.conapo.gob.mx/work/models/CONAPO/Resource/1529/2/images/DocumentoMetodologicoProyecciones2010_2050.pdf)
- [22] SEMARNAT (2015). El medio ambiente en México 2013 – 2014, Residuos sólidos urbanos [Online]. Disponible: [https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe\\_resumen14/07\\_residuos/7\\_1\\_1.html](https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe_resumen14/07_residuos/7_1_1.html)
- [23] Partido Verde Ecologista de México (2015, marzo 19). Residuos Sólidos 2012-2015 [Online]. Disponible: <https://www.partidoverde.org.mx/residuos-solidos-2012-2016>
- [24] SEMARNAT (2024). Residuos Sólidos Urbanos: la otra cara de la basura [Online]. Disponible: [www.gob.mx/residuos-solidos](http://www.gob.mx/residuos-solidos)
- [25] Greenpeace (2023, mayo 30). Llenamos al mundo de basura, ¿Y ahora qué? [Online]. Disponible: <https://www.greenpeace.org/colombia/blog/issues/contaminacion/llenamos-al-mundo-de-basura-y-ahora-que/>
- [26] M. Mena (2023, junio 14). Colillas y embaces, los residuos predominantes en las costas [Online]. Disponible: <https://es.statista.com/grafico/30193/objetos-de-basura-recogidos-con-mayor-frecuencia-en-las-costas-a-nivel-global/>
- [27] Gestores de residuos (2020, agosto 01). La clasificación de los plásticos [Online]. Disponible: <https://gestoresderesiduos.org/noticias/la-clasificacion-de-los-plasticos>

- [28] M. S. Opazo (2020, septiembre 02). ¿Sabes cómo clasificar tus plásticos? [Online]. Disponible: <https://www.diariosostenible.cl/noticia/el-dato-sostenible/2020/09/sabes-como-clasificar-tus-plasticos>
- [29] B. Sadeghi, Y. Marfavi, R. AliAkbari, E. Kowsari, F. Borbor Ajdari, S. Ramakrishna, Recent Studies on Recycled PET Fibers: Production and Applications: a Review, *Mater Circular Economy*, 3 (2021) 1 – 18.
- [30] P. Moghaddam Fard, M. Gharavi Alkhansari, Innovative fire and water insulation foam using recycled plastic bags and expanded polystyrene (EPS), *Constr Build Mater*, 305 (2021) 124785.
- [31] Qingling Zhang, Youliang Cheng, Changqing Fangl, Jiayu Shi, Construction of novel regenerated cellulose-based foam derived from waste cigarette filters as effective oil adsorbent, *J Appl Polym Sci*, 139 (2022) 51900.
- [32] M. Velasco Pérez, P. X. Sotelo Navarro, A. Vázquez Morillas, R. M. Espinosa Valdemar, A. Hermoso López, Waste management and environmental impact of absorbent hygiene products: A review. *Waste Manage Res*, 39 (2021) 767 – 783.
- [33] D. Cano (2010, agosto 24). Salud 180 [Online]. Disponible: <https://www.salud180.com/salud-dia-dia/crece-en-mexico-uso-de-panales-desechables>
- [34] Huggies (2024). Descubre de que están hechos los pañales [Online]. Disponible: <https://www.huggies.com.mx/consejos/descubre-de-que-estan-hechos-los-panales/>
- [35] Dodot (2020, Octubre 27). ¿Qué contiene el pañal de mi bebe? [Online]. Disponible: <https://www.dodot.es/seguridad-y-compromiso/calidad-y-seguridad/articulo/que-contiene-el-panal-de-mi-bebe>
- [36] A. Esponda. Arranque de un sistema experimental de flujo vertical a escala piloto de tipo humedal artificial para el tratamiento de aguas residuales (Tesis de Licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), México, 2001.

- [37] A. Ortiz, M. J. García Galán, J. García, R. Díez Montero, Optimization and operation of a demonstrative full scale microalgae harvesting unit based on coagulation, flocculation and sedimentation, *Separation and Purification Technology*, 259 (2021) 118171.
- [38] M. Romero Aguilar, A. Colín Cruz, E. Sánchez Salinas, M. L. Ortiz Hernández, Tratamiento de aguas residuales por un sistema piloto de humedales artificiales: evaluación de la remoción de la carga orgánica, *Int Contam Ambient*, 25 (2009) 157-167.
- [39] A. M. Herrera González, A. A. Peláez Cid, M. Caldera Villalobos, Adsorption of textile dyes using an activated carbon and crosslinked polyvinyl phosphonic acid composite, *J. Environ Manage*, 234 (2019) 237-244.
- [40] A. A. Peláez Cid, A. M. Herrera González, A. Bautista Hernández, M. Salazar Villanueva, Preparation and characterization of activated carbon from Agave tequilana Weber for the removal of textile dyes and heavy metals, *Desalin Water Treat*, 57 (2016) 21105 - 21117.
- [41] A. A. Peláez Cid, V. Hernández Romero, A. M. Herrera González, A. Bautista Hernández, O. Coreño Alonso, Synthesis of activated carbons from black sapote seeds, characterization and application in the elimination of heavy metals and textile dyes. *Chin J Chem Eng*, 28 (2020) 613 - 623.
- [42] C. R. Holkar, A. J. Jadhav, D. J. Pinjari, N. M. Mahamuni, A. B. Pandit, A critical review on textile wastewater treatments: Possible approaches, *J Environ Manage*, 182 (2016) 351 - 366.
- [43] E. J. Gilbert, Química Textil, *Tomo II. Materias Colorantes*, 1ª edición, España: Universidad Politecnica de Valencia (UPV), 2003.
- [44] Cuaderno de apuntes de química textil y colorantes, Colegio textil, Facultad de ingeniería, BUAP, 2017.



- [45] A. A. Peláez Cid, S. Blasco Sancho, F. Michael Matysik, Determination of textile dyes by means of non-aqueous capillary with electrochemical detection, *Talanta* 75 (2008) 1362 – 1368.
- [46] F. E. Lockuán Lavado, *La industria textil y su control de calidad V. Tintorería*, Portugal: Creative Commons, 2012.
- [47] J. Kerry, W. Hand, J. Crittenden, R. Trussell, G. Tchobanoglous, *Principios de tratamiento del agua*, México (UAM) Ed. CENGAGE, 2012.
- [48] A. A. Peláez Cid, A. Vázquez Barranco, A. M. Herrera González, Elimination of Dyes Present in Textile Industry Wastewater Using Adsorbent Materials Prepared from Brocoli Stem, *Adv Mater Res*, 976 (2014) 207 – 211.
- [49] V. Maldonado Yactayo, *Manual I: teoría sedimentación, capítulo 7*, Serie Filtración Rápida, consulta mayo 2024.
- [50] Madri+d blogs (2010, septiembre 17). Tratamiento electroquímico de aguas residuales [Online]. Disponible: <https://www.madrimasd.org/blogs/remtavares/2010/09/17/131491>
- [51] O. Scialdone, F. Proietto, A. Galia, Electrochemical production and use of chlorinated oxidants for the treatment of wastewater contaminated by organic pollutants and disinfection, *Curr Opin in Electrochem*, 27 (2021) 100682.
- [52] TELWESA (2021, diciembre 22). Tipos de tratamientos biológicos para aguas residuales [Online]. Disponible: <https://telwesa.com/tipos-de-tratamientos-biologicos-para-aguas-residuales/>
- [53] E. J. Gilbert, Química Textil, *Tomo I. Materias Textiles*, 1ª edición, España: Universidad Politécnica de Valencia (UPV), 2002.
- [54] M. Caldera Villalobos, A. A. Peláez Cid, M. A. Martins Alho, A. M. Herrera-González, Removal of dyes in wastewater using polyelectrolytes containing tetrazole groups, *Korean J Chem Eng* 35 (2018) 2394 – 2402.

- [55] M. P. Elizalde González, J. Mattusch, A. A. Peláez Cid, R. Wennrich, Characterization of adsorbent materials prepared from avocado kernel sedes: Natural, activated and carbonized forms, *J Anal Appl Pyrolysis* 78, 1 (2007) 185 - 193.
- [56] M. A. Álvarez Merino, F. Carrasco Marín. *Aplicaciones de adsorbentes y catalizadores en procesos medioambientales y energéticos*. Universidad Internacional de Andalucía, 2016.
- [57] V. Hernández Montoya, A. Bonilla Petriciolet, *Lignocellulosic Precursors Used in the Synthesis of Activated Carbon -Characterization Techniques and Applications in the Wastewater Treatment*, Croatia: Edición InTech. 2012.
- [58] A. A. Peláez Cid, MA. Tlalpa Galán, A. M. Herrera González, Carbonaceous material production from vegetable residue and their use in the removal of textile dyes present in wastewater, *Mater Sci Eng*, 45 (2013) 012023.
- [59] J. Rouquerol, D. Avnir, C. W. Fairbridge, D. H. Everett, J. H. Haynes, N. Pernicone, J. D. F. Ramsay, K. S. W. Sing, K. K. Unger, Recommendations for the characterization of porous solids, *Pure Appl Chem*, 66 (1994) 1739-1758.
- [60] M. P. Elizalde González, W. Geyer, M. R. G. Guevara Villa, J. Mattusch, A. A. Peláez Cid, R. Wennrich, Characterization of an adsorbent prepared from maize waste and adsorption of three classes of textile dyes, *Colloids Surf, A*, 278 (2006) 89 – 97.
- [61] J. Torres Pérez, P. N. López Téllez Girón, A. Y. Corral Avitia, K. A. Carrasco Urrutia, M. Delgado Rios, Preparation of activated carbon from Zea mays waste for tartrazine removal, *CULCyT*, 17 (2020) 1 – 10.
- [62] A. A. Peláez Cid, D. L. López Hernández, E. Gómez Merino y A. M. Herrera González, Síntesis de carbones activados con semillas de chirimoya y su aplicación en la adsorción de colorantes textiles, *Rev Int Contam Ambie*, 40 (2024) 263-278.
- [63] F. J. Garzón López, I. Fernández Morales, M. Domingo García, M. J. Pérez Mendoza, M. C. Almazán Almazán. *Proceso de producción de carbón activo a partir*

*de residuos de pet.* Solicitud internacional publicada en virtud del tratado de cooperación en materia de patentes. Universidad de Granada, 2007.

[64] J. Choma, M. Marszewski, L. Osuchowski, J. Jagiello, A. Dziura, M. Jaroniec, Adsorption properties of activated carbons prepared from waste CDs and DVDs, *ACS Sustainable Chem Eng*, 3 (2015) 733 - 742.

[65] M. Adame Pereira, M. Alexandre Franco, C. Fernández González, V. Gómez Serrano, Preparación de carbón activado a partir de materiales poliméricos de desecho de gomas y plásticos, *Boletín del Grupo Español del Carbón*, 59 (2021) 20 - 24.

[66] M. Udayakumar, B. Mrabate, T. Koós, K. Szemmelveisz, F. Kristály, M. Leskó, A. Filep, R. Géber, M. Schabikowski, P. Baumli, J. Lakatos, P. Tóth, Z. Németh Synthesis of activated carbon foams with high specific surface area using polyurethane elastomer templates for effective removal of methylene blue, *Arabian J Chem*, 14 (2021) 103214.

[67] G. San Miguel, G. D. Fowler, C. J. Sollars, A study of the characteristics of activated carbons produced by steam and carbon dioxide activation of waste tyre rubber, *Carbon*, 41 (2003) 1009 – 1016.

[68] J. Serafin, J. Srenscek Nazzal, A. Kaminska, O. Paszkiewicz, B. Michalkiewicz, Management of surgical mask waste to activated carbons for CO<sub>2</sub> capture, *J CO<sub>2</sub> Util*, 59 (2022) 101970.

[69] S. Sert, S.S.Gultekin, B. Gültekin, D. Duran Kaya, A. Körlü, A Facile Approach to Produce Activated Carbon from Waste Textiles via Self-Purging Microwave Pyrolysis and FeCl<sub>3</sub> Activation for Electromagnetic Shielding Applications, *Polym*, 16 (2024) 915.

[70] A. M. Herrera González, N. Trejo Carbajal, M. C. Reyes Angeles, R. Monroy Galindo, A. A. Peláez Cid, Activated carbon cellulose acetate based as effective adsorbent of contaminants from water, *Colloids Surf A*, 694 (2024) 134146.

- [71] How polymer work (2003). Polyacrylate Basics [Online]. Disponible: <https://pslc.ws/macrog/acrylate.htm>
- [72] M. Faraldos, C. Goberna, *Técnicas de análisis y caracterización de materiales*. 2ª edición, Madrid: Biblioteca de ciencias, 2011.
- [73] G. Cruz Cerro, C. Canepa La Cotera, D. Aguirre, Producción y caracterización de carbones activados a partir de residuos agroindustriales, *Rev Manglar* 10 (2013) 17 - 25.
- [74] E. I. Coca-González. Obtención de carbón activado a partir de acetato de celulosa de colillas de cigarro. (Tesis de licenciatura) Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (UAEH), Hidalgo, México, 2020.
- [75] C. Caicedo, A. Vázquez Arce, L. Marcela Crespo, H. De la Cruz, O. Hernán Ossa, Material compuesto de matriz polipropileno (PP) y fibra de cedro: influencia del compatibilizante PP-g-MA, *Informador Técnico*, 79 (2015) 118-126.
- [76] J. J. Maurer, D. J. Eustace, C. T. Ratcliffe, Thermal Characterization of Poly(acrylic acid). *Macromol*, 20 (1987) 196-202.
- [77] K. Nakanishi, P. H. Solomon, *Infrared Absorption Spectroscopy*, 2<sup>nd</sup> edition, 1977.

# Anexos

## Anexo 1. Rampas de calentamiento de los carbones activados físicos

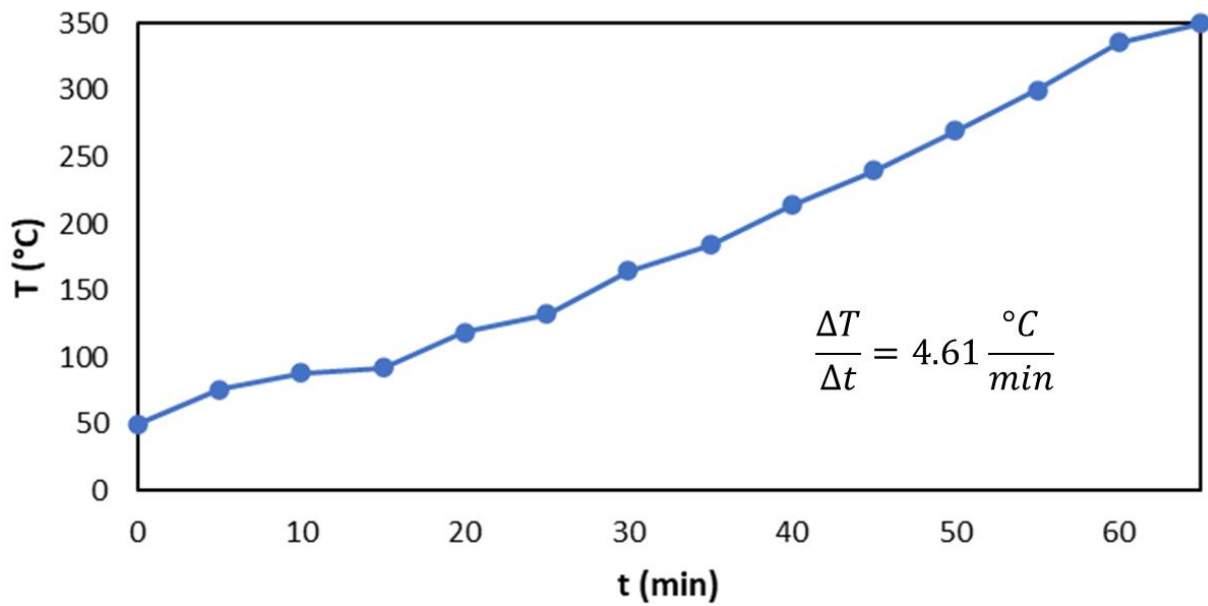


Figura A1.1. Rampa de calentamiento de CarFPS350.

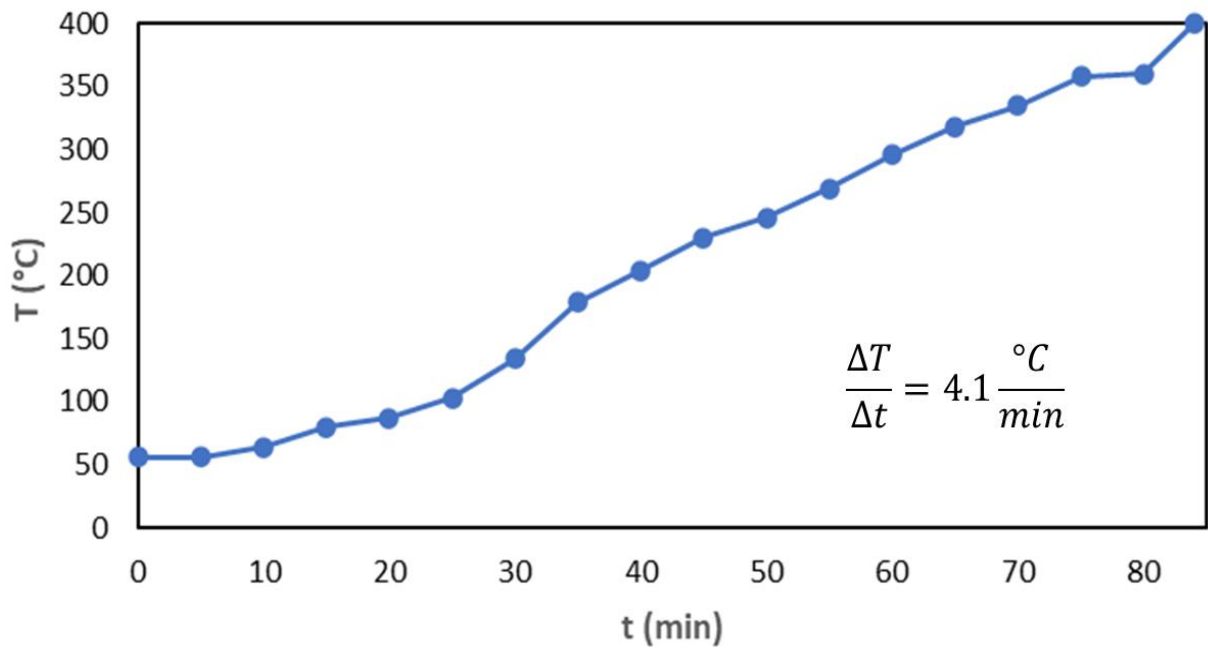


Figura A1.2. Rampa de calentamiento de CarFPS400.

