



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería
Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales

**“Síntesis de materiales a base de polianfolitos y carbón activado
para su aplicación en la adsorción de colorantes textiles”**

T E S I S

Que para obtener el grado de

Ingeniera en materiales

Presenta:

María Guadalupe Loyde Calderón

Directora:

Dra. Ana María Herrera González

Co-Directora:

Dra. Mari Carmen Reyes Angeles

Mineral de la Reforma, Hgo. Mayo 2026



Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería

School of Engineering and Basic Sciences

Dirección

Office of the Director

Mineral de la Reforma, Hgo., a 20 de abril de 2026

Número de control: ICBI-D/819/2026

Asunto: Autorización de impresión.

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

Con Título Quinto, Capítulo II, Capítulo V, Artículo 51 Fracción IX del Estatuto General de nuestra Institución, por este medio, le comunico que el Jurado asignado a la egresada de la Licenciatura en Ingeniería de Materiales **María Guadalupe Loyde Calderón**, quien presenta el trabajo de titulación "**Síntesis de materiales a base de polianfolitos y carbón activado para su aplicación en la adsorción de colorantes textiles**", ha decidido, después de revisar fundamento en lo dispuesto en el Título Tercero, Capítulo I, Artículo 18 Fracción IV; dicho trabajo en la reunión de sinodales, **autorizar la impresión del mismo**, una vez realizadas las correcciones acordadas.

A continuación, firman de conformidad los integrantes del Jurado:

Presidente: Dr. Jesús García Serrano
Secretario: Dra. Mari Carmen Reyes Angeles
Vocal: Dra. Ana María Herrera González
Suplente: Dra. Nayely Trejo Carbajal

Sin otro particular por el momento, reciba un cordial saludo.

Atentamente
"Amor, Orden y Progreso"

Dr. Gabriel Vergara Rodríguez
Director del ICBI



GVR/MMM

"Amor, Orden y Progreso"

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. 40001
direccion_icbi@uaeh.edu.mx, vergara@uaeh.edu.mx



uaeh.edu.mx

El presente trabajo de tesis 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 asesoría de la **Dra. Ana María Herrera González** y la **Dra. Mari Carmen Reyes Angeles**.

Agradecimientos

A mis padres Martina y Rosalío por su apoyo incondicional en cada una de las etapas de mi vida, por siempre creer en mí y motivarme a seguir adelante. Ustedes han sido mi ejemplo de que con esfuerzo y trabajo todo es posible, este logro no solo es mío, es de ustedes. Los amo y les agradezco por siempre.

A mi hermana Daniela por ser mi mejor amiga y siempre apoyarme en todos mis proyectos, por sacarme una sonrisa en momentos difíciles, por creer en mí y ser mi soporte, te agradezco por mucho pequeña.

A la Dra. Ana María Herrera por darme la oportunidad de realizar este trabajo bajo su dirección. Agradezco su paciencia en cada una de las revisiones de este trabajo y por compartirme su conocimiento y su amor por la ciencia. Agradezco por el tiempo y por los ánimos que me dio cuando los necesitaba, cada uno de los consejos y enseñanzas que me brindó seguirán conmigo.

A la Dra. Mari Carmen Reyes Angeles por compartir conmigo su conocimiento y experiencia dentro y fuera del laboratorio, por siempre apoyarme y motivarme a seguir adelante. Agradezco infinitamente por su amistad, paciencia y consejos, gracias por mostrarme que la resiliencia es parte importante de la ciencia y también de la vida.

Al Dr. Jesús García Serrano por su enseñanza durante la licenciatura y formar parte de mi comité, además agradezco el tiempo dedicado a la revisión de este trabajo.

A la Dra. Nayeli Trejo Carbajal por sus aportaciones enriquecedoras durante la elaboración de este trabajo y los consejos brindados durante este periodo.

A mis amigas Jaqui y Yos por hacer más divertidos todos los días en laboratorio y ser uno de mis soportes emocionales, su cariño y amistad me reconforta siempre, gracias por hacerme sentir acompañada durante todo el tiempo de desarrollo de este trabajo.

A mis compañeros y amigos de laboratorio Fernando, Lucy y Ricardo por su colaboración y disposición para compartir sus conocimientos conmigo, gracias por hacer mi estancia en el laboratorio de polímeros agradable y enriquecedora.

Agradezco especialmente a mis amigos Jesús y Fátima por su amistad y apoyo emocional durante esta etapa, ustedes son la muestra de que la amistad es duradera cuando se brinda con sinceridad, honestidad y lealtad. Los quiero mucho.

Finalmente agradezco a mis profesores de bachillerato el ingeniero Orlando Ángeles Mata y el Arquitecto Cesar Rocha por su entusiasmo por la enseñanza y motivarme con cada una de sus clases para encontrar mi vocación.

Índice

Participaciones derivadas	6
Distinciones	6
Símbolos y abreviaturas.....	7
Resumen	11
Objetivo general	12
Objetivos específicos	12
Antecedentes y marco teórico.....	13
1.1 Polímeros	13
1.1.1 Clasificación de los polímeros.....	13
1.1.2 Polielectrolitos	15
1.2 Carbón activado.....	17
1.2.1 Técnicas de activación.....	17
1.2.2 Propiedades físicas	18
1.2.3 Propiedades químicas.....	19
1.3 Aguas residuales	19
1.3.1 Parámetros indicadores de contaminación en efluentes textiles	20
1.3.2 Tratamiento de aguas residuales	20
1.4 Colorantes.....	22
1.4.1 Clasificación de los colorantes	23
Síntesis y caracterización de los materiales adsorbentes y sus precursores.....	25
Resumen	25
2.1 Equipos y técnicas de caracterización.....	25
2.1.1 Resonancia magnética nuclear RMN- ¹ H	25
2.1.2 Análisis de espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier. (FTIR). 25	
2.1.3 Calorimetría diferencial de barrido (DSC).	25
2.1.4 Análisis termogravimétrico (TGA).	25
2.1.5 Adsorción de N ₂	26
2.2 Reactivos y disolventes	26
2.3 Metodología experimental	27
2.3.1 Síntesis del monómero 2MAAP	27
2.3.2 Síntesis del polielectrolito poli(BMAEP-co-2MAAP)	28
2.3.3 Síntesis del carbón activado.....	28