## Anexo 2. Rampas de calentamiento de los carbones activados químicos

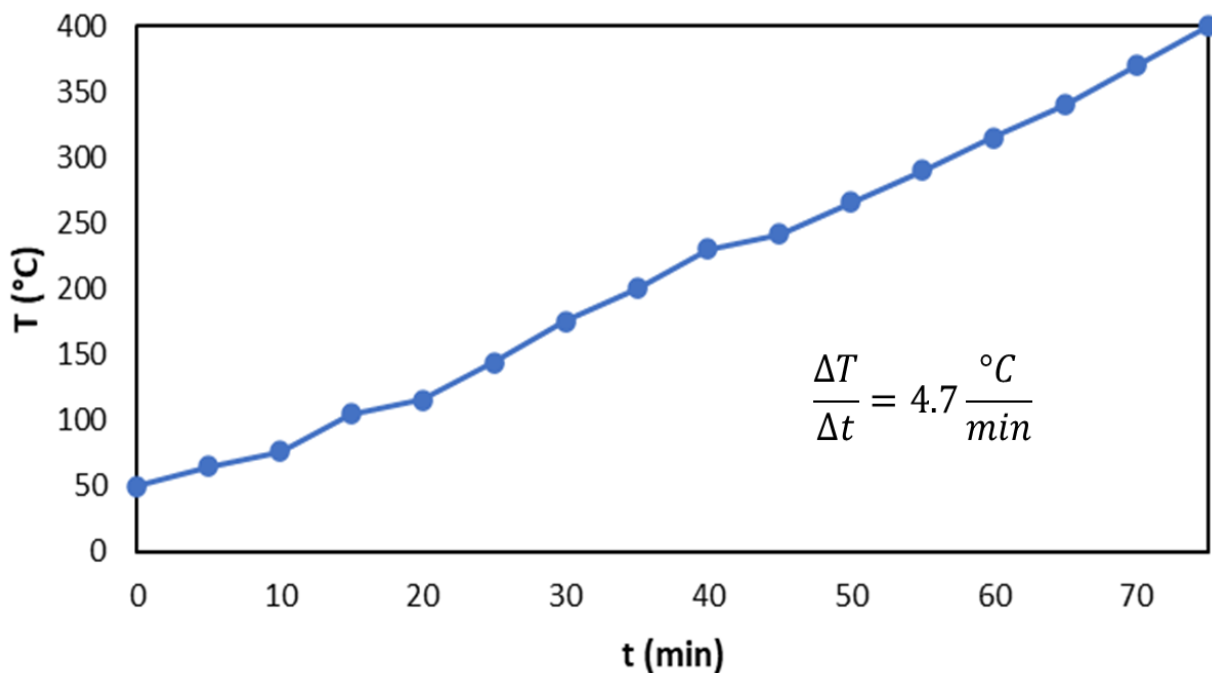


Figura A2.1. Rampa de calentamiento de CarQPS400.

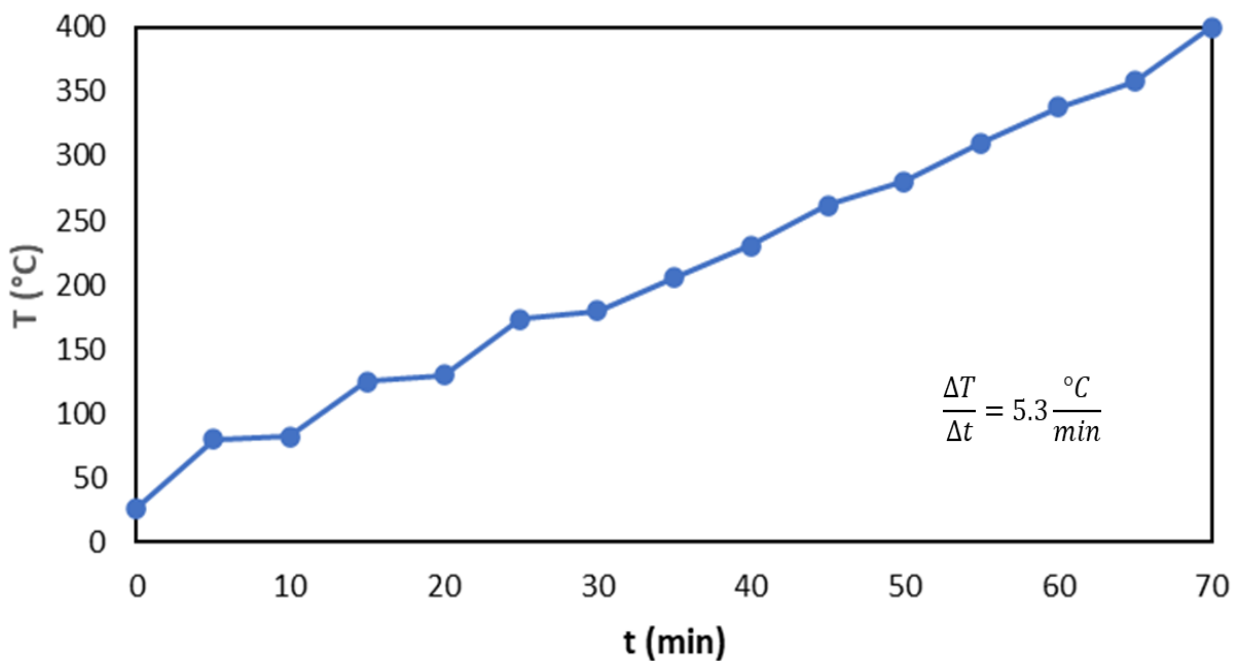


Figura A2.2. Rampa de calentamiento de CarQPS400/50.

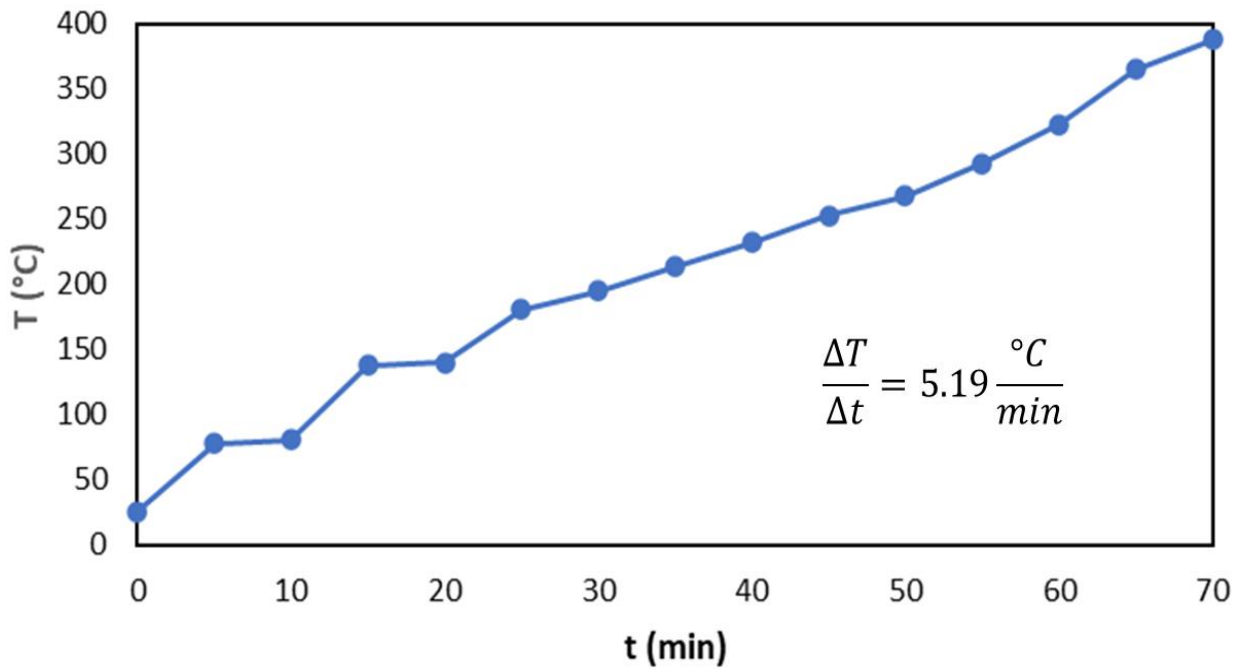


Figura A2.3. Rampa de calentamiento de CarQPS400/10.

### Anexo 3. Termogramas de TGA

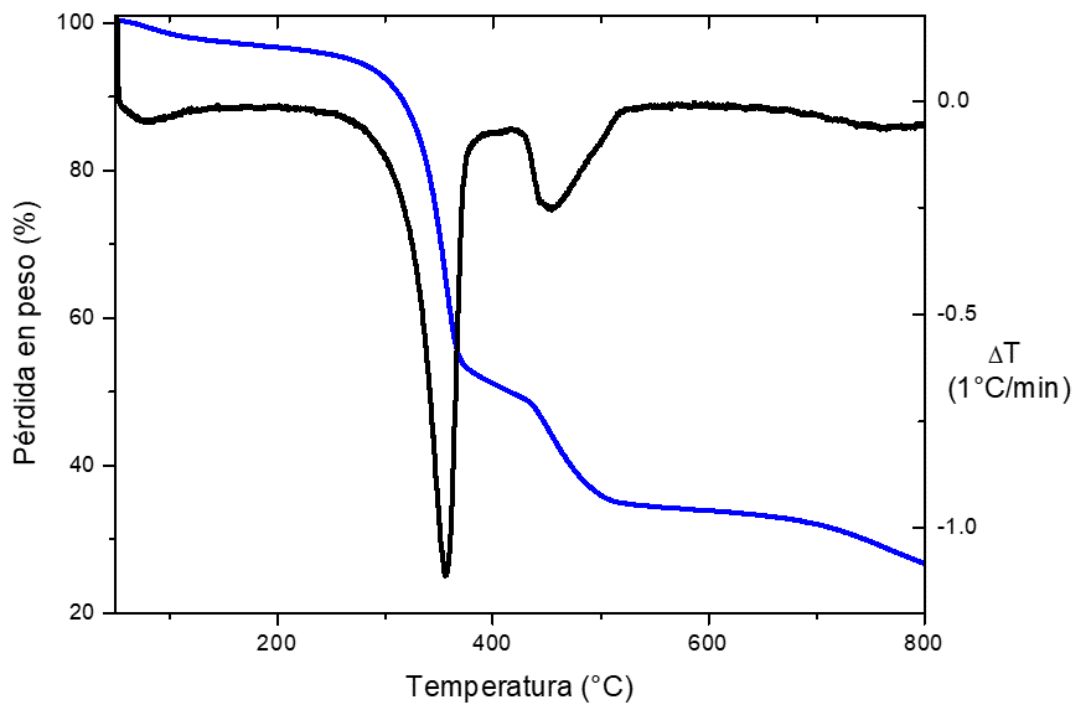


Figura A3.1. Termograma y primera derivada del pañal limpio.



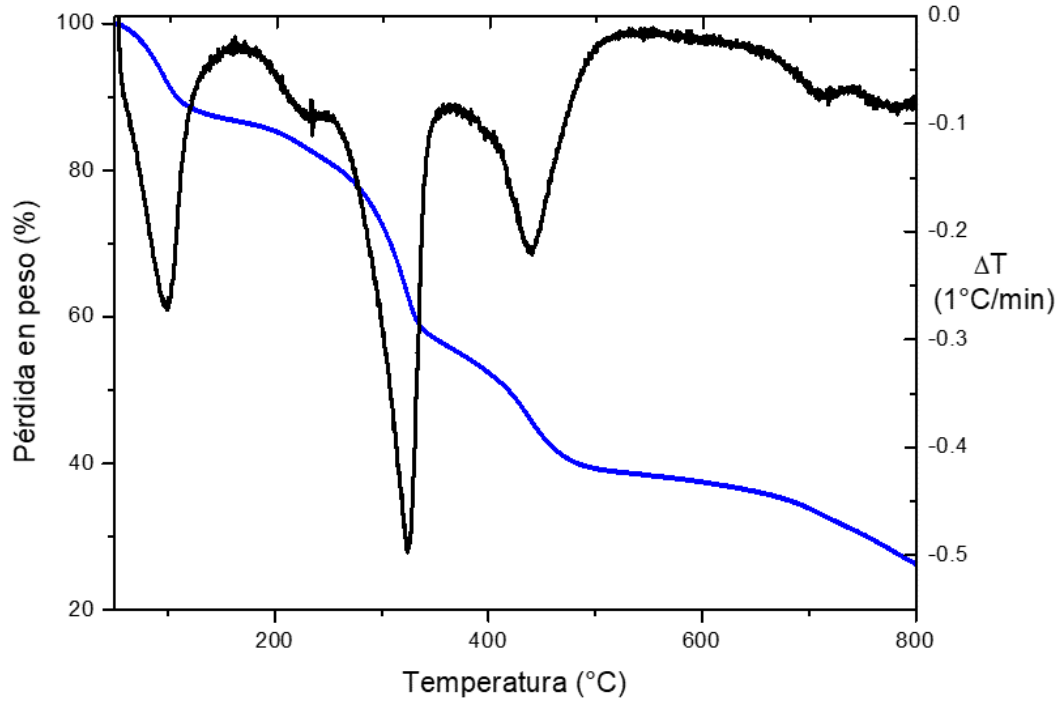


Figura A3.2. Termograma y primera derivada del pañal sucio.

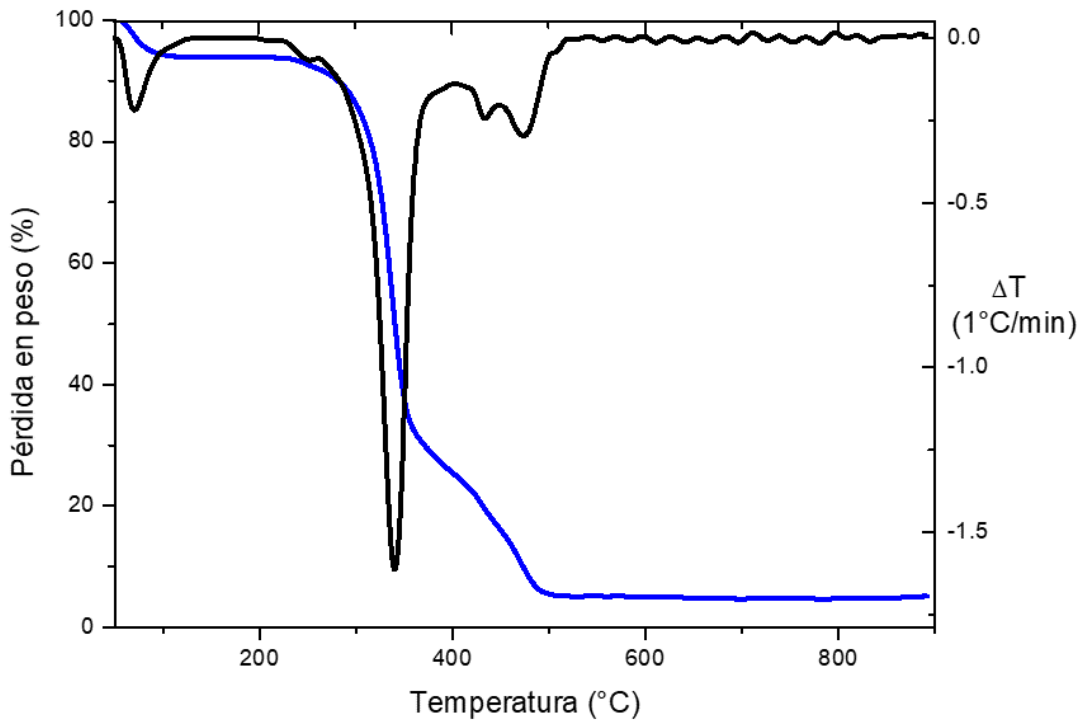


Figura A3.3. Termograma y primera derivada del relleno.

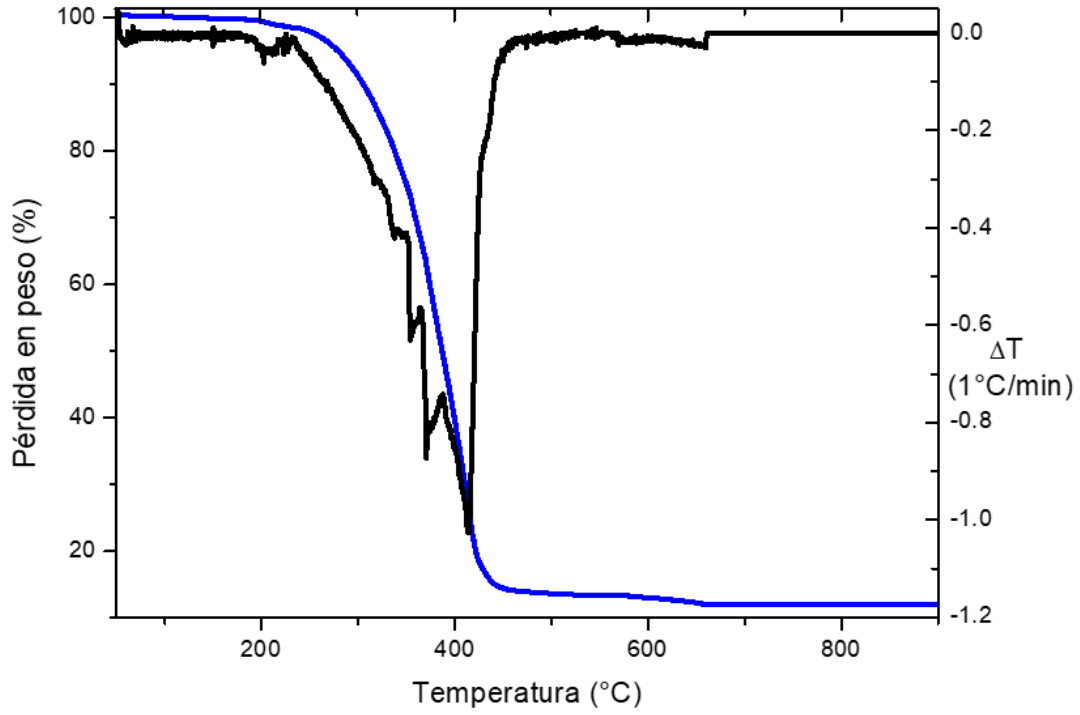


Figura A3.4. Termograma y primera derivada de cubierta.

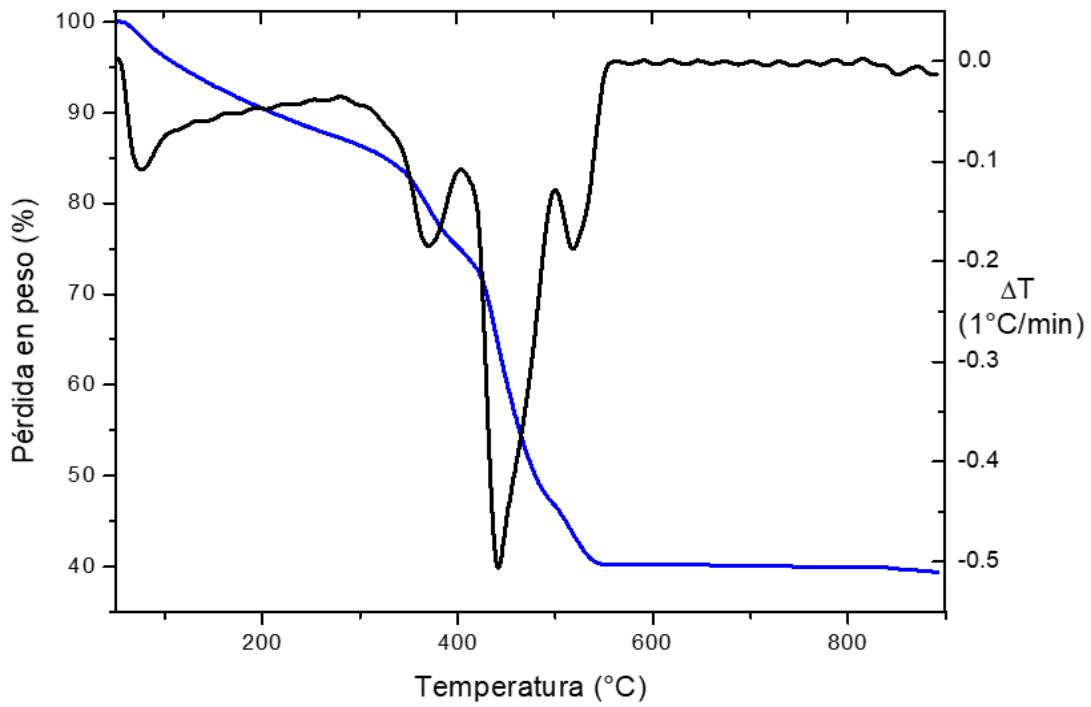


Figura A3.5. Termograma y primera derivada de super absorbente.