2.3.4 Síntesis del material compósito	30
2.3.5 Calorimetría diferencial de barrido (DSC)	30
2.3.6 Extracción sol gel del polielectrolito	30
2.3.7 Punto de carga cero	31
2.3.8 Análisis termogravimétrico (TGA)	31
2.3.9 Densidad aparente	31
2.4 Discusión de resultados	31
2.4.1 Espectroscopia de resonancia magnética nuclear del monómero 2MAAP	31
2.4.2 Análisis de espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier del monómero 2MAAP	33
2.4.3 Temperatura de fusión por DSC.....	34
2.4.4 Porcentaje de sol gel.....	35
2.4.5 Punto de carga cero	35
2.4.6 Análisis de espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier. (FT-IR)	36
2.4.7 Análisis termogravimétrico	38
2.4.8 Parámetros texturales determinados por BET	40
2.4.9 Densidad aparente y pH_{PZC}	41
2.4.10 Análisis morfológico utilizando microscopía electrónica de barrido.....	41
Conclusiones.....	43
Adsorción y remoción de colorantes textiles	44
Resumen	44
3.1 Metodología experimental	44
3.1.1 Selección de colorantes textiles.....	44
3.1.2 Cuantificación de las concentraciones.....	46
3.1.3 Curvas de calibración	46
3.1.4 Adsorción estática.....	48
3.1.5 Cinética de adsorción	48
3.1.6 Isotermas de adsorción	49
3.1.7 Medición de parámetros de calidad del agua.....	49
3.2 Discusión de resultados	50
3.2.1 Porcentajes de adsorción estática	50
3.2.2 Cinética de adsorción	52
3.2.3 Construcción de isotermas de adsorción.....	56

3.2.3 Mejoramiento en la calidad del agua	59
Conclusiones.....	61
Anexos	62
Anexo 1. Participaciones derivadas.....	62
Referencias	66

Participaciones derivadas

- “Adsorción selectiva de colorantes textiles usando materiales sustentables a base de polianfolitos y carbón activado”. **En la modalidad de poster. 4° Congreso Estatal de Investigación en Ciencias de los Materiales.** Capítulo Estudiantil UAEH - Sociedad Mexicana de Materiales. Celebrado en el Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. 24 y 25 de abril 2025.
- “Selective adsorption of textile dyes using sustainable materials based on polyampholytes and activated carbon” as the **poster modality** in the **B5 Materials and the environment symposium 33rd international Materials Research Congress** held in Cancun, México from August 17th to 21st, 2025.

Distinciones

- **Segundo lugar** en la modalidad de poster de investigación. **4° Congreso Estatal de Investigación en Ciencias de los Materiales.** Capítulo Estudiantil UAEH - Sociedad Mexicana de Materiales. Celebrado en el Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. 24 y 25 de abril 2025.

Símbolos y abreviaturas

°C	Grados centígrados
2AP	2-aminopiridina
2MAAP	2-metacriloilamidopiridina
AB74	Índigo carmín
<i>Abs</i>	Absorbancia
<i>Abs_r</i>	Absorbancia real
<i>Abs_{r300}</i>	Absorbancia real a la concentración de 300 ppm
<i>a_e</i>	Adsorción al equilibrio
<i>a_m</i>	Capacidad de la monocapa
ATR	Reflectancia totalmente atenuada
AY73	Amarillo ácido
<i>b</i>	Longitud de la celda
BB3	Azul astrazón
BB9	Azul de metileno
BET	Brunauer, Emmett y Teller
BG4	Verde malaquita
BMAEP	bis[2-(metacriloiloxi)etil]fosfato
BV3	Cristal violeta
BY28	Amarillo oro maxilón
C	Concentración molar
C.I	Colour Index

C_f	Concentración final
C_i	Concentración inicial
cm	Centímetro
CQ	Canforquinona
CQN	Carbón químico de cascara de nuez
D_{AP}	Diámetro de poro
dm ³	Decímetro cúbico
DMSO	Dimetilsulfóxido
DP	Grado de polimerización
DQO	Demanda química de oxígeno
DSC	Calorimetría diferencial de barrido
DT86	Turquesa sirius
EDAB	4-dimetilaminobenzoato de etilo
F_d	Factor de dilución
FT-IR	Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier
g	gramos
H	Velocidad del proceso de adsorción
IUPAC	Unión Internacional de Química Pura y Aplicada
K_2	Constante de velocidad de pseudo segundo orden
K_L	Constante de Langmuir
L	Litro
m	masa

MET	Microscopia electrónica de barrido
mg	miligramos
min	minuto
mL	Mililitros
mm	milímetro
Mmol	milimolar
mS	miliSiemens
nm	Nanómetros
PAN	Poliacrilonitrilo
pH	Potencial de Hidrógeno
PHMB	polihexametileno biguanida
pH_{pzc}	Punto de carga cero
PP	Polipropileno
ppm	Partes por millón
PS	Poliestireno
PVC	Policloruro de vinilo
R²	Coeficiente de correlación
R_L	Factor de separación
RMN-¹H	Resonancia magnética nuclear de protón
S	segundos
S_{BET}	Superficie BET
TGA	Análisis termogravimétrico

THF	Tetrahidrofurano
TMS	Tetrametilsilano
u.a	Unidades de absorbancia
UV	Ultravioleta
V	Volumen
V _a	Volumen de agua
V _{ac}	Volumen de la alícuota
V _{MesoP}	Volumen de mesoporo
V _{TP}	Volumen total de poros
V _{μP}	Volumen de microporos
λ	Longitud de onda
ρ	densidad
ε	Coeficiente de extinción molar

Resumen

La presencia de colorantes en los desechos de la industria textil representa a uno de los mayores contaminantes hídricos. Este tipo de contaminantes afectan gravemente a los organismos acuáticos inhibiendo procesos fotosintéticos importantes, además, afectan la salud humana y provocan la escasez de agua. El tratamiento de aguas residuales anterior a su descarga se considera una de las opciones para evitar el deterioro de cuerpos de agua y prevenir la transmisión de enfermedades. Existen numerosos procesos de tratamiento de agua físicos y químicos. El carbón activado es uno de los materiales más utilizados debido a su capacidad de retener distintos contaminantes en su superficie, otros materiales importantes para esta aplicación son los polielectrolitos que por la presencia de grupos iónicos en su estructura pueden interactuar con especies iónicas muy diversas.

En el presente trabajo se realizó un nuevo material compuesto a partir de dos materiales adsorbentes importantes, los polielectrolitos y el carbón activado. Para la elaboración del carbón activado se utilizó como materia prima desperdicios vegetales de cosecha de nuez provenientes del Estado de Hidalgo con la finalidad de reutilizar y revalorizar desechos de la industria agrícola. La adición del polielectrolito de tipo anfolito permite combinar las propiedades adsorptivas de los materiales para aumentar la eficiencia de los tratamientos de aguas residuales y disminuir los costos de la producción de estos materiales lo que representa un beneficio para las industrias y el medio ambiente.

En el capítulo 1 de este trabajo se presentan los principios teóricos y antecedentes sobre las propiedades y aplicaciones de los materiales precursores para la elaboración del nuevo material compuesto. En el capítulo 2 se detalla la síntesis de cada uno de los materiales adsorbentes y su caracterización. En el capítulo 3 se describen los estudios cinéticos y las isothermas de adsorción relacionadas con soluciones ideales de colorantes textiles para finalmente aplicar el nuevo material compuesto en condiciones reales en una muestra de agua obtenida de una planta de lavado textil con el propósito de evaluar su eficiencia.

Objetivo general

Sintetizar y caracterizar nuevos materiales adsorbentes a partir de residuos agroindustriales y polielectrolitos para la remoción de colorantes en efluentes de la industria textil.

Objetivos específicos

- Sintetizar y caracterizar el monómero con grupos amino 2MAAP.
- Polimerizar el monómero por medio de técnicas de polimerización en masa para obtener un polielectrolito de tipo anfolito.
- Sintetizar el carbón activado a partir de cascara de nuez por activación química.
- Obtener materiales adsorbentes a partir del carbón activado y el polielectrolito.
- Caracterizar fisicoquímicamente los materiales adsorbentes por análisis termogravimétrico (TGA), adsorción de N_2 , densidad aparente y pH_{pzc} .
- Estudiar la capacidad adsortiva de los materiales en soluciones modelo mediante la construcción de isothermas de Langmuir y el estudio cinético.
- Utilizar los materiales adsorbentes para eliminar colorantes presentes en aguas residuales.
- Evaluar la calidad del agua posterior al tratamiento con los materiales adsorbentes para conocer su eficiencia.

Antecedentes y marco teórico

1.1 Polímeros

La investigación de los polímeros se considera una rama de la ciencia importante y con continuo crecimiento. En 1930 fue cuando la ciencia de los polímeros comenzó a surgir, más tarde vino el desarrollo de la tecnología de polímeros. Los polímeros representan una parte importante dentro del desarrollo de la humanidad y el avance tecnológico, hoy en día son considerados indispensables para los seres humanos, siendo utilizados para vestimenta, transporte y comunicación(1).

De acuerdo con el libro de oro de la IUPAC un polímero se define como una molécula de alta masa molecular relativa, cuya estructura comprende esencialmente la repetición múltiple de unidades monoméricas, real o conceptualmente, que son moléculas de baja masa molecular relativa. (2) En la figura 1.1 se muestra la estructura química del poliacrilonitrilo (PAN) y el monómero acrilonitrilo. Las unidades repetitivas que conforman a los polímeros son usualmente equivalentes a los monómeros y la longitud de la cadena es especificada por el grado de polimerización DP que se relaciona directamente con el monómero y el peso molecular del polímero. La unión entre las unidades monoméricas que componen al polímero se denomina cadena polimérica y puede ser de forma lineal, ramificada, entrecruzada o reticulada.

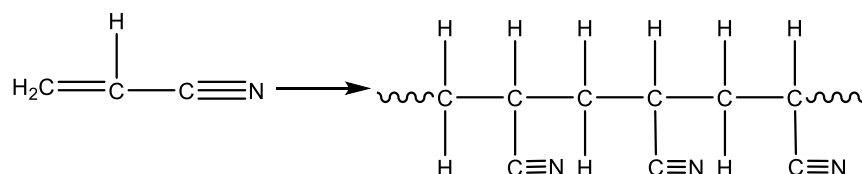


Figura 1.1 Estructura química del monómero acrilonitrilo y el polímero poliacrilonitrilo.

1.1.1 Clasificación de los polímeros

El estudio de las propiedades de los polímeros surgió después de comprender la relación entre la estructura, el peso molecular y la composición química, esto permitió clasificar a estos materiales en diferentes grupos. La versatilidad de los polímeros origina la existencia de diversas clasificaciones siendo las más relevantes y de interés para este proyecto las que son con respecto a su origen, su estructura, cantidad de monómeros, usos y costo producción.

1.1.1.1 Origen

La clasificación de polímeros de acuerdo con su origen se relaciona con la obtención de los polímeros o los monómeros ya sea de forma directa o utilizando métodos de síntesis o modificación química. Esta clasificación se subdivide en naturales, sintéticos y semi sintéticos

- **Naturales:** Son aquellos que se obtienen directamente de la de la naturaleza como resultado de procesos biológicos. Han sido los más utilizados debido a la facilidad de obtención. Algunos ejemplos de estos materiales son el caucho, la celulosa y las proteínas (3)
- **Sintéticos:** Estos polímeros son sintetizados a partir de reacciones químicas con la finalidad de obtener propiedades específicas. Como ejemplo podemos mencionar al poliestireno (PS), polipropileno (PP) y policloruro de vinilo (PVC). (3)
- **Semi sintéticos:** Se obtienen a partir de la modificación de polímeros naturales para otorgar o mejorar sus propiedades.