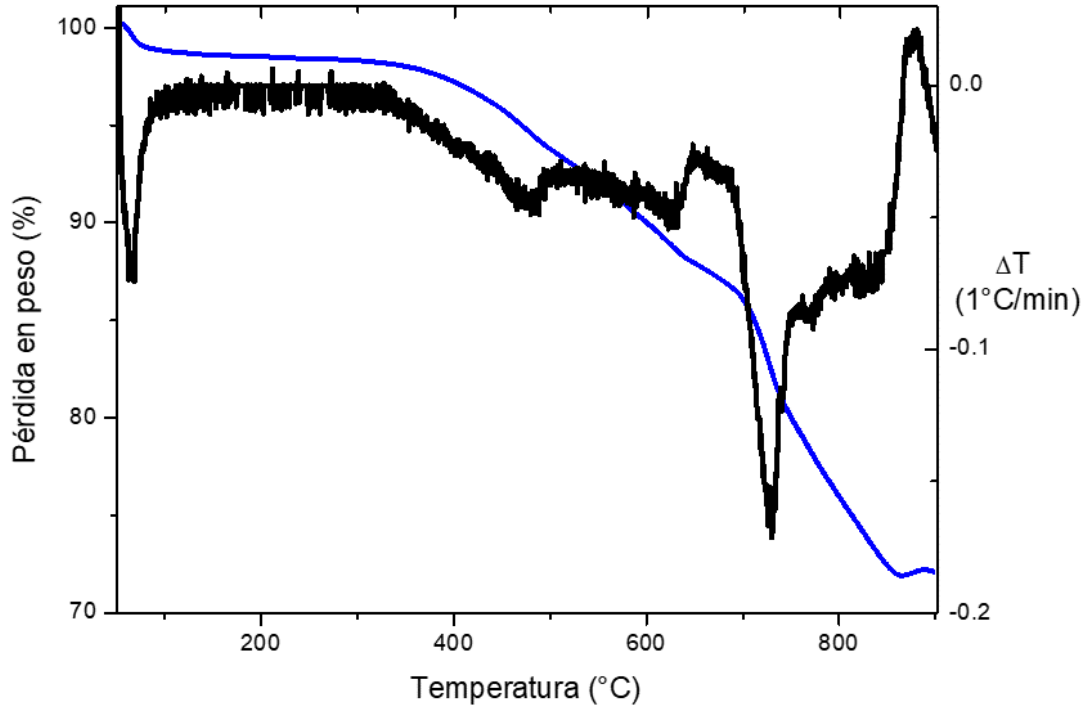


Figura A3.6. Termograma y primera derivada de CarFPS400.

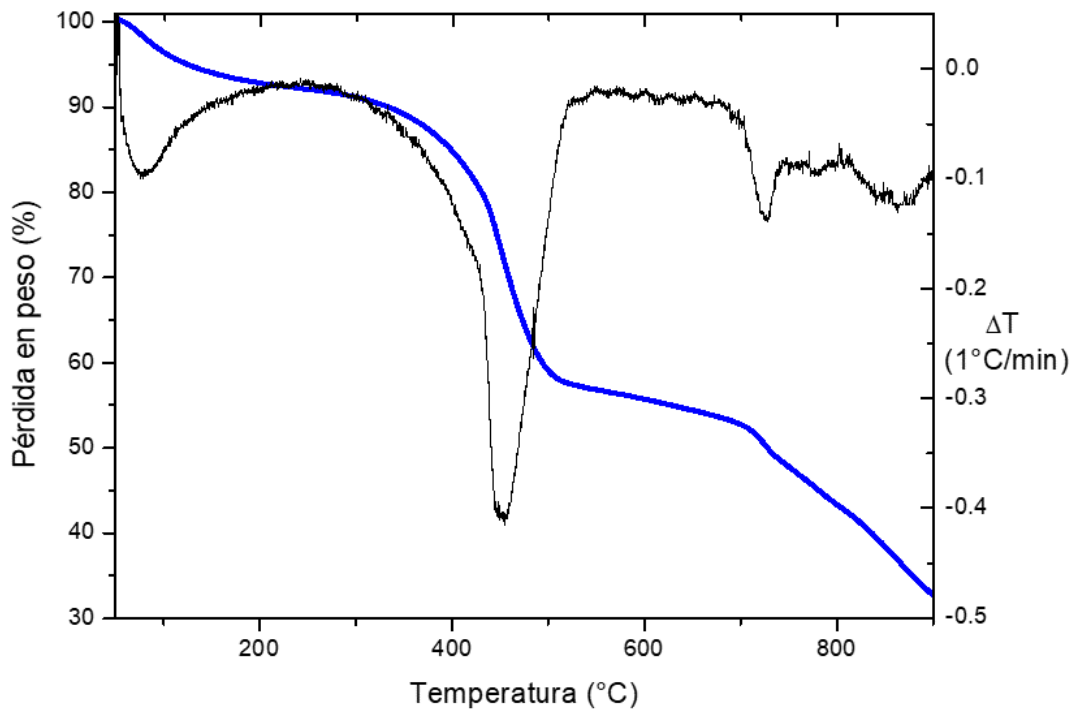


Figura A3.7. Termograma y primera derivada de CarFPS350.

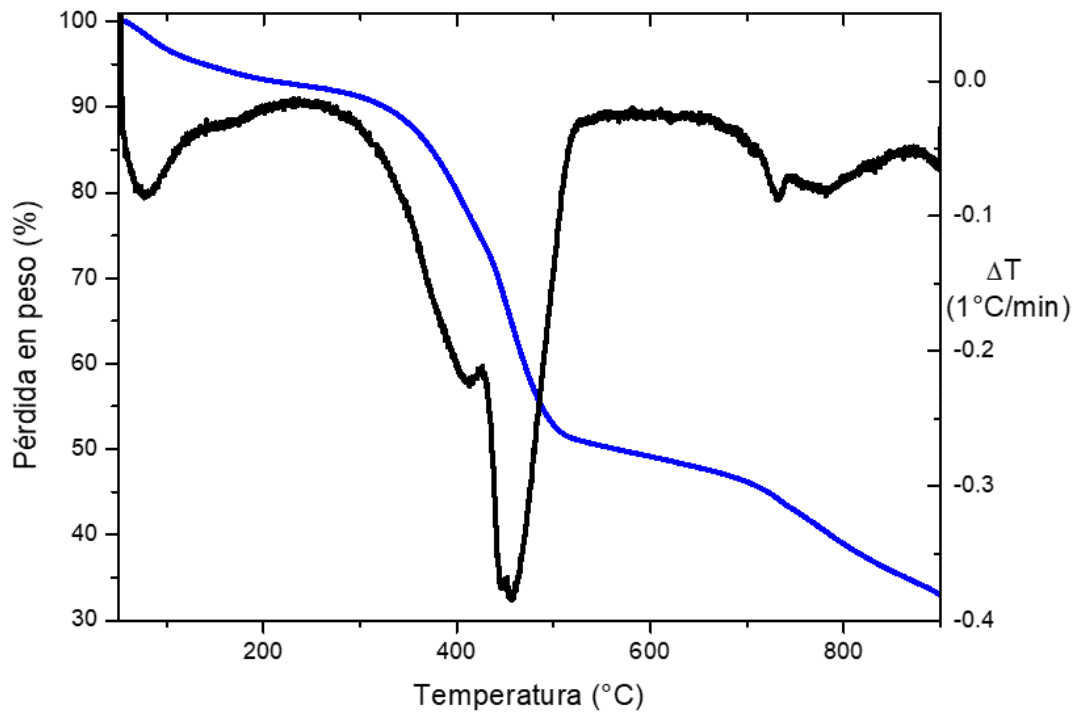


Figura A3.8. Termograma y primera derivada de CarFPS300.

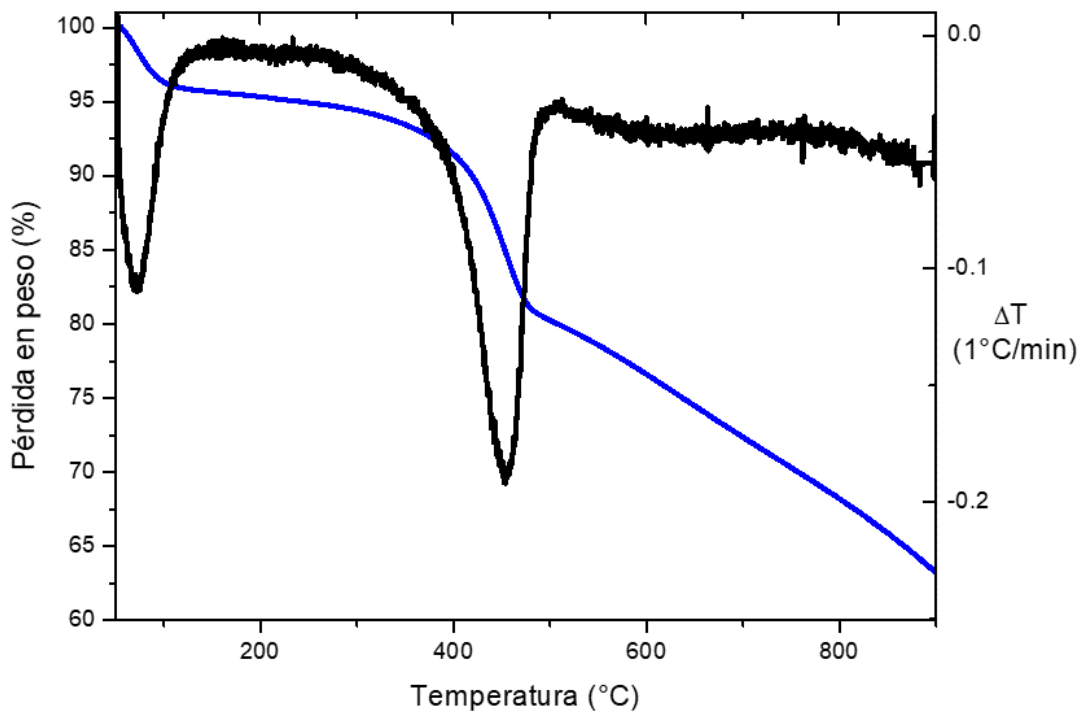


Figura A3.9. Termograma y primera derivada de CarQPS400.

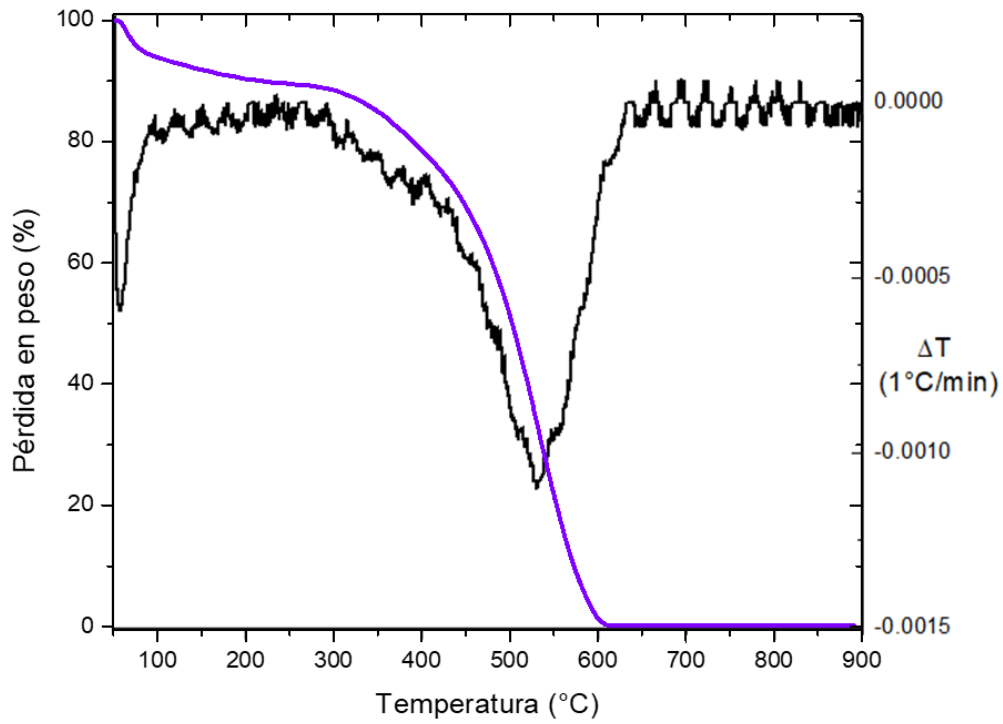


Figura A3.10. Termograma y primera derivada de CarQPS400/50.

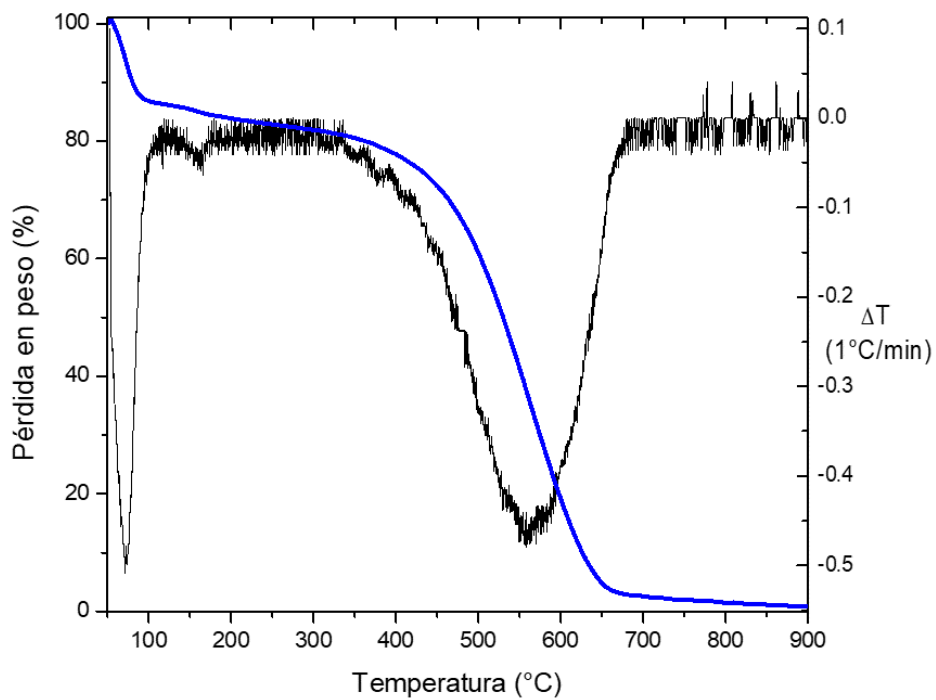


Figura A3.11. Termograma y primera derivada de CarQPS400/25.

#### Anexo 4. Termogramas de DSC

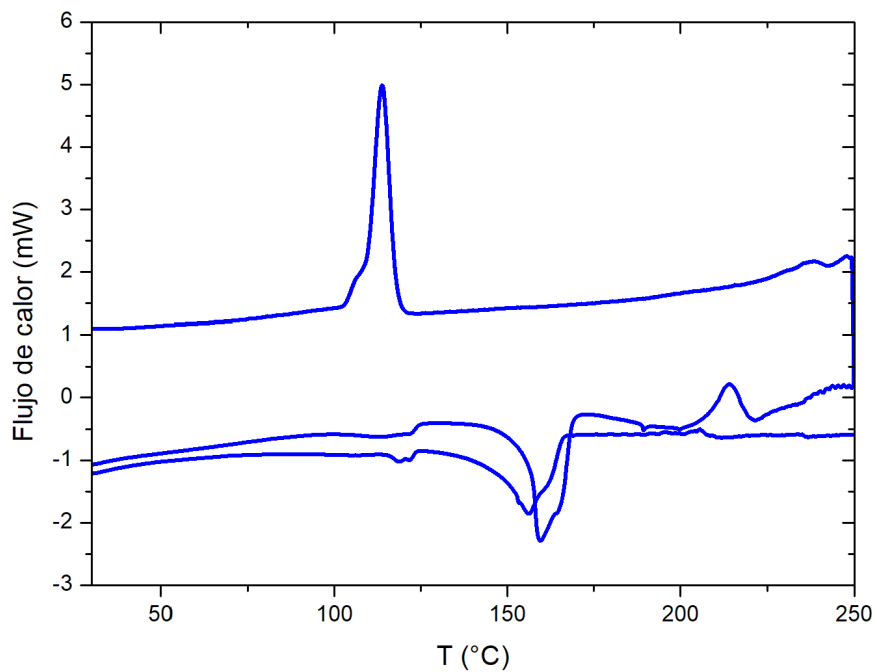


Figura A4.1. Termograma de DSC de calentamiento y enfriamiento de cubierta del pañal.

#### Anexo 5. Micrografías de SEM de carbones activados

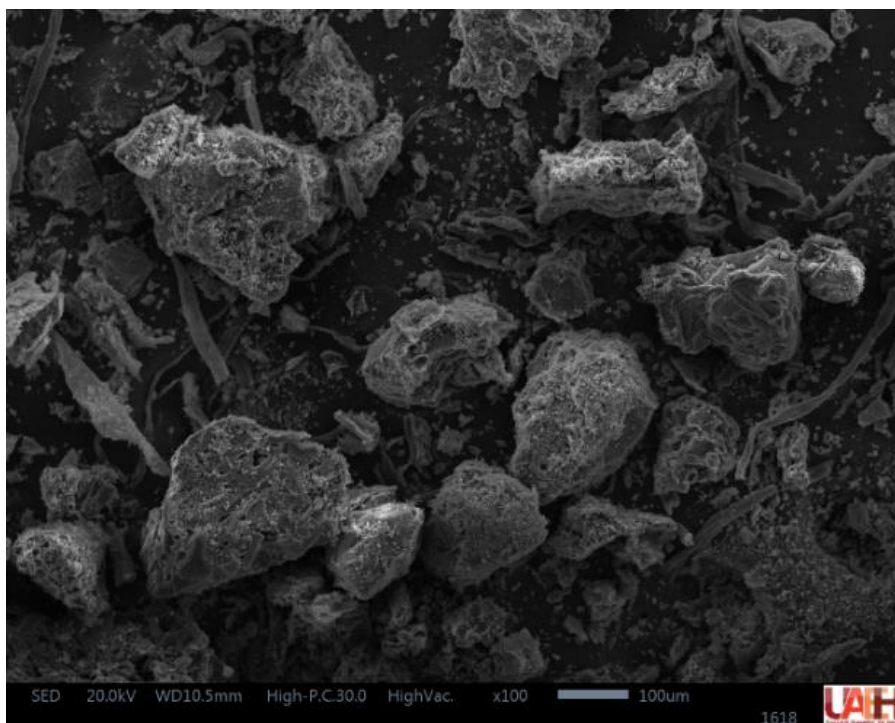


Figura A5.1. Micrografía de SEM a X100 de CarFPS400.

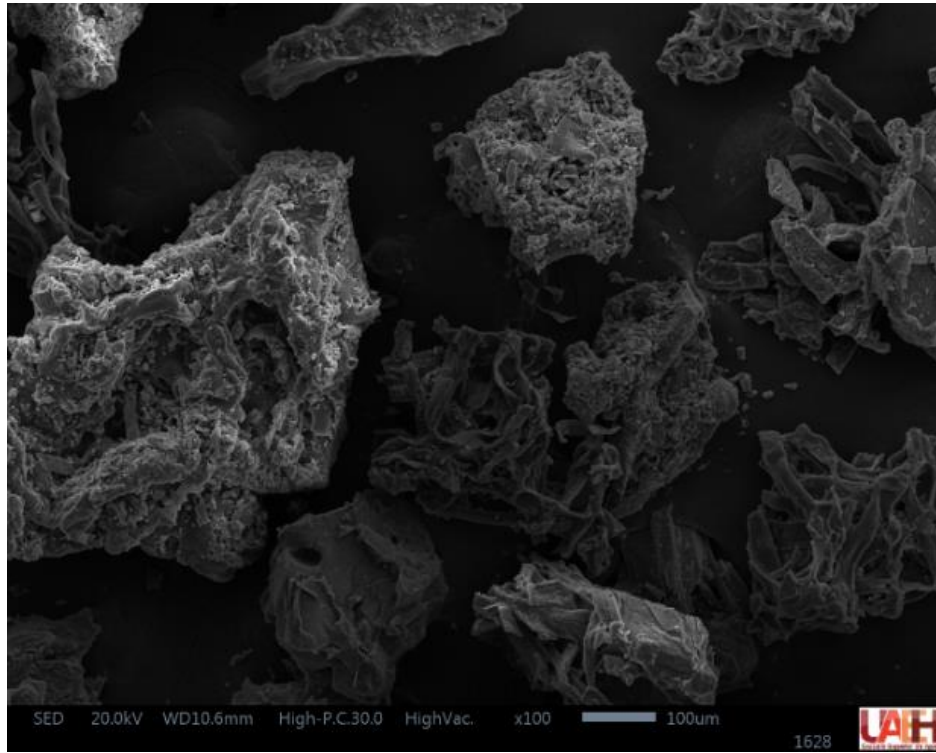


Figura A5.2. Micrografía de SEM a X100 de CarFPS350.

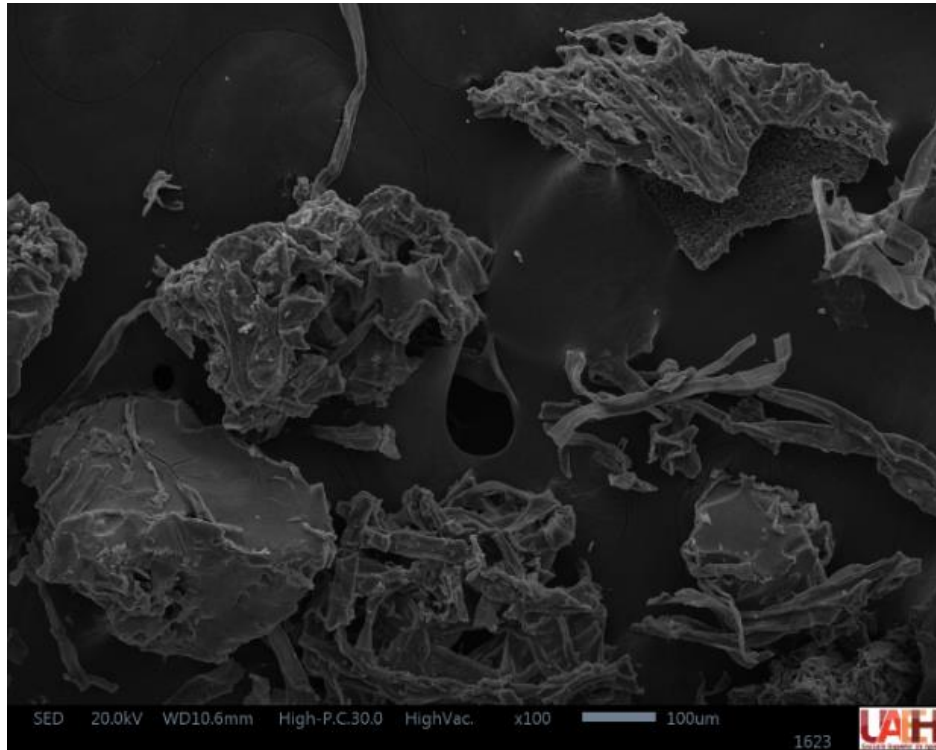


Figura A5.3. Micrografía de SEM a X100 de CarFPS300.



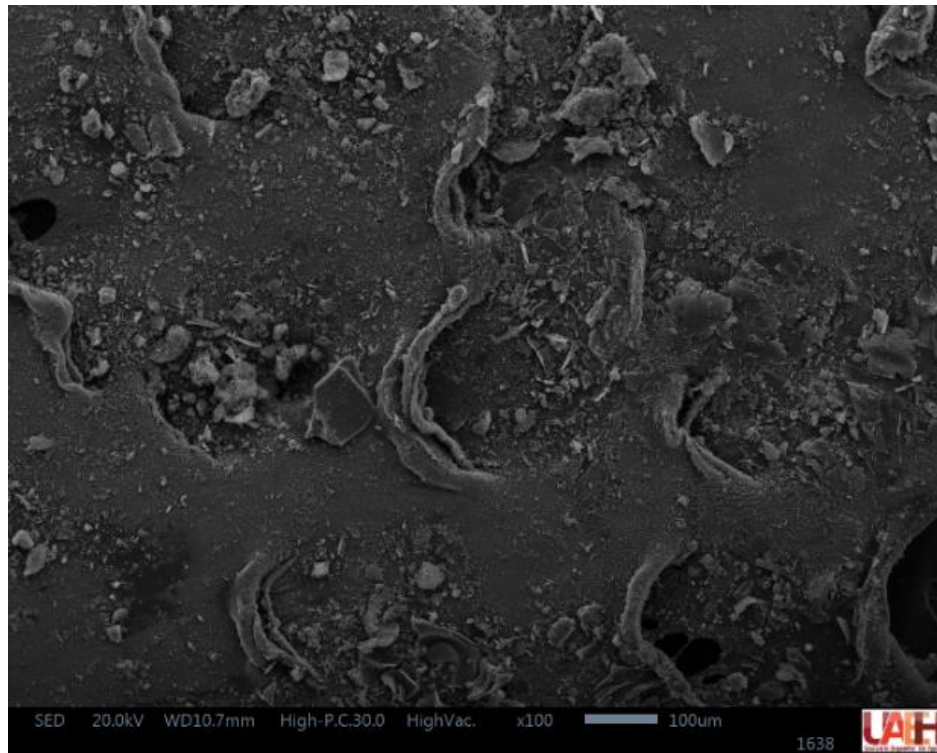


Figura A5.4. Micrografía de SEM a X100 de CarQPS400.

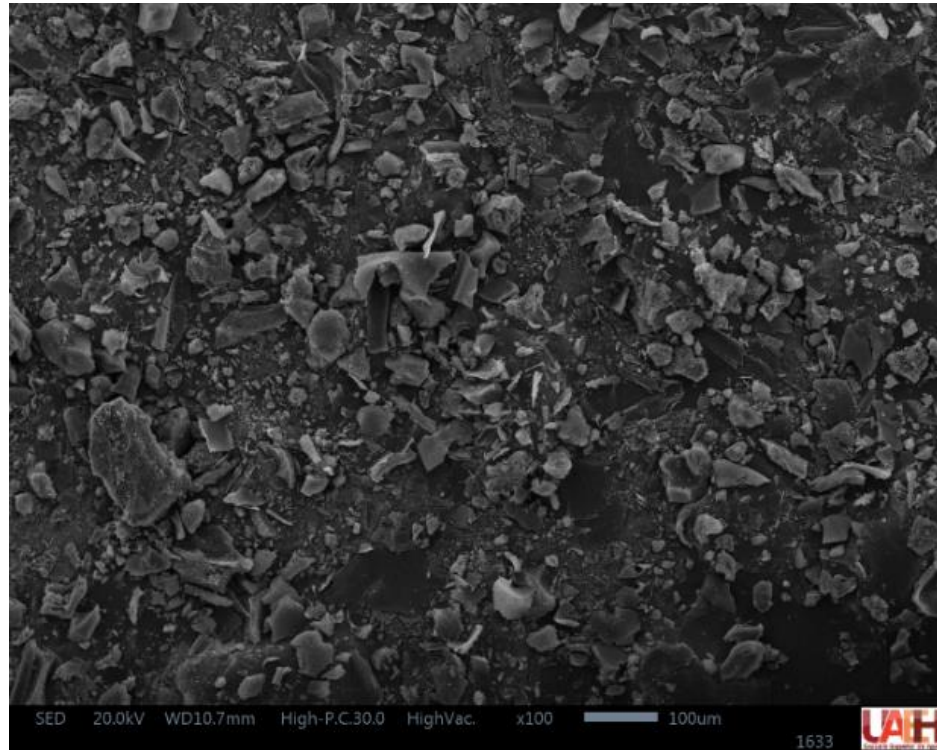


Figura A5.5. Micrografía de SEM a X100 de CarQPS400/50.



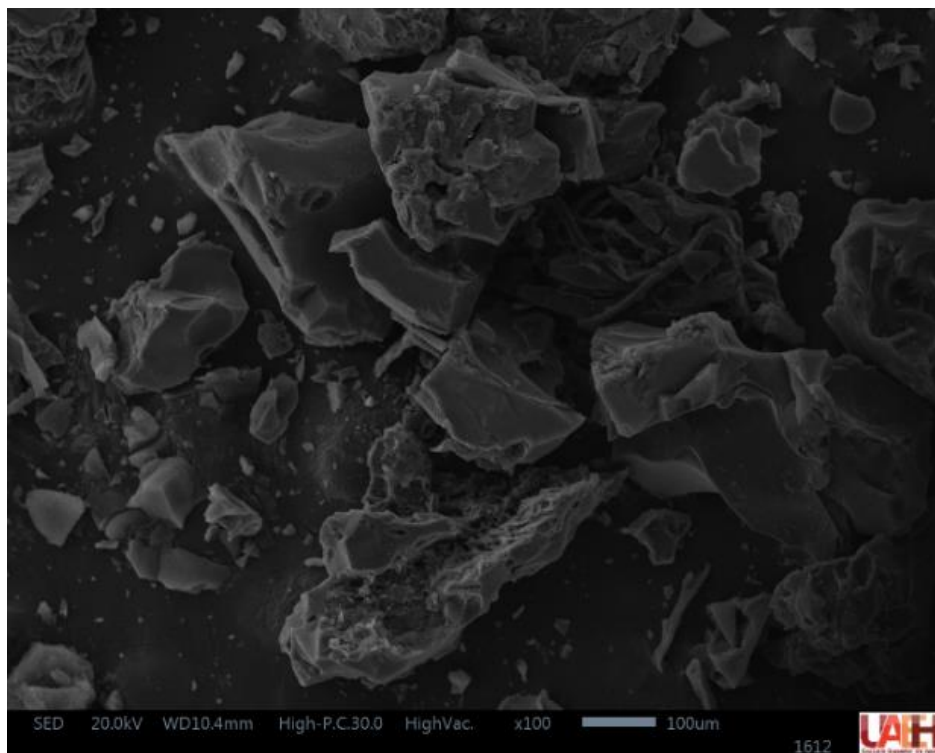


Figura A5.6. Micrografía de SEM a X100 de CarQPS400/25.

**Anexo 6. Isotermas de adsorción – desorción de N<sub>2</sub>.**

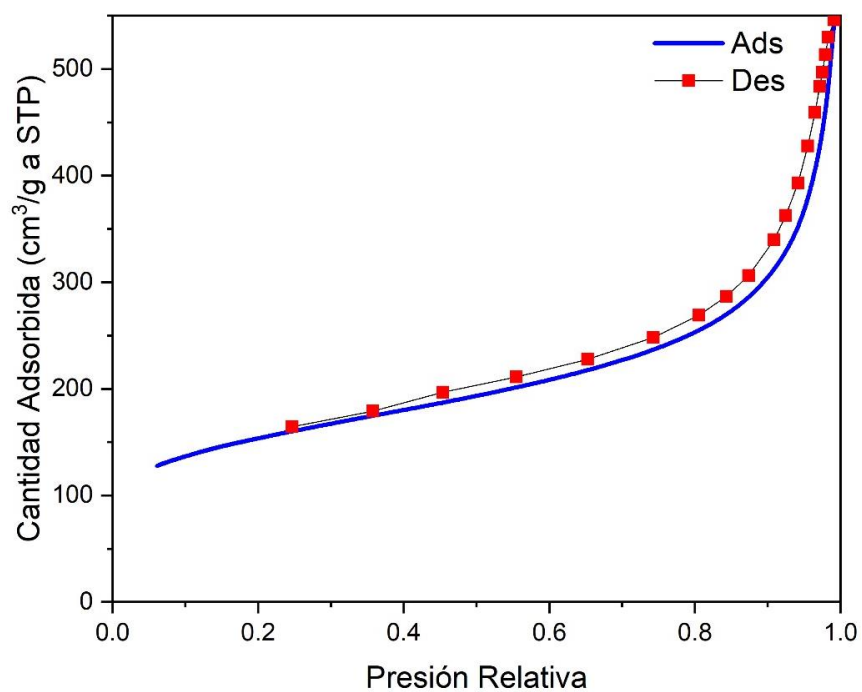


Figura A6.1. Isotherma de adsorción-desorción de N<sub>2</sub> para CarQPS400.

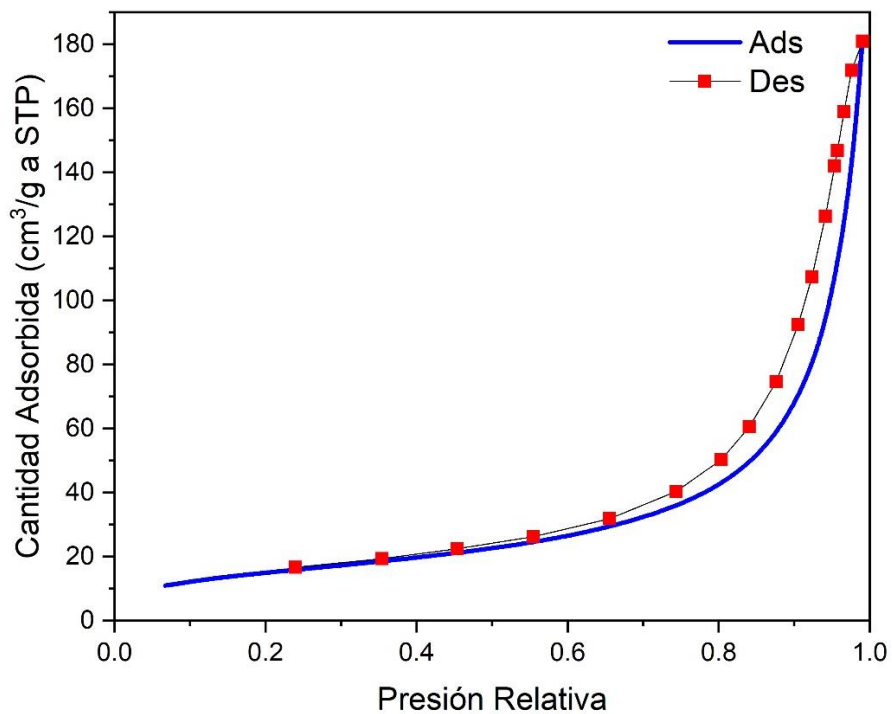


Figura A6.2. Isotherma de adsorción-desorción de N<sub>2</sub> para CarQPS400/50.

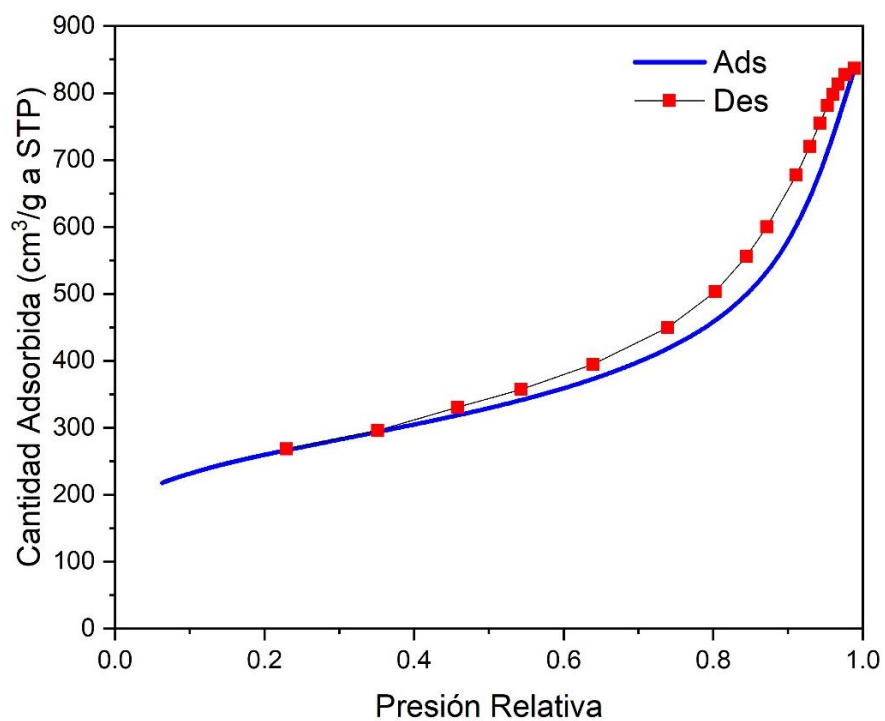


Figura A6.3. Isotherma de adsorción-desorción de N<sub>2</sub> para CarQPS400/25.