1.1.1.2 Estructura

De acuerdo con el acomodo de las cadenas poliméricas en el espacio los polímeros pueden clasificarse en tres categorías. (Figura 1.2)

- **Lineales:** En este tipo de polímeros cada monómero se conecta de extremo a extremo en una línea recta sin ramificación ni entrecruzamiento. (3)
- **Ramificados:** Son polímeros donde las cadenas se ramifican a partir de la cadena principal, las ramificaciones pueden ser cortas o largas y permiten la formación de una estructura similar a un árbol. (3)
- **Entrecruzados:** Las cadenas poliméricas se unen unas con otras formando una estructura reticulada.



Figura 1.2 Polímeros a) Lineales b) Ramificados c)Entrecruzados

1.1.1.3 Costo de producción

Este tipo de clasificación se relaciona con el costo de producción de los polímeros en función de las propiedades que se le confieren.

- **Commodities:** Se obtienen a través de procesos de síntesis sencillos y en volumen con niveles de producción y procesamiento muy altos lo que los vuelve materiales de bajo costo.
- **Polímeros de ingeniería:** Son polímeros con propiedades físicas y mecánicas superiores a los commodities pero con niveles de producción menores.
- **Polímeros de especialidad:** Este tipo de polímeros requiere de un diseño especializado con la finalidad de mejorar las propiedades para aplicaciones únicas. Su nivel de procesamiento y producción los vuelve de alto costo. (4)

1.1.1.4 Número de monómeros

Como se mencionó anteriormente, los polímeros son cadenas de monómeros unidos entre sí, de acuerdo con la cantidad de monómeros presentes en la estructura los polímeros se pueden clasificar en: (Figura 1.3)

- **Homopolímeros:** Se componen por un solo tipo de monómero. (5)
- **Copolímeros:** Poseen dos o más monómeros diferentes en su estructura. Las propiedades de estos materiales resultan de la combinación de los monómeros.

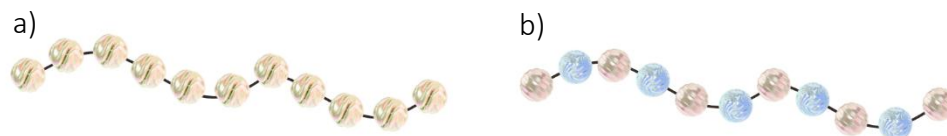


Figura 1.3 a) Homopolímeros b) Copolímeros

1.1.2 Polielectrolitos

Los polielectrolitos son un tipo de polímeros que presentan en su estructura grupos ionizables positivos o negativos (6) que pueden ser clasificados de acuerdo a su carga en catiónicos, aniónicos y anfóteros, suelen ser solubles en disolventes polares como el agua lo que permite la formación de poli-iones acompañados de un número equivalente de contra iones. Si el proceso de ionización no ocurre el polímero se comportará como un material no iónico. (7)

El comportamiento de las cadenas poliméricas de polielectrolitos es diferente a los polímeros no iónicos, las fuerzas de atracción o repulsión aumentan el movimiento y la expansión de la cadena modificando su volumen y sus propiedades, además se caracterizan por formar un campo electrostático a lo largo de toda la cadena provocado por la densidad iónica formada por los poli-iones y contra iones. (7)

1.1.2.1 Clasificación de los polielectrolitos

Existen diferentes grupos ionizables que permiten el comportamiento electrostático en los polielectrolitos, con respecto al tipo de iones en su estructura los polielectrolitos se clasifican en:

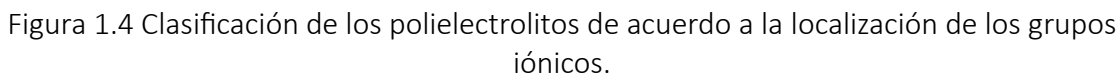
- **Poliácidos:** Grupos ácidos o aniónicos.
- **Polibásicos:** Grupos básicos o catiónicos.
- **Polianfóteros:** Combinación de grupos ácidos y básicos en diferentes proporciones.

Conforme a la literatura, algunos ejemplos de polielectrolitos básicos son la poli(vinil amina) y la poli(4-vinilpiridina) y de polielectrolitos ácidos el ácido poliacrílico y copolímeros hidrolizados del anhídrido maleico. (1)

Otra clasificación de los polielectrolitos es con respecto a la localización de los grupos iónicos dentro de la estructura de la cadena.

- **Colgante:** Los grupos se encuentran en secciones de cadena emergentes de la cadena principal.

- En la Figura 1.4 se presenta una ilustración que describe los tipos de polielectrolitos con respecto a la clasificación antes mencionada.



La interacción con superficies o moléculas con cargas opuestas están relacionadas con las interacciones electrostáticas en las soluciones con polielectrolitos. La combinación de las propiedades poliméricas y el comportamiento ionizable les confieren a los polielectrolitos diversas propiedades útiles como sensibilidad al pH y a la cantidad y tipo de electrolitos presentes en la solución. (8) De acuerdo con las propiedades de los polielectrolitos estos pueden ser utilizados en productos farmacéuticos, biomedicina, medicina, ingeniería del petróleo, cosméticos, industrias de alimentación y papel, tratamiento de agua, etc. (9) siendo esta última la de interés para este proyecto de investigación.