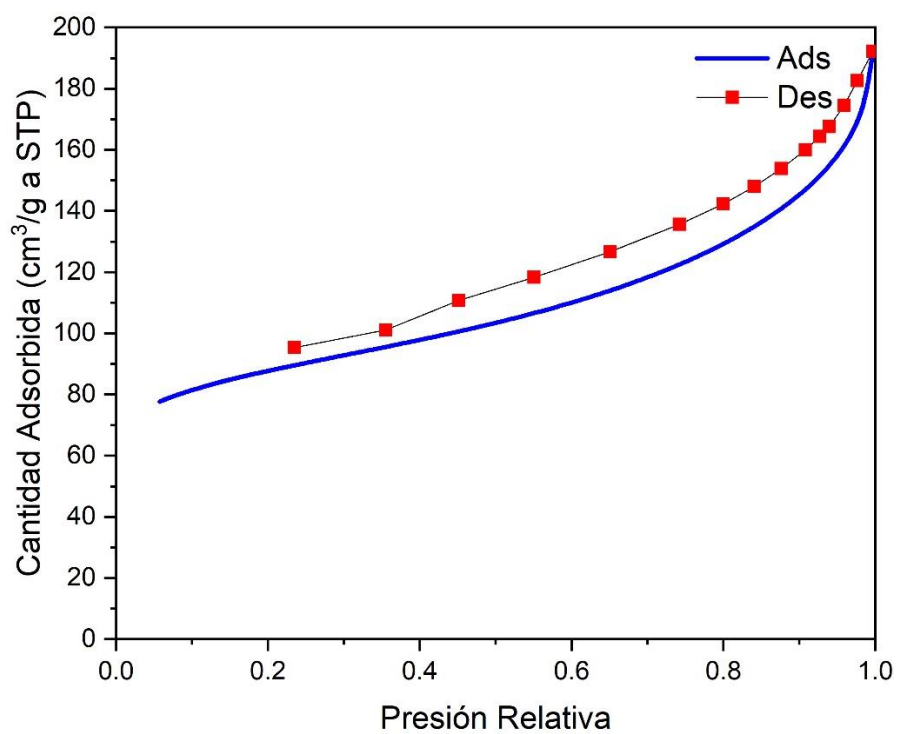


Figura A6.4. Isotherma de adsorción-desorción de N<sub>2</sub> para CarQPS400/10.

### Anexo 7. Adsorción estática

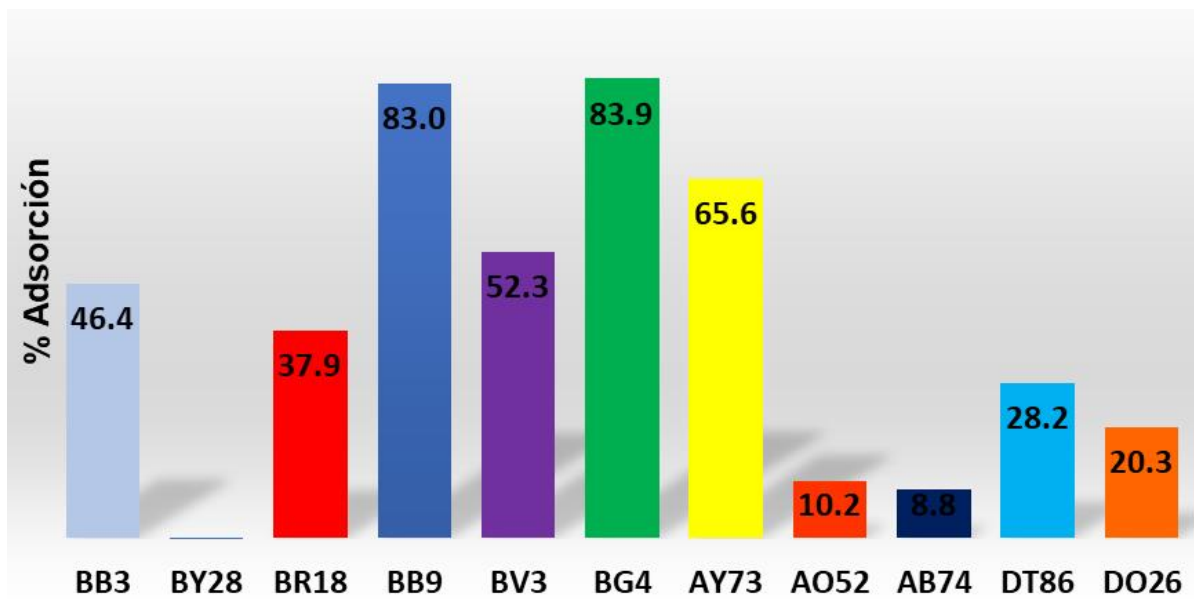


Figura A7.1. Adsorción estática sobre CarFPS350.

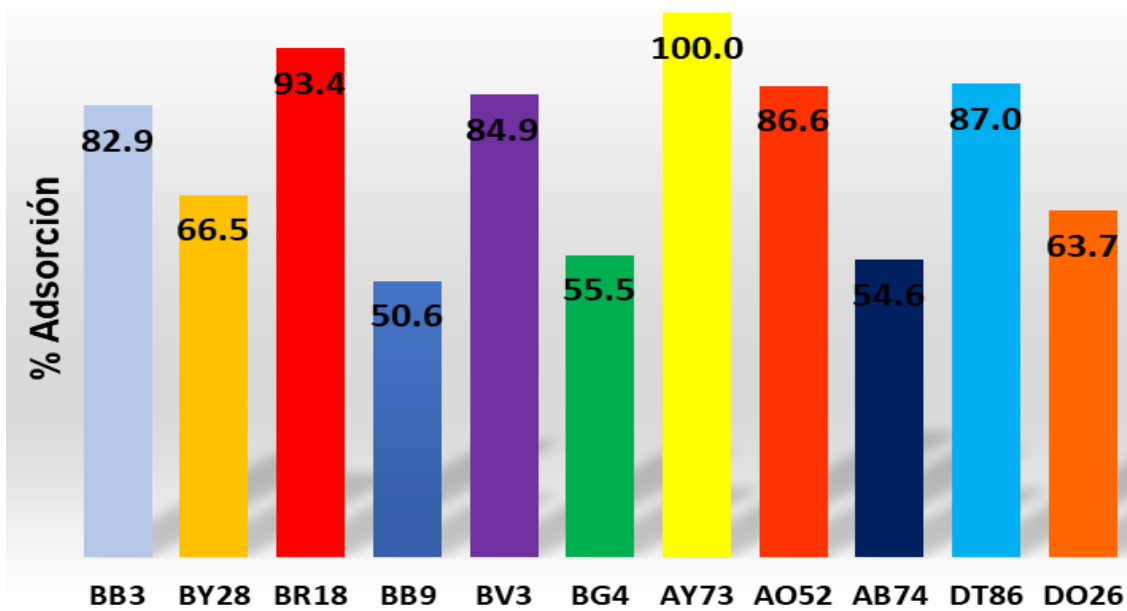


Figura A7.2. Adsorción estática sobre CarQPS400.

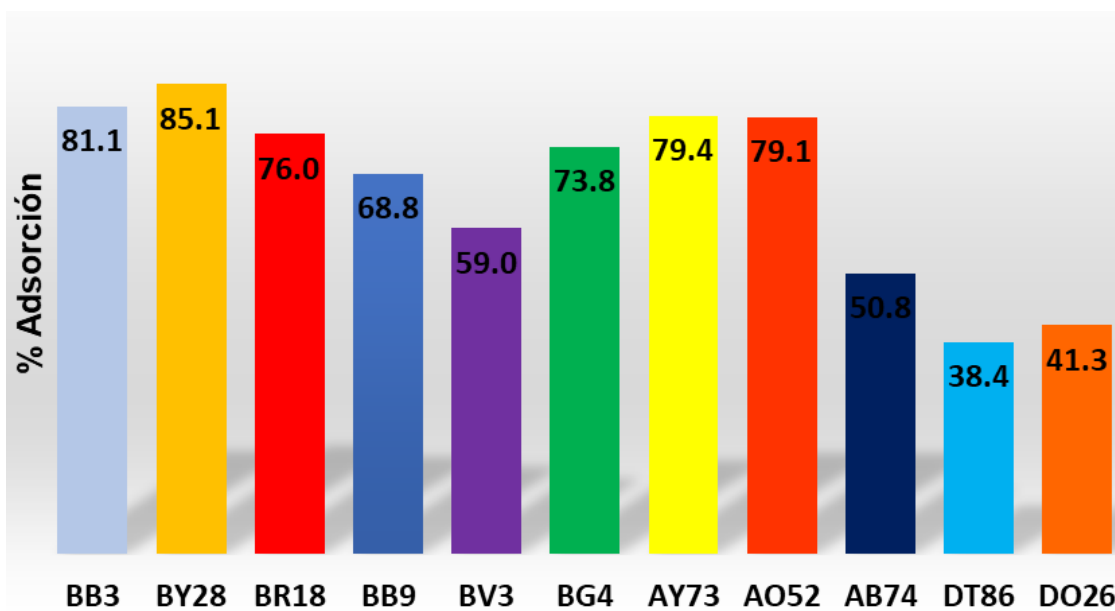


Figura A7.3. Adsorción estática sobre CarQPS400/10.

## Anexo 8. Cinéticas de adsorción

Tabla A8.1. Cinética de adsorción de pseudo segundo orden para cada colorante en CarFPS350.

Carbón	Carácter	Colorante	$a_{eq}$ ( $mgg^{-1}$ )	$K_2$ ( $gh^{-1}mg^{-1}$ )	H ( $mggh^{-1}g^{-1}$ )	$R^2$
CarFPS350	Catiónico	BB3	22.22	0.141	69.44	0.9998
		BY28	21.73	0.173	81.96	0.9643
		BR18	22.22	0.038	18.73	0.9964
		BB9	22.12	0.150	73.53	0.9977
		BV3	21.93	0.266	128.21	0.9978
		BG4	22.12	0.272	133.33	0.9997

Tabla A8.2. Cinética de adsorción de pseudo segundo orden para cada colorante en CarQPS400.

Carbón	Carácter	Colorante	$a_{eq}$ ( $mgg^{-1}$ )	$K_2$ ( $gh^{-1}mg^{-1}$ )	H ( $mggh^{-1}g^{-1}$ )	$R^2$
CarQPS400	Catiónico	BB3	22.22	0.021	10.53	0.9444
		BY28	22.22	0.063	31.06	0.9997
		BR18	22.22	0.06	29.41	0.9997
		BB9	21.88	0.012	5.71	0.9912
		BV3	22.17	0.022	10.86	0.9835
		BG4	22.27	0.041	20.28	0.9993
	Aniónico	AY73	21.83	0.202	96.15	0.9999
		AO52	22.22	0.205	101	0.9994
		AB74	22.22	0.016	7.98	0.9758
		DT86	22.22	0.029	14.22	0.9976
		DO26	22.22	0.019	9.2	0.9846

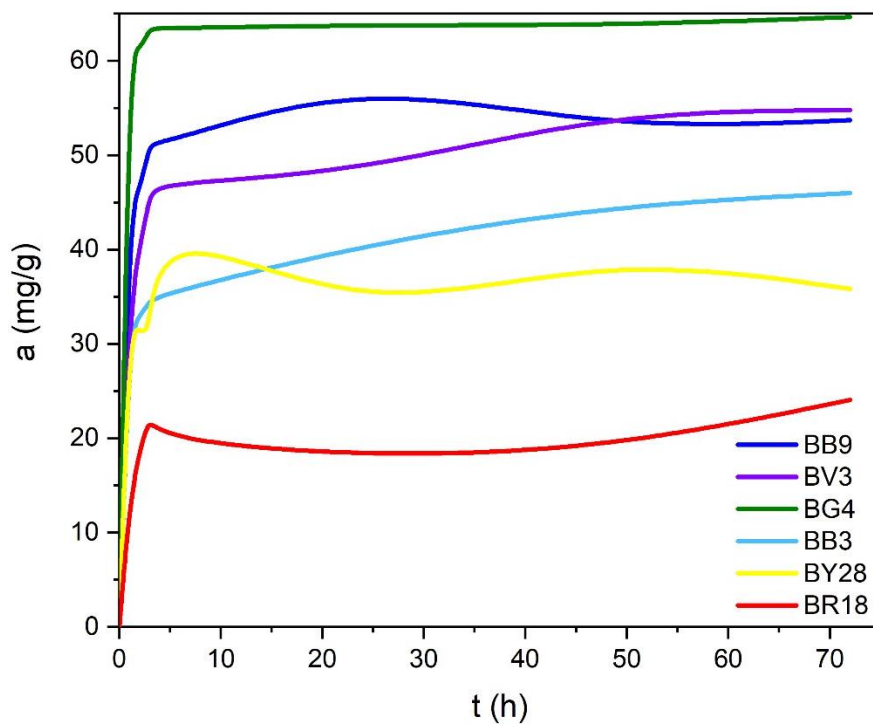


Figura A8.1. Cinética de adsorción sobre CarFPS400 con colorantes básicos.

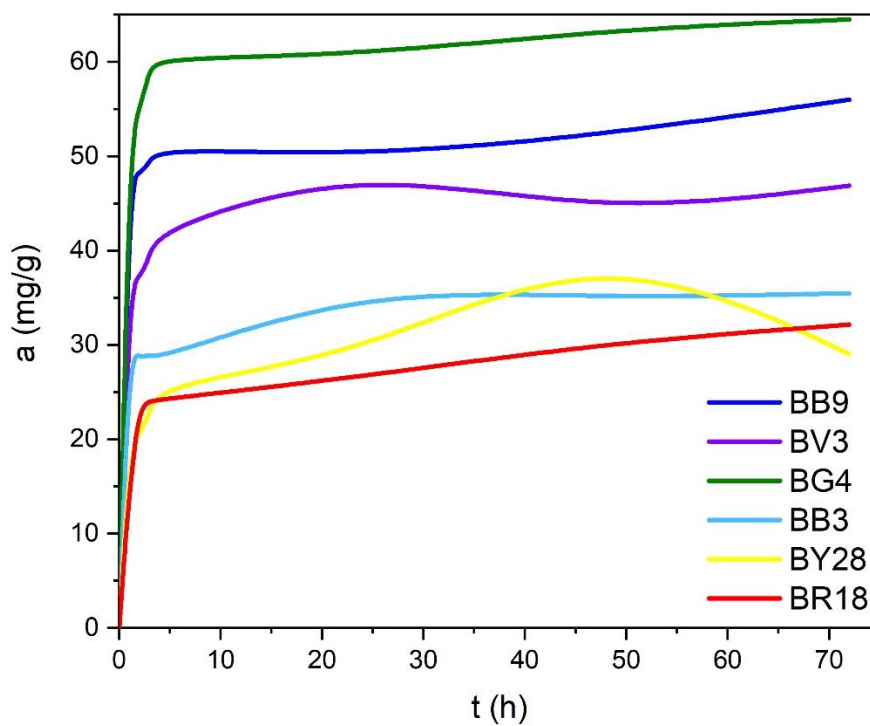


Figura A8.2. Cinética de adsorción sobre CarFPS350 con colorantes básicos.

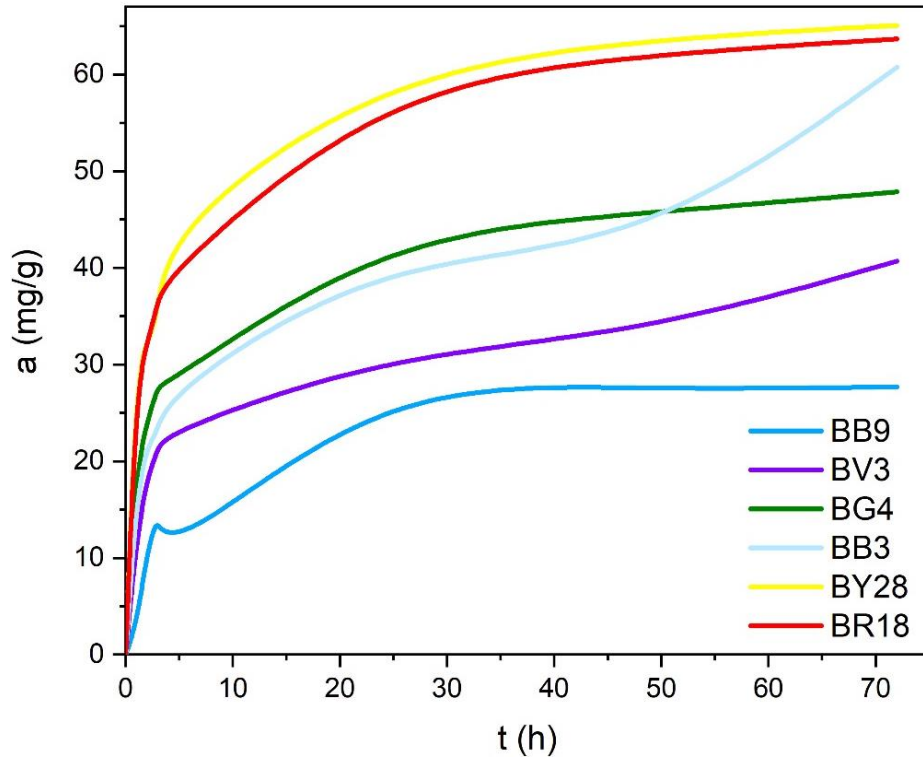


Figura A8.3. Cinética de adsorción sobre CarQPS400 con colorantes básicos.

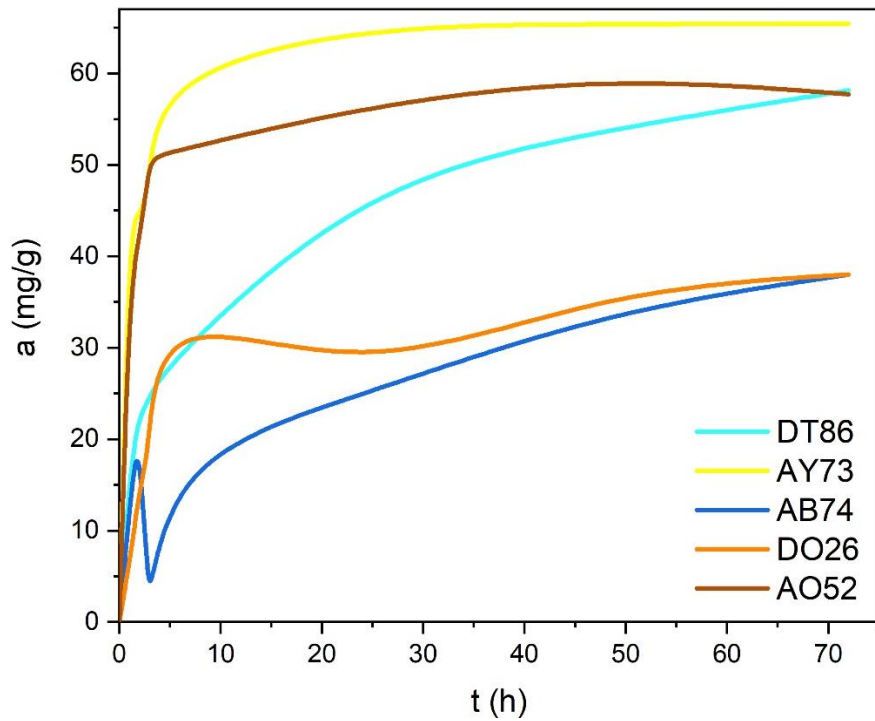


Figura A8.4. Cinética de adsorción sobre CarQPS400 con colorantes ácidos.