Se han reportado en la literatura diversos polielectrolitos de tipo básico con grupos amina en su estructura como lo es el polihexametileno biguanida (PHMB) (Figura 1.5), que además de la interacción electrostática entre iones sus cinco aminas conjugadas facilitan un fuerte enlace de hidrógeno intermolecular y permiten la formación de micelas por sus segmentos hidrofílicos e hidrofóbicos. (10)



| 16

de la combinación del cloruro de poli(dimetildialilamonio) (PolyDADMAC) y sulfonato de poliestireno donde los grupos amonio crean una red catiónica y los grupos sulfonato mejoran la hidrofobicidad. (11)

Una de las desventajas de los polielectrolitos es su solubilidad en medios acuosos, sin embargo, se han presentado diversas investigaciones acerca del soporte de electrolitos sobre otros materiales sólidos. La polietilenimina exhibe una gran capacidad de adsorción para metales debido a la alta densidad de grupos funcionales unidos a una cadena polimérica flexible y su adhesión sobre sílice permite inmovilizar las moléculas de polielectrolito y evitar su presencia en el medio acuoso. (12)

En el presente trabajo es de interés utilizar como soporte carbón activado no solo con la finalidad de evitar la presencia del polímero en la solución acuosa sino de combinar las propiedades adsorptivas de cada material para aumentar su eficiencia.

1.2 Carbón activado

El carbón activado es un producto del proceso de descomposición pirolítica de materiales a base de carbono que se caracteriza por poseer una gran porosidad, alta área superficial y una estructura microcristalina. Los carbones activados están compuestos por microcristales que consisten en anillos hexagonales formados por átomos de carbono que se acoplan en el espacio formando hojas o laminas, los carbones activados se distinguen del grafito por la distancia que existe entre los planos cristalinos, 0.335 nm para el grafito y un intervalo de 0.34 a 0.35 nm para los carbones activados. (13)

La preparación de los carbones activados involucra dos etapas importantes, la carbonización y la activación, la primera se desarrolla en un rango de temperatura de 400 a 600 °C en una atmósfera deficiente de oxígeno y facilita la remoción de compuestos volátiles de bajo peso molecular, posteriormente la activación se logra térmicamente mediante el uso de gases ácidos o básicos a más de 800°C y permite la formación de microporos y el incremento de las propiedades adsorptivas en el carbón (14).

1.2.1 Técnicas de activación

La activación es un proceso que forma una gran estructura porosa que muestra una gran área superficial, de acuerdo con el agente activador este método puede dividirse en físico, químico y fisicoquímico.

El método de activación física consiste en convertir los productos precarbonizados por medio de temperatura y una atmósfera oxidativa como CO₂, O₂ o aire (15).

Para la activación química se realiza una impregnación de los materiales precursores con soluciones de ácido fosfórico (25%), hidróxido de potasio (5%), hidróxido de sodio (5%), cloruro de calcio (25%) y cloruro de zinc (25%) (16). Durante este proceso ocurren reacciones de oxidación y deshidratación que aumentan la formación de microporos.(15) Posteriormente se someten a una temperatura entre 450°C y 900°C.

Todos los materiales que posean en su composición química una gran cantidad de carbono pueden ser transformados en carbones activados, sin embargo, las propiedades del

producto final serán diferentes dependiendo de la naturaleza de la materia prima utilizada, la naturaleza del agente activador y las condiciones de los procesos de carbonización y activación. (13)

1.2.2 Propiedades físicas

Una de las principales propiedades físicas de los carbones activados es su porosidad que se relaciona con su alta área superficial. Esta característica ha permitido que el carbón activado sea uno de los materiales más utilizados para los tratamientos de adsorción. La porosidad es creada durante el proceso de carbonización de un precursor orgánico por la eliminación de las moléculas volátiles, así como la eliminación de átomos de hidrogeno, nitrógeno y oxígeno. Como resultado, se obtiene una estructura de esqueleto de átomos de carbono que se unen entre sí para formar posiciones de máxima estabilidad. La estructura porosa del carbón es dependiente de la temperatura del tratamiento. El acomodo de los átomos de carbono después del tratamiento se basa en el concepto de una red continua de átomos unidos de manera lineal a lo largo de toda la estructura donde existen los microporos y mesoporos. (17)

La relación entre el tamaño de los poros y el área superficial describe a los carbones activados como materiales con una estructura polidispersa. El área superficial se define como la suma total del área que aporta cada uno de los poros a la estructura del carbón. Los poros se dividen en tres grupos: microporos, mesoporos y macroporos, de acuerdo con la IUPAC el tamaño de cada uno de los poros es: microporos <2 nm, mesoporos 2-50 nm y macroporos >50 nm. Los microporos generalmente tienen un volumen de poro de 0.15 a 0.70 cm^3/g y aportan aproximadamente el 95% del área superficial. Los mesoporos poseen un volumen de 0.1 y 0.2 cm^3/g , el área superficial de estos poros no excede el 5%. (14) La mesoporosidad funciona como transporte del adsorbente hacia el interior del carbón para llegar a los microporos donde ocurre la adsorción. (17) Finalmente, los macroporos no representan una contribución considerable al área superficial. (13) En la Figura 1.6 se describen los diferentes tamaños de poro presentes en el carbón activado.

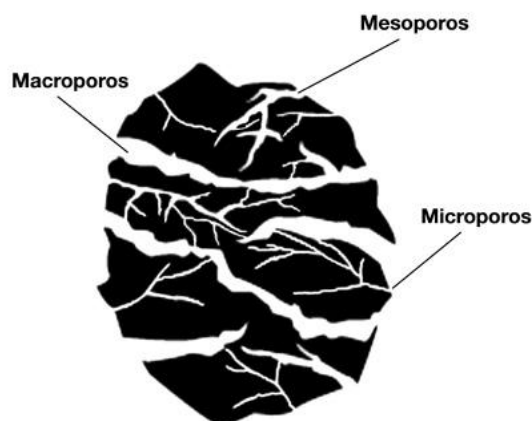


Figura 1.6 Tipos de poros presentes en el carbón activado.

1.2.3 Propiedades químicas

La adsorción sobre carbón activado está definida por sus propiedades físicas, sin embargo, esta altamente influenciada por interacciones químicas entre el adsorbato y el adsorbente. Las fuerzas que generalmente se presentan en la adsorción en la superficie del carbón activado son de tipo Van der Waals. En los carbones activados existen variaciones anisotrópicas por la presencia de diferentes capas de carbono que causan una alteración en la disposición de los electrones.

La composición elemental de los carbones activados es aproximadamente 88% C, 6-7% O, 1% S, 0.5% N, y 0.5% H. Los heteroátomos representan una parte fundamental en la carga superficial del carbón, sin embargo, el oxígeno se considera el heteroátomo más importante debido a la cantidad de funcionalidades que puede presentar. (18)

- **Grupos funcionales ácidos:** El carácter ácido de la superficie se logra por carbonizaciones a temperaturas entre 200 y 700°C con atmósfera de oxígeno. El carácter ácido de los carbones activados se atribuye principalmente a los grupos ácidos superficiales, como los grupos de ácido carboxílico, lactona, fenol y fosfato. (18) Los tratamientos aplicados a los materiales a base de carbono para su activación pueden ser oxidantes líquidos o atmósferas controladas que pueden mejorar la presencia de grupos funcionales fenólicos, COOH y carbonilo. (19)
- **Grupos funcionales básicos:** Los grupos que contienen oxígeno como los derivados de cromeno y pirona, los grupos dicetona o quinona, así como las aminas pueden ser responsables de la basicidad en los carbones activados. (19)

1.3 Aguas residuales

Se considera agua residual a cualquier tipo de agua cuya calidad ha sido modificada por la presencia de contaminantes. Muchas de las actividades humanas generan residuos que pueden afectar negativamente a los cuerpos de agua como ríos, lagos y mares. De acuerdo con la procedencia de los residuos se pueden clasificar en tres grupos: agricultura, industria y domésticos. (20). Uno de los recursos de mayor demanda en todo el planeta es el agua, sin embargo, la escasez de agua potable se ha convertido en un problema mundial que requiere atención urgente. En los últimos años se han desarrollado nuevas técnicas para la remediación de aguas residuales haciendo énfasis en la búsqueda y utilización de materiales ecológicos. (21)

Existen diferentes tipos de contaminantes en las aguas residuales que se pueden clasificar en:

- **Contaminantes físicos:** Los contaminantes físicos incluyen el color, la turbidez, la temperatura y espuma. Están provocados principalmente por la presencia de sólidos suspendidos que afectan la estética del agua y además pueden inhibir el proceso de fotosíntesis e interferir en la respiración de seres vivos acuáticos. (22)
- **Contaminantes químicos:** Este tipo de contaminantes pueden clasificarse en orgánicos e inorgánicos. (22)

- **Contaminantes biológicos:** Pueden dividirse en dos categorías, aquellos que representan un problema de salud pública por la transmisión de enfermedades y los crecimientos biológicos. (22)

1.3.1 Parámetros indicadores de contaminación en efluentes textiles

La complejidad y el tipo de tratamiento para las aguas residuales depende en gran medida de la cantidad de efluente y la calidad del agua deseada después del tratamiento. Los parámetros que permiten evaluar el nivel de contaminación en aguas residuales se relacionan con el tipo de contaminantes.

- **Color:** Se relaciona con la presencia de sustancias disueltas en el agua. Los colorantes son ampliamente utilizados en la industria textil, cosmética, farmacéutica, alimentaria etc. Lo que provoca grandes cantidades de aguas residuales teñidas. (23) La coloración en el agua puede ser descrita por el color verdadero y el color aparente. El color aparente se refiere a aquel que considera las sustancias en solución y en suspensión. El color verdadero se obtiene después de realizar tratamientos como centrifugación o filtración para eliminar la turbiedad provocada por sólidos disueltos. (24)
- **Turbiedad:** Es causada por la cantidad total de sólidos presentes en los efluentes. Los sólidos totales incluyen sólidos disueltos, en suspensión o sedimentables. El contenido de sólidos en las aguas residuales se determina evaporando el agua y pesando el residuo. (25)
- **pH:** Cuantifica la cantidad de iones hidrógeno disueltos en solución y su relación en la acidez o alcalinidad de la solución. (26) De acuerdo con la escala de pH, soluciones con valores inferiores a 7 se consideran ácidas, superiores a 7 básicas o alcalinas y con valores iguales a 7 se considera una solución neutra.
- **Conductividad:** Se relaciona con la cantidad de cationes disueltos en la solución y la cantidad de descomposición y mineralización de los materiales orgánicos presentes en el agua. (26)
- **Demanda química de oxígeno (DQO):** Se utiliza para cuantificar los contaminantes orgánicos con respecto a la cantidad de oxígeno requerida para la oxidación de estos compuestos. (26) El oxígeno disuelto (OD) es un componente fundamental para la vida submarina por lo que la disminución de OD representa un problema que influye negativamente. (27)

1.3.2 Tratamiento de aguas residuales

El tratamiento de aguas residuales es un proceso complejo que tiene como objetivo mejorar la calidad del agua, se lleva a cabo en diferentes etapas que involucran procesos físicos, químicos y biológicos. El tratamiento comienza con la etapa preliminar donde se utilizan equipos de trituración para homogeneizar el tamaño de los residuos sólidos, posteriormente se realiza una separación por diferencia de densidades para eliminar las partículas sólidas. Durante esta etapa del proceso se utilizan técnicas de coagulación-floculación y sedimentación. Las primeras etapas del tratamiento de aguas residuales son principalmente físicas. Después de la etapa de clarificación se realiza el tratamiento secundario donde por medio de reactores se elimina la mayor cantidad de carga orgánica

expresada en DQO. (25) Finalmente, la tercera etapa del tratamiento describe a los procesos de desinfección del agua por medio de tratamientos biológicos. (21)

1.3.2.1 Coagulación-floculación

La coagulación-floculación es una de las técnicas de tratamiento de agua más antigua que ha evolucionado con el tiempo hasta alcanzar procesos más sofisticados. En 1949 Langelier y Ludwig propusieron una nueva teoría de doble capa e inmersión. Años después estos mecanismos fueron llamados coagulación y floculación. El proceso de aglomeración se relaciona con el predominio de las partículas sobre las fuerzas repulsivas y la floculación con las partículas atrapadas en los precipitados formados.(28) El mecanismo de coagulación floculación comienza con la adición de un coagulante que posee una carga opuesta a la de las partículas coloidales lo que provoca su desestabilización, posteriormente se añade un floculante que permite la formación de macro flóculos a través de la interacción entre el floculante y múltiples partículas. (29)