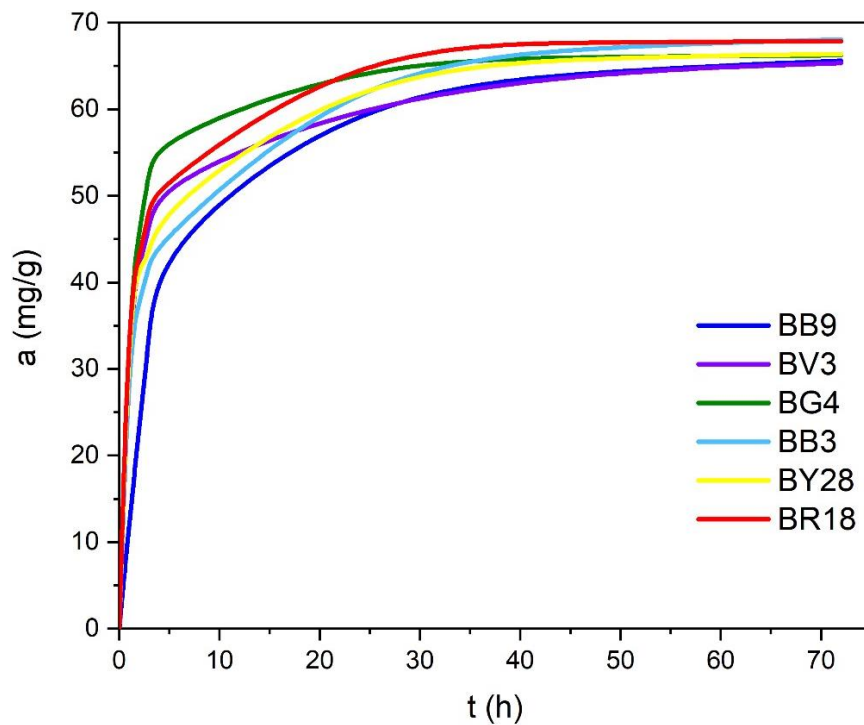


Figura A8.5. Cinética de adsorción sobre CarQPS400/50 con colorantes básicos.

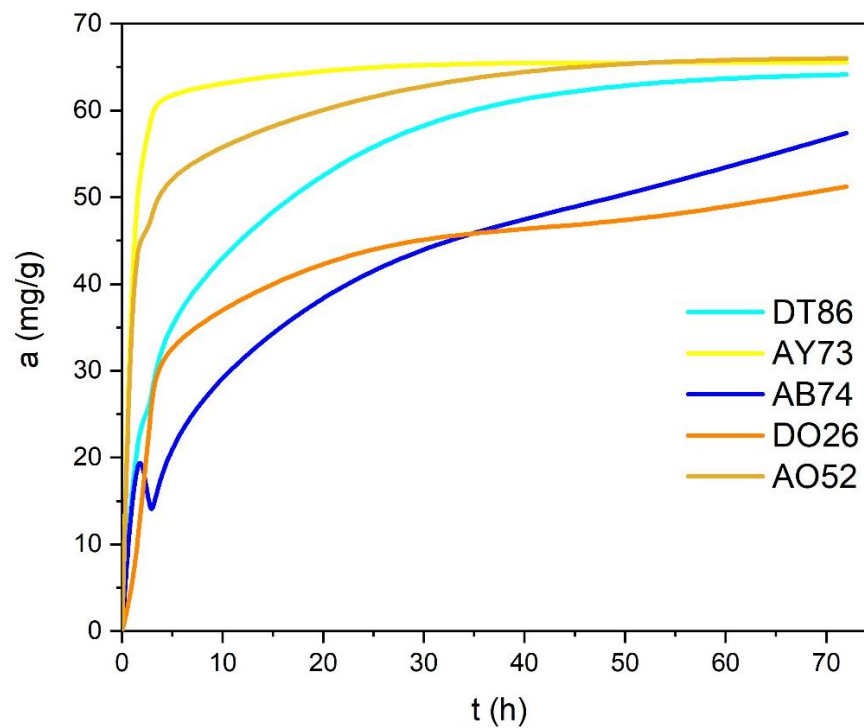


Figura A8.6. Cinética de adsorción sobre CarQPS400/50 con colorantes ácidos.



### Anexo 9. Gráficas de perfil de concentración

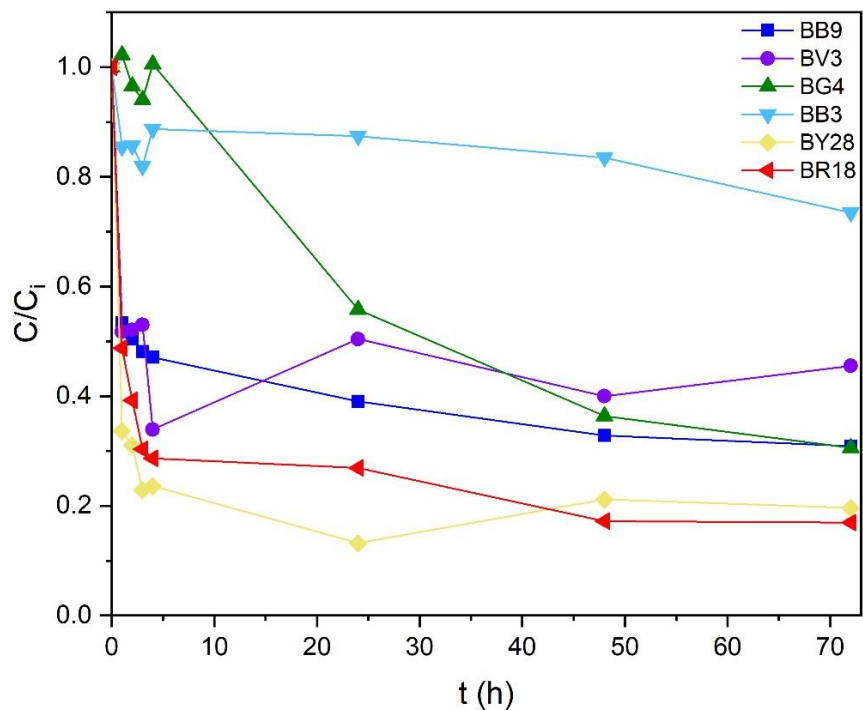


Figura A9.1. Perfil de concentración sobre CarFPS400 con colorantes básicos.

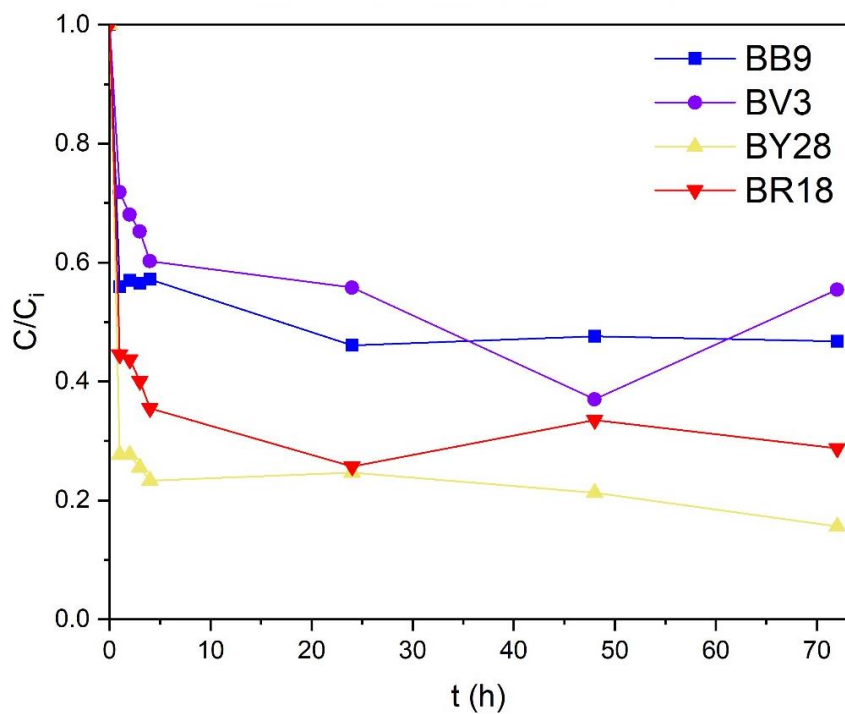


Figura A9.2. Perfil de concentración sobre CarFPS350 con colorantes básicos.

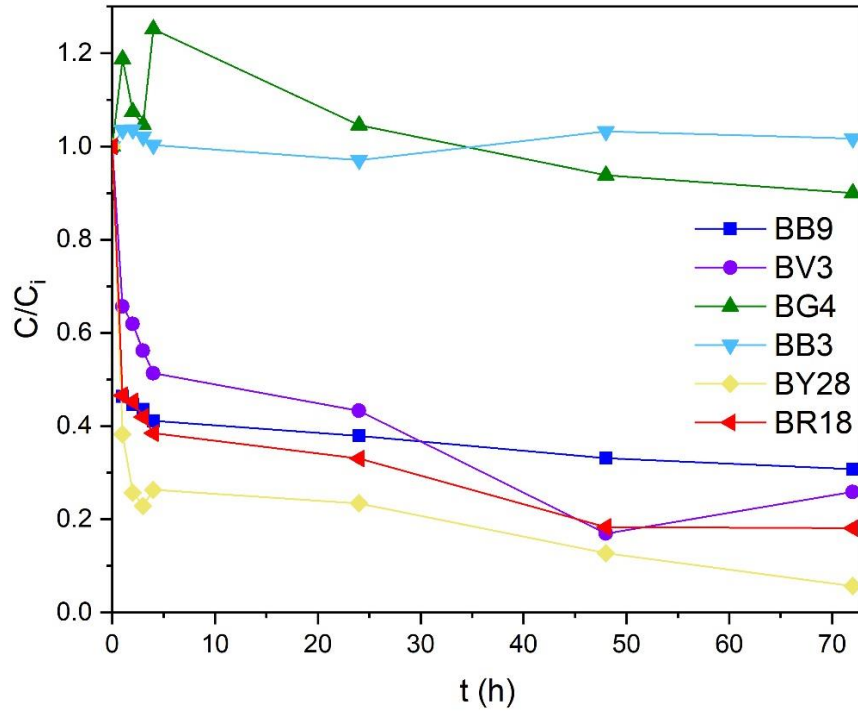


Figura A9.3. Perfil de concentración sobre CarFPS300 con colorantes básicos.

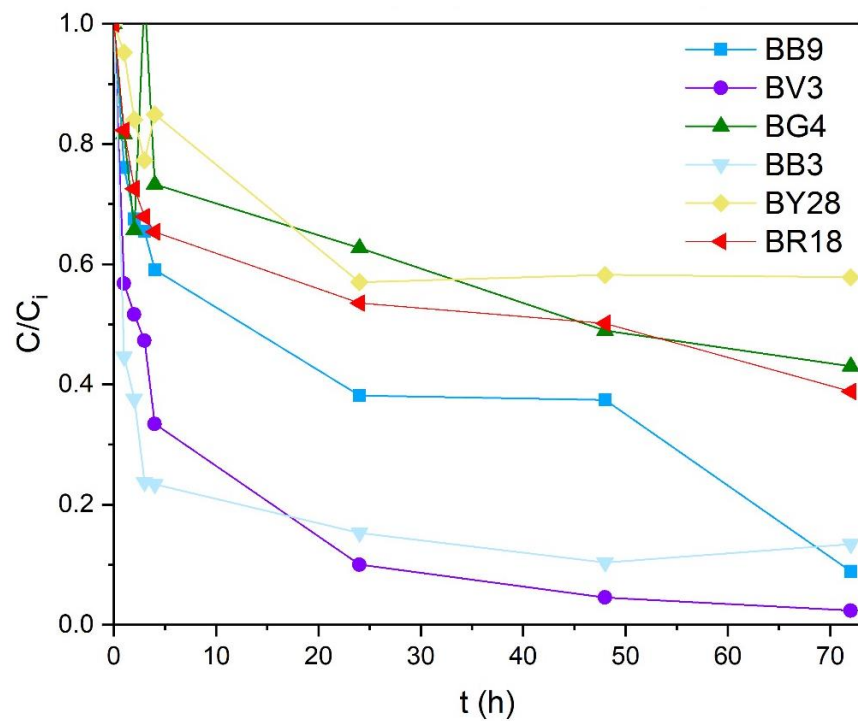


Figura A9.4. Perfil de concentración sobre CarQPS400 con colorantes básicos.

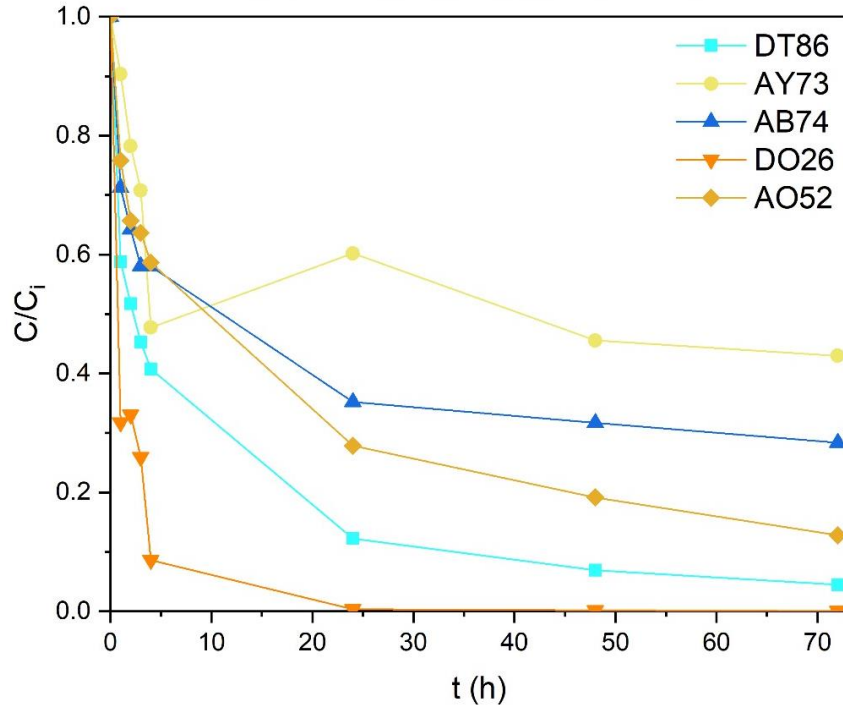


Figura A9.5. Perfil de concentración sobre CarQPS400 con colorantes ácidos.

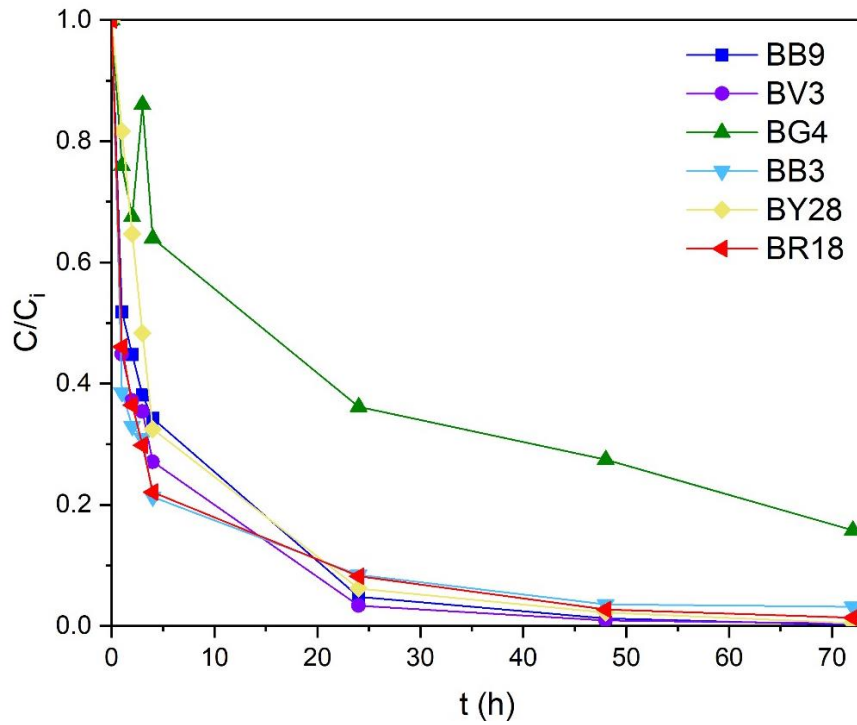


Figura A9.6. Perfil de concentración sobre CarQPS400/50 con colorantes básicos.

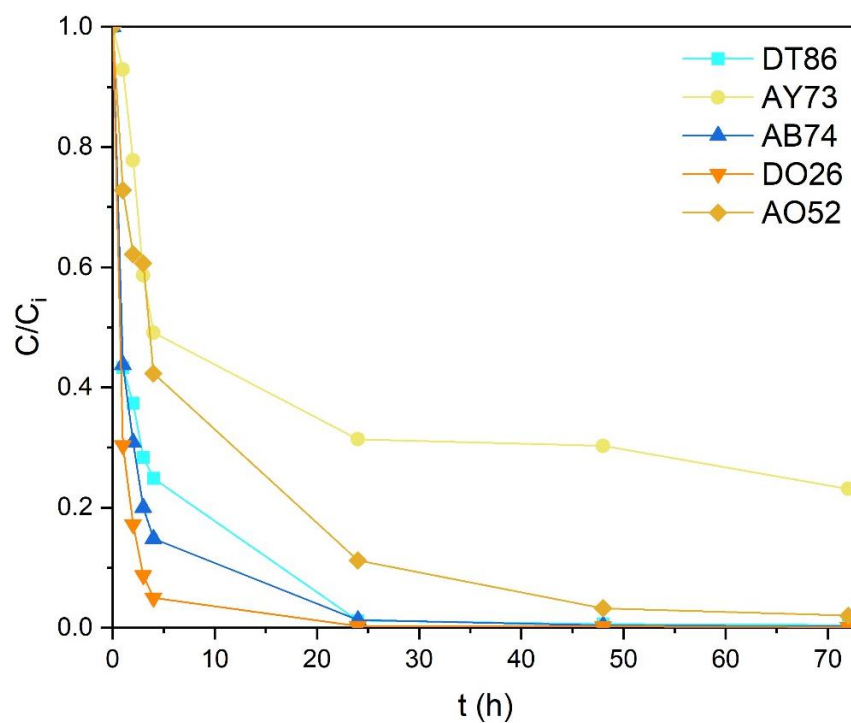


Figura A9.7. Perfil de concentración sobre CarQPS400/50 con colorantes ácidos.

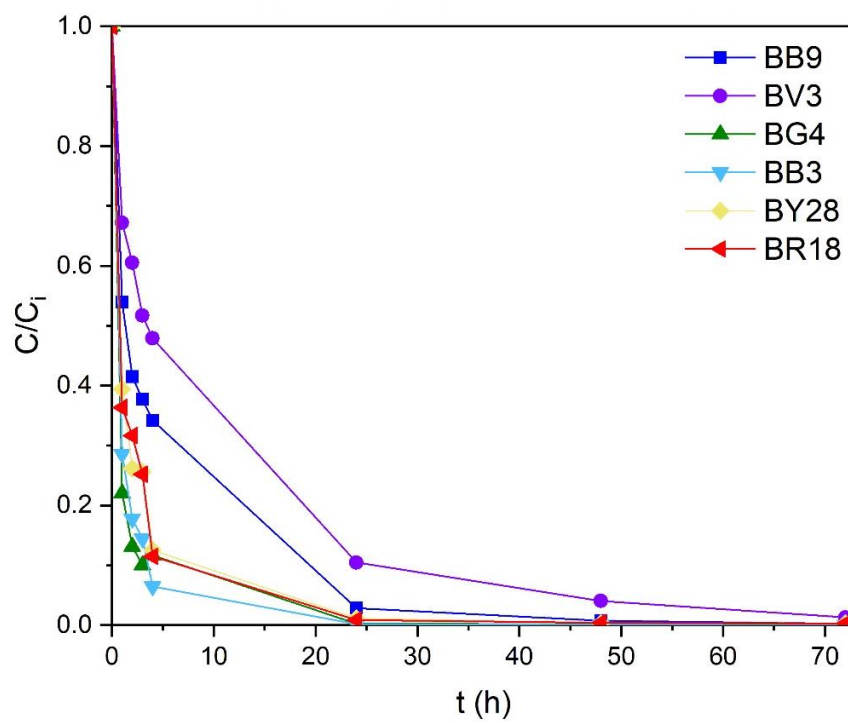


Figura A9.8. Perfil de concentración sobre CarQPS400/25 con colorantes básicos.