Este tratamiento no permite eliminar a los patógenos presentes en el agua, sin embargo, es un proceso que remueve gran parte de la materia orgánica que puede proteger a los patógenos de la eliminación química o térmica. (30)

La industria textil es una de las fuentes de mayor contaminación pluvial debido a la presencia de contaminantes orgánicos e inorgánicos como surfactantes, sales, sólidos suspendidos, colorantes e inhibidores. (31) El proceso de eliminación de residuos a través de coagulación-floculación ha sido ampliamente utilizado como pretratamiento por sus resultados y bajo costo. La elección de coagulantes y floculantes representa una parte importante de la remediación de aguas residuales, existen coagulantes naturales como la *Moringa oleifera*, el *Cactus latifera* y semillas de *Trigonella foenum-graecum* (28) o coagulantes químicos como los polímeros catiónicos sintéticos, sales metálicas prehidrolizadas y sales metálicas hidrolizables. (29)

1.3.2.2 Electroquímicos

La eliminación de contaminantes disueltos en el agua es una limitante para procesos de remediación física por lo que es necesario aplicar procesos electroquímicos que permiten eliminar eficazmente los contaminantes mediante la mineralización de los compuestos no biodegradables. A lo largo de los años se han estudiado este tipo de procesos por su versatilidad y amabilidad con el medio ambiente por su baja producción de lodos residuales. (32). Los procesos electroquímicos consisten en la aplicación de un potencial eléctrico controlado para inducir reacciones químicas como la oxidación, reducción y electrocoagulación con la finalidad de facilitar la degradación de compuestos orgánicos e inorgánicos. Las reacciones químicas se llevan a cabo en electrodos que están elaborados de grafito, titanio o acero inoxidable dependiendo la aplicación. (33) La eficiencia de los procesos de electroquímica depende de múltiples parámetros, incluidos el pH, la elección del electrodo, la duración de la operación y la densidad de corriente. (33)

Existen diferentes mecanismos electroquímicos que se clasifican de acuerdo con la técnica electroquímica en:

- **Electroflotación:** En esta técnica se generan burbujas de H en el electrodo sumergido, estas burbujas se unen a los contaminantes metálicos y forman flóculos que emergen a la superficie, finalmente son separados mediante filtración. (34)
- **Electrocoagulación:** Se aplica una corriente eléctrica para producir coagulantes in-situ, los flóculos se forman por la disolución de ánodos de sacrificio. (33) (34)
- **Electrodeposición:** Se utiliza una celda electrolítica que consiste en un ánodo y un cátodo en donde se desarrollan procesos de oxidación y reducción y se consigue que los iones metálicos se depositen sobre la superficie del cátodo. (34)

1.3.2.3 Tratamientos biológicos

En la actualidad se utilizan procesos de limpieza de tipo físico, químico y biológico de manera simultánea para lograr una mayor eficiencia y mejores resultados en cuanto a la remediación de aguas residuales, sin embargo, los procesos biológicos tienen el potencial para ser más eficaces y menos perjudiciales para el medio ambiente debido a que implican la degradación y utilización de materia orgánica y nutrientes como el nitrógeno y el fósforo a través del metabolismo microbiano. (35)

Los tratamientos biológicos pueden dividirse en dos clasificaciones que se relacionan con la naturaleza de los microorganismos. (36)

- **Aeróbicos:** Requiere de oxígeno para la degradación de contaminantes
- **Anaeróbicos:** Ocurre sin oxígeno y utiliza métodos como la fermentación para la degradación.

1.4 Colorantes

Un colorante es una sustancia capaz de conferir color a un sustrato a través de la difusión de moléculas individuales a las fibras. Un colorante se caracteriza por su color intenso, su solubilidad en agua y sustantividad. Los colorantes pueden adherirse a las fibras por interacciones iónicas, Van der Waals y covalentes. La adhesión del colorante y las fibras dependerá de la naturaleza química del sustrato, cada textil tiene una estructura específica y diferentes grupos funcionales para interactuar y formar enlaces. Del mismo modo, en función de los grupos cromóforos presentes en las moléculas de tinte y sus estructuras químicas, existen diferentes tipos de tintes, como los colorantes ácidos y los colorantes básicos. (37)

Los colorantes están constituidos por dos principales componentes:

- **Auxocromos:** Son grupos funcionales dentro del colorante que permiten la interacción con las fibras del sustrato. Pueden ser de naturaleza ácida o básica, algunos ejemplos de estos grupos funcionales son grupos amino primarios, secundarios y terciarios ($-\text{NH}_2$, $-\text{NHCH}_3$ y $-\text{N}(\text{CH}_3)_2$) o grupos hidroxilo ($-\text{OH}$).
- **Cromóforos:** Se consideran como grupos que generan color ya que de acuerdo con su estructura absorben cierta parte del espectro electromagnético de la región uv-visible. Algunos ejemplos de estos grupos son el nitro, nitroso y azo.

1.4.1 Clasificación de los colorantes

1.4.1.1 Procedencia

De acuerdo con su procedencia los colorantes se dividen en:

- **Naturales:** Son encontrados en la naturaleza de forma directa, pueden ser orgánicos o inorgánicos. La mayoría se encuentran en plantas e insectos y requieren de un procesamiento mínimo para su obtención.
- **Sintéticos:** Son sintetizados a escala industrial con características específicas.

1.4.1.2 Colour Index

El uso de colorantes naturales se vio limitado por la gama de colores que estos ofrecían. A partir del siglo XIX comenzó la aparición de los primeros colorantes sintéticos y para finales del siglo existían al menos 1000 colorantes diferentes. (38) En 1924 la sociedad de colorantes y coloristas (CDC) publicó el primer Colour Index y un suplemento en 1928 con la finalidad de ofrecer una clasificación estándar para químicos y comerciantes. La parte uno describe a los colorantes en función de sus aplicaciones y matiz espectral mientras que en la segunda se clasifican a los colorantes con respecto a su estructura química. (39) El código del C.I se conforma de 2 letras para indicar la clasificación de acuerdo a su uso y 2 números para referirse a su estructura química.