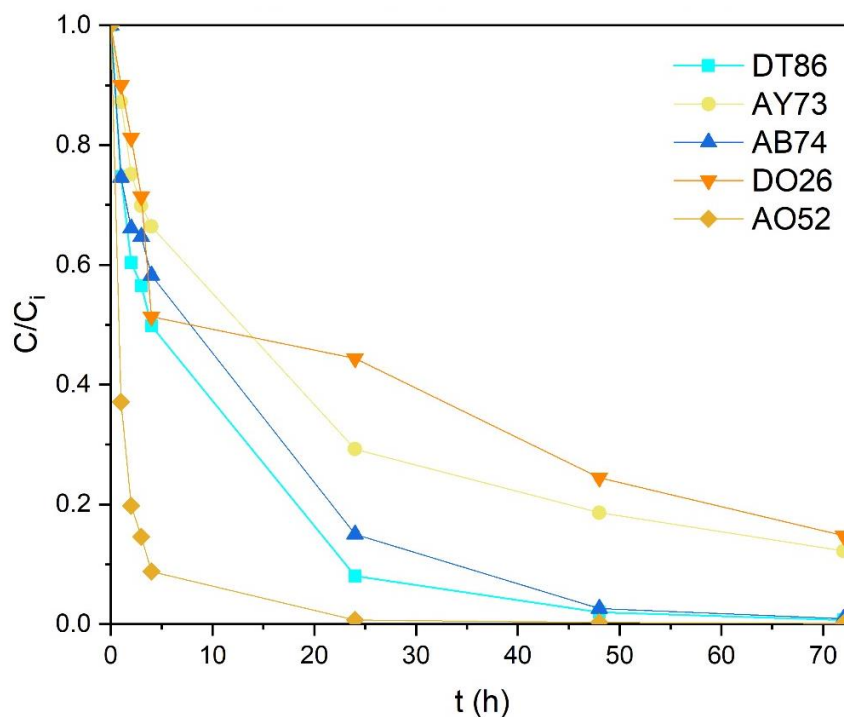


Figura A9.9. Perfil de concentración sobre CarQPS400/25 con colorantes ácidos.

## Anexo 10. Isotermas de adsorción

Tabla A10. Parámetros de Langmuir de los colorantes sobre CarQPS400.

Carbón	Carácter	Colorante	$a_m$ ( $\text{mgg}^{-1}$ )	$K_L$ ( $\text{Lmg}^{-1}$ )	$R_L$	$R^2$
CarQPS400	Catiónico	BB3	123.46	0.029	0.017 – 0.148	0.9683
		BY28	500.00	0.062	0.008 – 0.075	0.9814
		BR18	303.03	0.002	0.171 – 0.673	0.9932
		BB9	204.08	0.027	0.018 – 0.158	0.9948
		BV3	135.14	0.404	0.001 – 0.012	0.9456
	Aniónico	BG4	147.06	0.187	0.003 – 0.026	0.9874
		AY73	185.19	0.036	0.014 – 0.121	0.9954
		AO52	344.83	0.035	0.014 – 0.126	0.9772
		AB74	357.14	0.043	0.012 – 0.105	0.9974
		DT86	200.00	0.041	0.012 – 0.108	0.9951
		DO26	181.82	0.150	0.003 – 0.032	0.9942

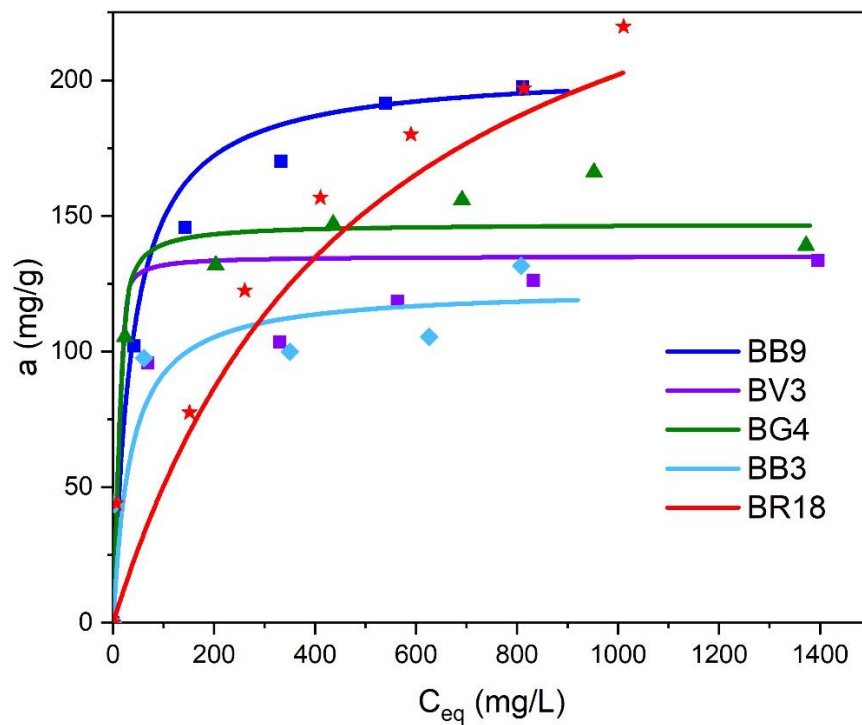


Figura A10.1. Isothermas de adsorción sobre CarQPS400 con colorantes básicos.

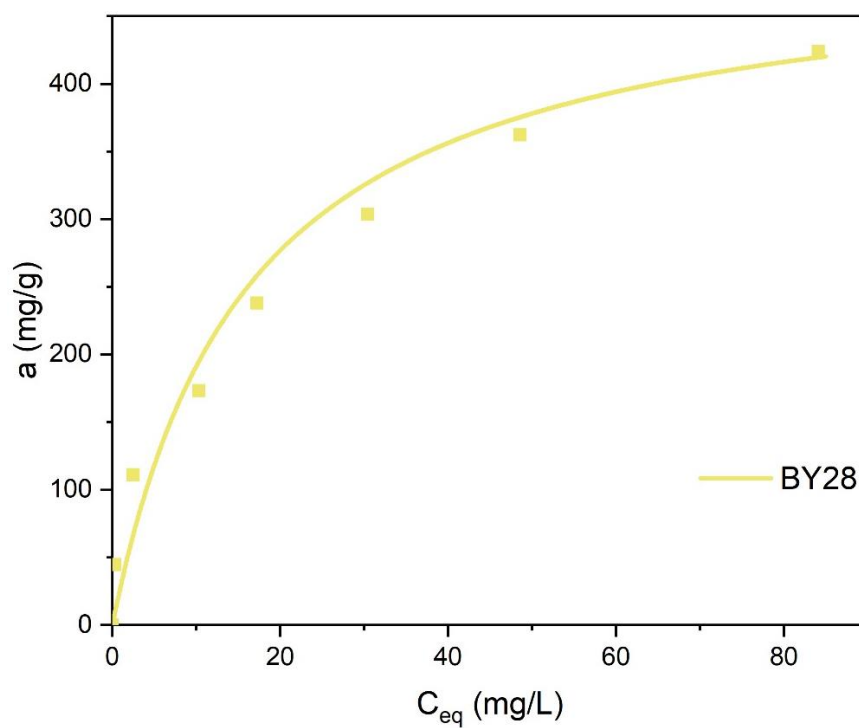


Figura A10.2. Isothermas de adsorción sobre CarQPS400 con colorantes básicos.

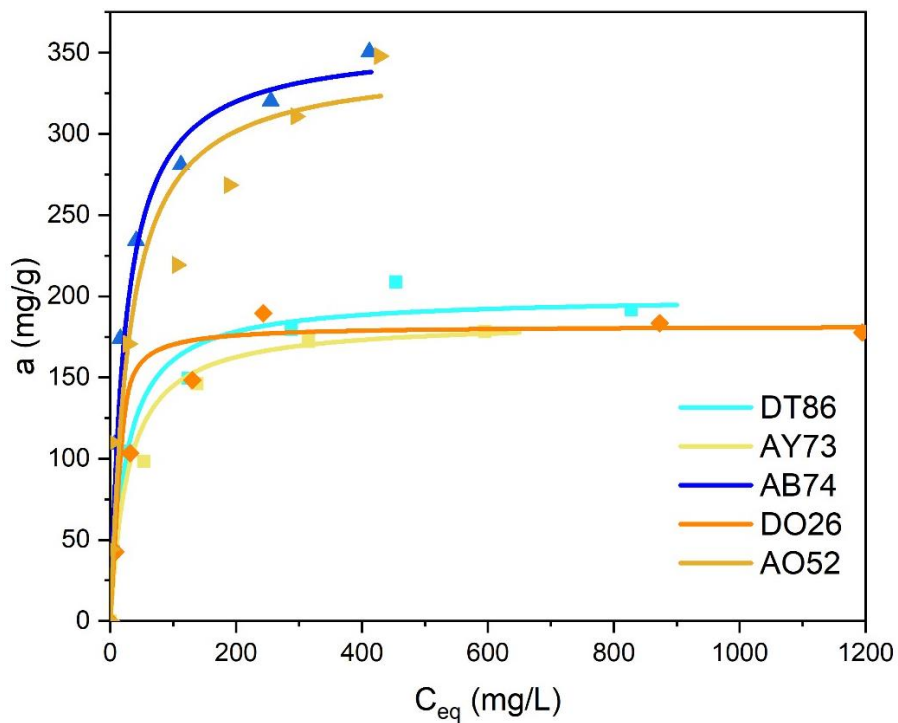


Figura A10.3. Isothermas de adsorción sobre CarQPS400 con colorantes ácidos.

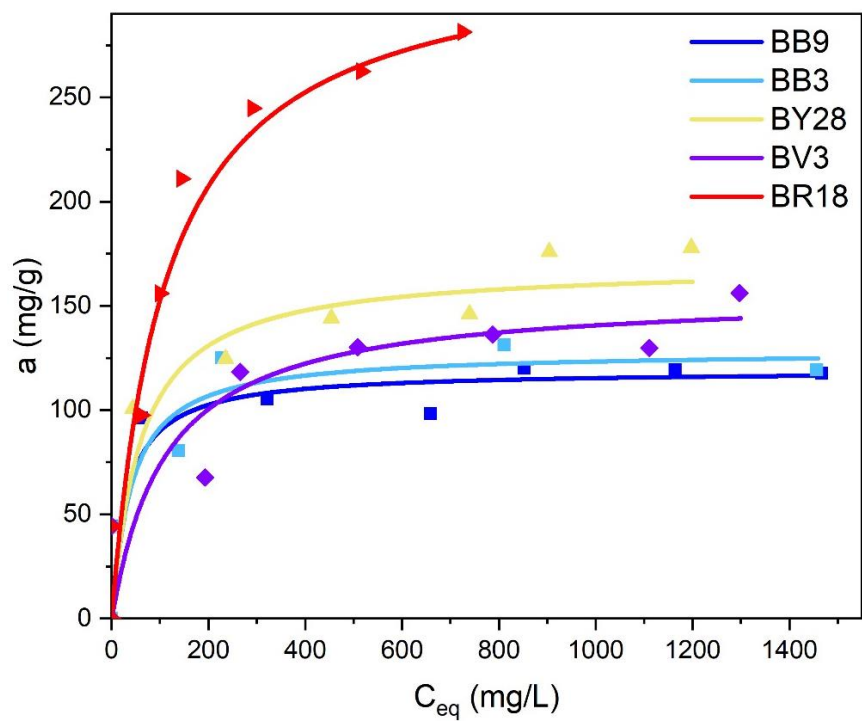


Figura A10.4. Isothermas de adsorción sobre CarQPS400/50 con colorantes básicos.

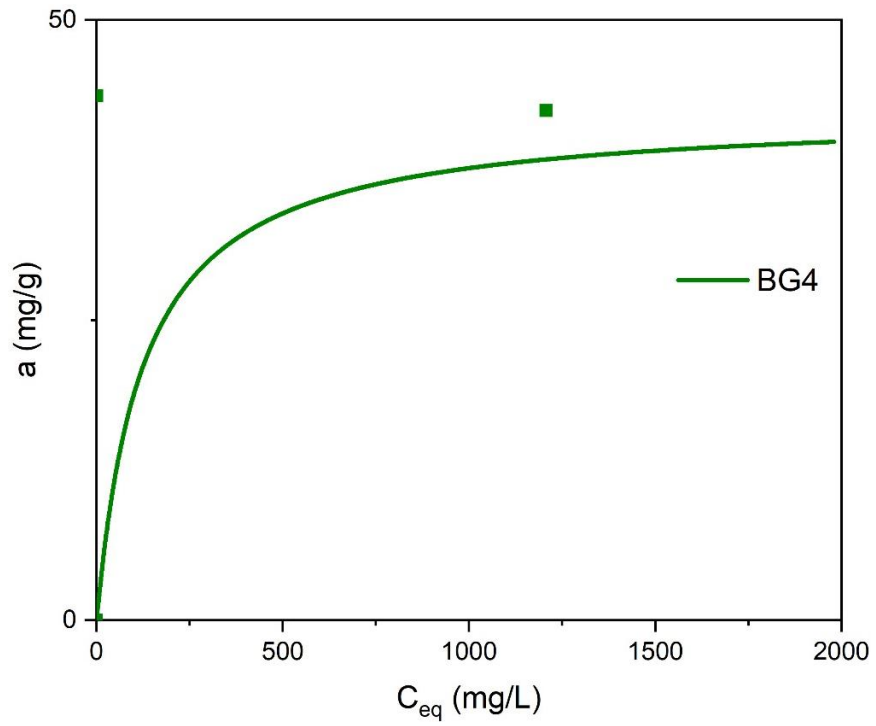


Figura A10.5. Isothermas de adsorción sobre CarQPS400/50 con colorantes básicos.

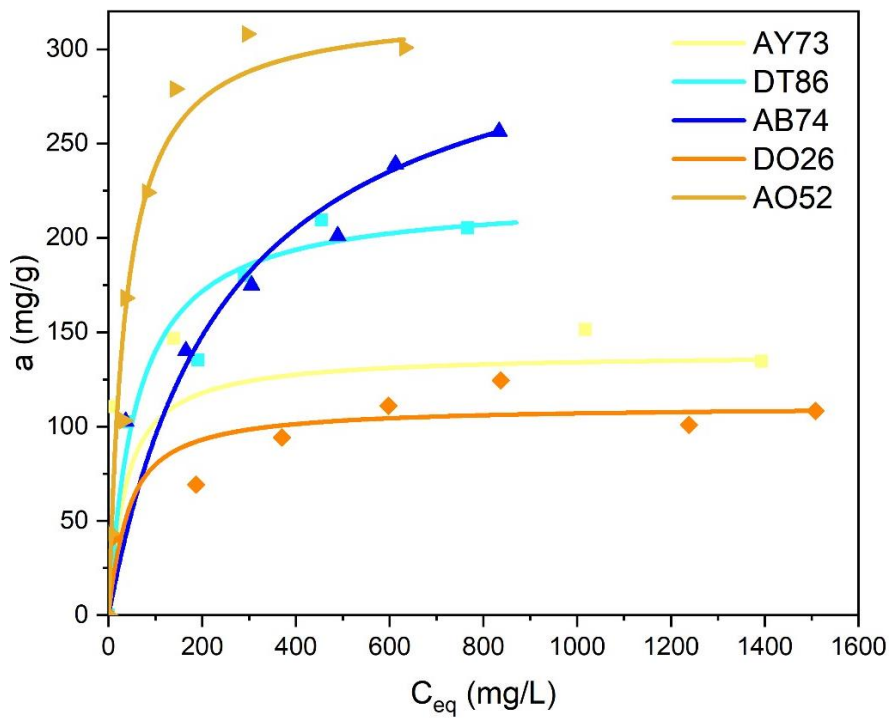


Figura A10.6. Isothermas de adsorción sobre CarQPS400/50 con colorantes ácidos.



## Anexo 11. Productos de trabajo



Mexico City, May 6th, 2023

**Mari Carmen Reyes-Ángeles**

Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería  
Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

I am pleased to inform you that your contribution "**Obtaining adsorbents with postindustrial polymers useful in removing textile dyes**" by *Mari Carmen Reyes-Ángeles, Esmeralda Gómez Merino, Alejandra Alicia Peláez Cid, Nayely Trejo Carbajal, Ana María Herrera González*, has been **accepted** in symposium **A8, Materials and the Environment** at the 31st International Materials Research Congress, to be held in Cancun in August 13 - 18, 2023.

The presentation has been accepted in the **Poster Presentation** modality. Remember that in order to include your abstract in the congress program you must confirm your participation no later than May 26th by choosing the modality you will present your abstract(s); you can do this from your IMRC account.

**Organizers of the Symposium**  
*"Materials and the Environment"*

**Eddie Lopez Honorato, Rosendo Lopez Gonzalez, Leticia Velasco, Claudia Palacio**

Obtaining adsorbents with postindustrial polymers useful in removing textile dyes

Esmeralda Gómez Merino<sup>1</sup>, Mari Carmen Reyes Angeles<sup>2</sup>, Alejandra Alicia Peláez Cid<sup>3</sup>, Nayely Trejo Carbajal<sup>4</sup> and Ana María Herrera González<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Maestría en Ciencias de los Materiales, Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Carretera Pachuca-Tulancingo Km. 4.5 Colonia Carboneras, Mineral de la Reforma, Hidalgo, C.P 42184, México.  
<sup>2</sup> Doctorado en Ciencias de los Materiales, Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Carretera Pachuca-Tulancingo Km. 4.5 Colonia Carboneras, Mineral de la Reforma, Hidalgo, C.P42184, México.  
<sup>3</sup>Facultad de Ingeniería, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Edificio ING1, Ciudad Universitaria, Puebla, Puebla, C.P 72570, México.  
<sup>4</sup>Laboratorio de Polímeros, Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Carretera Pachuca-Tulancingo Km. 4.5 Colonia Carboneras, Mineral de la Reforma, Hidalgo, C.P 42184, México.

Abstract

Diapers are a waste that is discarded in high tonnage, they occupy a volume in the garbage of 6.52% of the total waste and contaminate the environment. Using them after they have completed their application would reduce their impact on the environment. This work reports the characterization and application of activated carbons obtained from disposable baby diapers. The activated carbons were chemically or physically activated at different temperatures, using H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> or H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> during the activation, respectively. The characterization of the adsorbent materials was carried out by FTIR, TGA and S<sub>BET</sub>. The adsorbent materials removed textile dyes such as methylene blue (BB9), crystal violet (BV3) and malachite green (BG4), with removal percentages close to 90% for physically activated and percentages greater than 90% with chemically activated carbons.

Introduction

A disposable diaper takes 500 years to degrade, because in addition to containing around 35% cellulose fibers, it has non-biodegradable synthetic polymers, such as polyethylene, polypropylene, and a super absorbent polymer, polyacrylic acid. Disposable diapers pollute the environment because they are abundant waste that is difficult to treat and non-biodegradable. Therefore, they can be raw material in obtaining adsorbents, specifically activated carbons (ACs). Using a polluting residue that is difficult to treat and regenerate helps the environment in two ways, reducing its volume in the trash and generating new adsorbent materials without the use of petroleum.

Experimental Section

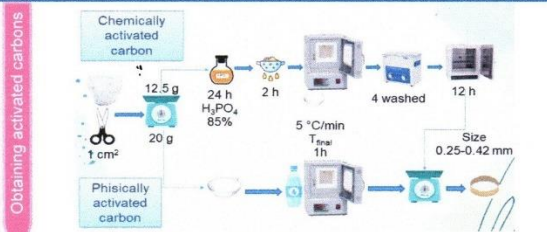


Fig. 1. Obtaining activated carbons

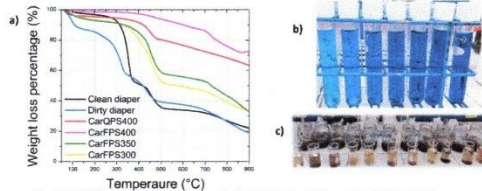


Fig. 2. a) TGA of raw material and activated carbons, b) S<sub>BET</sub> using BB9 y c) pH<sub>BCC</sub>



Fig. 3. a) Adsorption isotherms for cationic and anionic dyes using concentration of 200 - 2000 mg/L b) Adsorption kinetics on the activate carbons using 300 mg/L.

Dyes

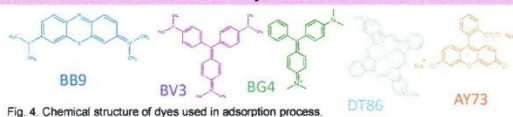


Fig. 4. Chemical structure of dyes used in adsorption process.

Results

Table 1. Activate carbon properties

Parameter	Yield (%)	Temperature ramp (°C/min)	pH <sub>BCC</sub>	Bulk density (g/mL)
AC				
CarQPS400	42.3	4.7	2.3	0.1437
CarFPS300	67.1	4.65	7.7	0.3831
CarFPS350	48.2	4.61	8.4	0.4417
CarFPS400	28.5	4.1	11.03	0.2862

Results

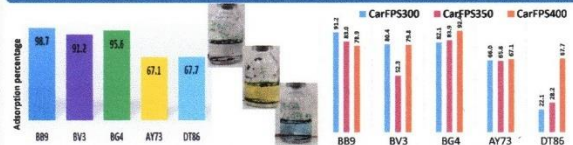


Fig. 5. Adsorption kinetics on the activate carbons using solutions with a concentration of 300 mg/L.

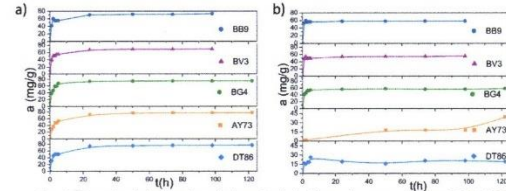


Fig. 6. Adsorption isotherms for cationic and anionic dyes using concentration of 200 - 2000 mg/L using a) CarQPS400 and b) CarFPS300.

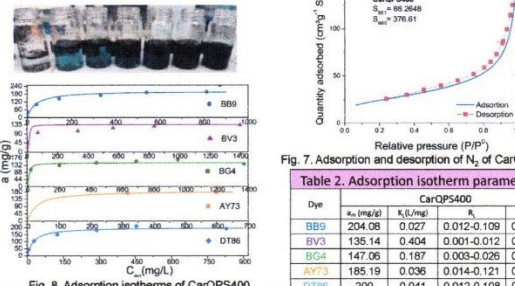


Fig. 8. Adsorption isotherms of CarQPS400.

Conclusions

Disposable diapers can be used in the preparation of activated carbons with environmental applications. Using the activated carbons which were synthesized, it was possible to remove textile dyes.

After carrying out the different characterization and adsorption tests of the activated carbons, the activate carbons with the best adsorptive properties were CarQPS400 and CarFPS300.

Using a dose of 4 g/L of carbon, it was possible to remove the cationic dyes present in aqueous solutions close to 90%, because the surface of the carbons had acid character, the cationic dyes were adsorbed in bigger proportions.

References

- Gobierno de México, (2022). Conexión Cinvestav: evalúan alternativa para reducir el impacto ambiental de pañales desechables. Obtenido de Gobierno de México: <https://conexion.cinvestav.mx/Publicaciones/eva1250an-alternativa-para-reducir-el-impacto-ambiental-de-pa21ales-desechables>.
- Bienestar 180, (2023). Crece en México el uso de pañales desechables. Obtenido de: <https://www.salud180.com/salud-dia-dia/crece-en-mexico-uso-de-panales-desechables>.
- Peláez-Cid, A.A., Hernández-Romero, V., Herrera-González, A. M., Bautista-Hernández, A. y Coreno-Alonso, O. (2020). Synthesis of activated carbons from black sapote seeds, characterization, and application in the elimination of heavy metals and textile dyes. Chinese Journal of Chemical Engineering.
- Herrera-González, A. M., Peláez-Cid, A. A. y Caldera-Villalobos, M. (2019). Adsorption of textile dyes using an activated carbon and crosslinked polyvinyl phosphonic acid composite. Journal Environmental Management, 234, 237-244.





UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO  
Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería  
*School of Engineering and Basic Sciences*  
**Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales**  
*Department of Materials and Earth Sciences*

Mineral de la Reforma, Hgo., a 29 de agosto del 2023

**Asunto:** Carta de aceptación

Estimado autor de correspondencia  
**Gómez Merino Esmeralda**

Por medio de la presente y a nombre del Comité Organizador del XVI Encuentro de Investigación del Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales, tenemos el agrado de informarle que su trabajo titulado "**Síntesis de carbones activados a partir de pañales desechables para la adsorción de colorantes textiles**", presentado por:

*Gómez Merino Esmeralda, Peláez Cid Alejandra Alicia, Trejo Carbajal Nayely, Herrera González Ana María*

Ha sido ACEPTADO para su presentación en modalidad *Poster (modalidad presencial)*, registrado dentro del tópico **Remediación y recuperación** en el marco de éste evento académico, a celebrarse de manera híbrida en la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo del 27 al 29 de septiembre del 2023.

Sin otro particular, agradecemos su participación y lo esperamos en el evento.

Atentamente  
"Amor, Orden y Progreso"

**Comité Organizador  
XVI Encuentro de Investigación del AACTYM-UAEH**

Ciudad del Conocimiento  
Carretera Pachuca-Tulancingo km 4.5 Colonia  
Carboneras, Mineral de la Reforma, Hidalgo,  
México. C.P. 42184  
Teléfono: +52 (771) 71 720 00 ext. 2270,2280  
Fax 2109  
aactym\_icbi@uaeh.edu.mx



[www.uaeh.edu.mx](http://www.uaeh.edu.mx)

**Síntesis de carbones activados a partir de pañales desechables para la adsorción de colorantes textiles**

Esmeralda Gómez Merino<sup>1</sup>, Alejandra Alicia Peláez Cid<sup>2</sup>, Nayely Trejo Carbajal<sup>3</sup> y Ana María Herrera González<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Maestría en Ciencias de los Materiales, Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Carretera Pachuca-Tulancingo Km. 4.5 Colonia Carboneras, Mineral de la Reforma, Hidalgo, C.P 42184, México.

<sup>2</sup>Facultad de Ingeniería, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Edificio ING3, Ciudad Universitaria, Puebla, Puebla, C.P 72570, México.

<sup>3</sup>Laboratorio de Polímeros, Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Carretera Pachuca-Tulancingo Km. 4.5 Colonia Carboneras, Mineral de la Reforma, Hidalgo, C.P 42184, México.

**Resumen**

Los pañales son un desecho que se produce en alto volumen, siendo 6.52 % del total de los desechos sólidos en la basura y contaminan el ambiente. Al producir materiales adsorbentes usando pañales después de que han completado su vida útil se reduciría su impacto en el ambiente. Este trabajo reporta la obtención, caracterización y aplicación de carbones activados obtenidos de los pañales desechables para bebés. Los carbones fueron activados químicamente y físicamente a diferentes temperaturas, utilizando  $H_3PO_4$  y  $H_2O_{(V)}$ , respectivamente. La caracterización de los carbones activados se realizó mediante FTIR,  $pH_{pzc}$ , TGA y  $S_{BET}$ . Los carbones activados a base de pañales eliminan colorantes textiles como el azul de metileno (BB9), cristal violeta (BV3) y verde de malaquita (BG4), con porcentajes de adsorción cercanos al 90% para carbones activados físicamente, mientras que los carbones activados químicamente muestran porcentajes superiores al 90%.

**Introducción**

Un pañal desechable tarda 500 años en degradarse, ya que además de contener alrededor del 35% de fibras de celulosa, posee polímeros sintéticos no biodegradables, como el polietileno, polipropileno y un polímero superabsorbente, el ácido poliacrílico. Los pañales desechables contaminan el medio ambiente debido a que son residuos abundantes, difíciles de tratar y no biodegradables. Por lo tanto, pueden ser utilizados como materia prima para obtener adsorbentes, específicamente carbones activados (CA). Utilizar un residuo contaminante que es difícil de tratar y regenerar beneficia al medio ambiente de dos maneras: reduciendo su volumen en la basura y generando nuevos materiales adsorbentes sin el uso de petróleo.

**Metodología experimental**

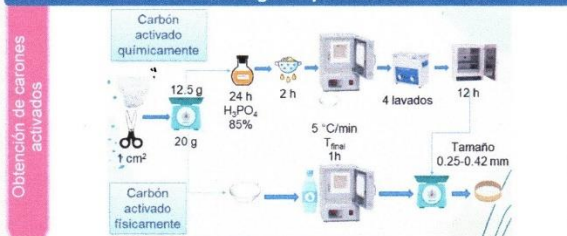
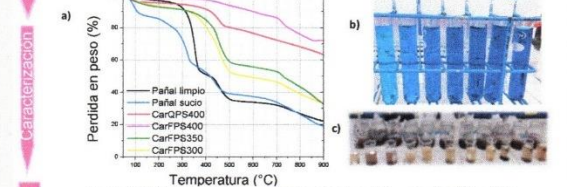


Fig. 1. Obtención de carbones activados



**Colorantes**

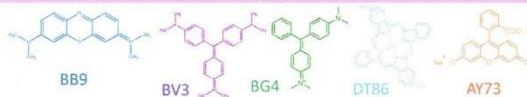


Fig. 4. Estructura molecular de los colorantes utilizados en la adsorción

**Resultados**

Tabla 1. Propiedades de los carbones activados

Parámetro	Rendimiento (%)	Temperatura de rampa (°C/min)	$pH_{pzc}$	Densidad aparente (g/mL)
AC				
CarQPS400	42.3	4.7	2.3	0.1437
CarFPS400	67.1	4.65	7.7	0.3831
CarFPS300	48.2	4.61	8.4	0.4417
CarFPS400	28.5	4.1	11.03	0.2862

**Resultados**

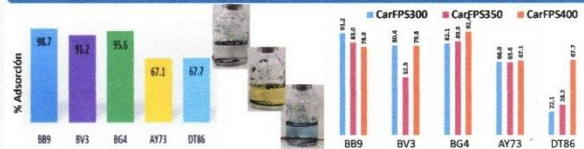


Fig. 5. Adsorción estática sobre los carbones activados usando soluciones con concentraciones de 300 mg/L.

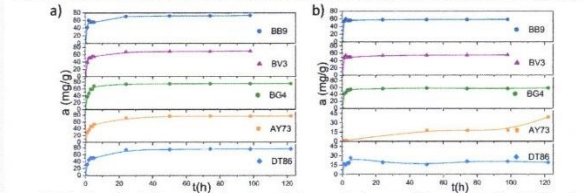


Fig. 6. Adsorción cinética sobre colorantes catiónicos y aniónicos usando la concentración de 300 mg/L a) CarQPS400 y b) CarFPS300.

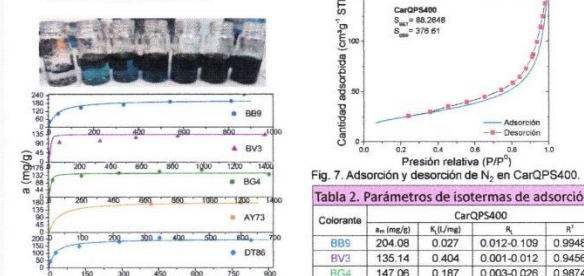


Tabla 2. Parámetros de isotermas de adsorción

Colorante	CarQPS400			
	$q_m$ (mg/g)	$K_L$ (mg/L)	$R_L$	$R^2$
BB9	204.08	0.027	0.012-0.109	0.9948
BV3	135.14	0.404	0.001-0.012	0.9456
BG4	147.06	0.187	0.003-0.026	0.9874
AY73	185.19	0.036	0.014-0.121	0.9954
DT86	200	0.041	0.012-0.108	0.9951

Fig. 8. Isoterma de adsorción de CarQPS400, usando concentraciones de 200 - 2000 mg/L

**Conclusiones**

Los pañales desechables pueden ser utilizados en la preparación de carbones activados con aplicaciones medioambientales. Utilizando los carbones activados que fueron sintetizados, fue posible remover colorantes textiles.

Después de llevar a cabo diferentes pruebas de caracterización y adsorción de los carbones activados, los que presentaron las mejores propiedades adsorbentes fueron CarQPS400 y CarFPS300.

Utilizando una dosis de 4 g/L de carbón, fue posible remover los colorantes catiónicos presentes en soluciones acuosas cerca del 90%, debido a que la superficie de los carbones tenía carácter ácido, los colorantes catiónicos fueron adsorbidos en proporciones mayores.

**Referencias**

- Gobierno de México, (2022). Conexión Cinvestav: evalúan alternativa para reducir el impacto ambiental de pañales desechables. Obtenido de Gobierno de México: <https://conexion.cinvestav.mx/Publicaciones/eval250an-alternativa-para-reducir-el-impacto-ambiental-de-pa241ales-desechables>.
- Bienestar 180, (2023). Crece en México el uso de pañales desechables. Obtenido de: <https://www.salud180.com/salud-dia-dia/crece-en-mexico-uso-de-panales-desechables>.
- Peláez-Cid, A. A., Hernández-Romero, V., Herrera-González, A. M., Bautista-Hernández, A. y Coreno-Alonso, O. (2020). Synthesis of activated carbons from black sapote seeds, characterization, and application in the elimination of heavy metals and textile dyes. Chinese Journal of Chemical Engineering.
- Herrera-González, A. M., Peláez-Cid, A. A. y Caldera-Villalobos, M. (2019). Adsorption of textile dyes using an activated carbon and crosslinked polyvinyl phosphonic acid composite. Journal Environmental Management, 234, 237-244.





Mexico City, May 6th, 2024

**Ana María Herrera-González**  
Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería  
Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

I am pleased to inform you that your contribution "**A NOVEL APPROACH TO PRODUCE CHEMICALLY ACTIVATED CARBON FROM DISPOSABLE DIAPERS USEFUL IN THE ADSORPTION OF TEXTILE DYES**" by *Esmeralda Gómez Merino, Alejandra Alicia Peláez Cid, Ana María Herrera-González*, has been **accepted** in symposium **B4, Materials and the Environment (LEGACY)** at the 32nd International Materials Research Congress, to be held in Cancun, Mexico in August 18 - 23, 2024.

The presentation has been accepted in the **Poster Presentation** modality. Remember that in order to include your abstract in the congress program you must confirm your participation no later than June 14, 2024 by choosing the modality you will present your abstract(s); you can do this from your IMRC account.

**Organizers of the Symposium**  
*"Materials and the Environment (LEGACY)"*

**Rosendo López González, Eddie Lopez Honorato, Lorena Julieta Barrientos Poblete,  
Karen Esquivel Escalante**

## SÍNTESIS DE CARBONES ACTIVADOS CON SEMILLAS DE CHIRIMOYA Y SU APLICACIÓN EN LA ADSORCIÓN DE COLORANTES TEXTILES

Synthesis of activated carbons using custard apple seeds and their application in the adsorption of textile dyes

Alejandra Alicia PELÁEZ CID<sup>1\*</sup>, Diana Laura LÓPEZ HERNÁNDEZ<sup>1</sup>,  
Esmeralda GÓMEZ MERINO<sup>2</sup> y Ana María HERRERA GONZÁLEZ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Edificio ING1, Ciudad Universitaria, Colonia San Manuel, C.P. 72570, Puebla, Puebla, México.

<sup>2</sup> Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Ciudad del Conocimiento, Colonia Carboneras, C.P. 42184, Mineral de la Reforma, Hidalgo, México.

\*Autor para correspondencia: alalpeci@me.com

(Recibido: enero 2023; aceptado: septiembre 2023).

Palabras clave: residuos de chirimoya, adsorbentes carbonáceos, remoción de colorantes, tratamiento de agua residual.

### RESUMEN

En este trabajo se describe la preparación de cinco carbones activados a partir de un residuo vegetal, la semilla de chirimoya (*Annona cherimola*). Todos los carbones fueron activados químicamente con  $H_3PO_4$ , tres de ellos se calcinaron a 673 K (CarChiQ, CarChiQC y CarChiQE) y los otros dos a 873 K (CarChiQC600 y CarChiQE600) por tres horas. Los carbones fueron caracterizados por adsorción de nitrógeno, número de azul de metileno, densidad aparente, microscopía electrónica de barrido y espectroscopia infrarroja. Además, se determinó el punto de carga cero que indicó el carácter ácido de todos los carbones. Se siguió la cinética de adsorción con el colorante azul de metileno, lo que permitió establecer el tiempo de contacto entre las soluciones de colorante y los carbones. La cinética de adsorción para los carbones se ajustó al modelo de pseudo segundo orden. Se estudió la adsorción de soluciones acuosas de colorantes textiles de tipo ácido y básico con una concentración inicial de 300 mg/dm<sup>3</sup>. Los colorantes básicos se adsorbieron en CarChiQ entre 82 y 99.9 %, en CarChiQE entre 65 y 92 % y en CarChiQC, CarChiQC600 y CarChiQE600 prácticamente se adsorbieron 100 %. El colorante ácido se adsorbió en menor proporción sobre los carbones, con excepción de CarChiQC600 y CarChiQE600 con adsorción total. Se trató un agua residual conteniendo colorantes textiles, la calidad de ésta mejoró después del tratamiento de adsorción, reduciéndose la demanda química de oxígeno hasta 76 % y el color hasta 98 %.

Key words: Custard apple residue, carbonaceous adsorbents, dyes removal, wastewater treatment.

### ABSTRACT

This work describes the preparation of five activated carbons from a vegetable waste: custard apple seeds (*Annona cherimola*). All carbons were chemically activated with phosphoric acid. Three of them were calcinated at 673 K (CarChiQ, CarChiQE, and CarChiQC) and the other two (CarChiQE600 and CarChiQC600) at 873 K for three