1.4.1.3 Aplicación

Los colorantes pueden clasificarse según su aplicación, esto permite identificar el colorante más adecuado para las necesidades industriales como:

- **Textiles:** Es una de las principales industrias consumidoras de colorantes. Existen diferentes clasificaciones conforme al tipo de aplicación del colorante a la fibra textil. (40)
 - **Directos:** Se aplican directamente a los textiles sin la necesidad de agentes fijadores, se caracterizan por la unión física en la superficie de la fibra. (40)
 - **Reactivos:** Su aplicación requiere procesos más complejos debido a la formación de enlaces covalentes entre el colorante y la fibra. Se caracterizan por ser más duraderos y menos sensibles al lavado. (41)
 - **Dispersos:** Son insolubles en agua por lo que se utilizan en sustratos hidrofóbicos, requieren de altas temperaturas y presiones para su aplicación. (41)
 - **Básicos:** Son solubles en agua y promueven la formación de cationes que son atraídos por las cargas negativas del sustrato.
 - **Ácidos:** Al igual que los colorantes básicos. Los colorantes ácidos son altamente solubles en agua y se caracterizan por la formación de aniones que se unen a la superficie promovidos por fuerzas de Van der Waals. (40)
- **Alimentarias:** Se utilizan para generar atractivo visual a los alimentos, pueden ser naturales como la cúrcuma o la clorofila o sintéticos como el amarillo número 5 o el rojo número 40. Este tipo de colorantes deben ser no tóxicos y compatibles con el ser humano.

- **Cosméticas y farmacéuticas:** Son aquellos empleados en tintes para el cabello, maquillaje como esmaltes de uñas y formulaciones farmacéuticas para la identificación de medicamentos.
- **Imprenta:** Contienen pigmentos disueltos en disolventes orgánicos, se utilizan para diversas aplicaciones de impresión, como empaques, etiquetas y publicidad.
- **Biológicas:** Permiten el análisis microscópico de organismos para su identificación un ejemplo de ellos son el cristal violeta y el yodo de Gram.

1.4.1.4 Estructura química

Las propiedades de los colorantes están relacionadas directamente con su estructura química. La absorción y emisión de ciertas regiones del espectro electromagnético determina su color característico. La energía aportada por la radiación provoca la excitación electrónica donde un electrón se desplaza desde un nivel de baja energía a uno de alta energía, los grupos que presentan este fenómeno se conocen como cromóforos y se caracterizan por ser covalentemente insaturados como $C=C$, $C\equiv C$, $C=O$, $C\equiv N$, $N=N$, NO_2 . El color obtenido de cada colorante depende de la naturaleza del cromóforo para absorber energía de la radiación de la región visible. Por otro lado, los auxocromos son grupos que constan de uno o más pares de electrones no enlazados que contribuye a la variación de la longitud de onda provocando un efecto batocrómico o hiperocrómico. (42) (43) En la Figura 1.7 se muestran algunos de los grupos funcionales presentes en los cromóforos.

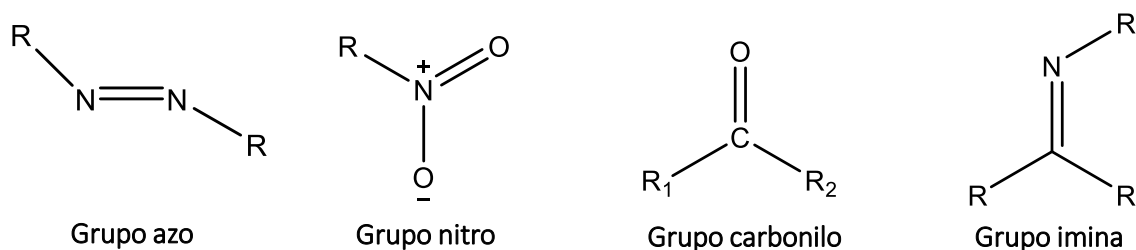


Figura 1.7 Principales grupos cromóforos presentes en colorantes.

Síntesis y caracterización de los materiales adsorbentes y sus precursores

Resumen

En este capítulo se detalla la metodología experimental utilizada para la síntesis del monómero 2MAAP, el polianfolito poli(BMAEP-co-2MAAP), el carbón activado CQN y el material compósito CQN-poli(BMAEP-co-2MAAP). El monómero fue obtenido por una reacción de sustitución nucleofílica acíclica. La síntesis del polielectrolito se llevó a cabo por fotopolimerización vía radicales libres. La activación química del carbón se realizó con ácido fosfórico a 400°C con una rampa de calentamiento de 5°C/min y el material compuesto (CQN-poli(2MAAP-co-BMAEP)) se obtuvo utilizando 70% del CQN y 30% en peso del polielectrolito poli(2MAAP-co-BMAEP). La estructura del 2MAAP, se elucidó por espectroscopia FTIR y RMN de ^1H , la caracterización fisicoquímica de CQN, poli(2MAAP-co-BMAEP) y el compuesto (CQN-poli(2MAAP-co-BMAEP)) se realizó por FTIR, TGA y adsorción de N_2 . Finalmente, se presentan los resultados relacionados con los rendimientos de reacción y caracterización de los materiales adsorbentes.

2.1 Equipos y técnicas de caracterización

2.1.1 Resonancia magnética nuclear RMN- ^1H . Los espectros RMN ^1H se obtuvieron en un espectrofotómetro de resonancia magnética nuclear BRUKER AscendTM 400 MHz. Se empleó cloroformo (CDCl_3) como disolvente y tetrametilsilano (TMS) como referencia interna. El desplazamiento químico (δ) se reporta en partes por millón (ppm), y las constantes de acoplamiento (J) se expresan en Hertz. La multiplicidad de las señales en el espectro se indica de la siguiente manera: s para señal simple, d para señal doble, t para señal triple y m para señal múltiple.

2.1.2 Análisis de espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier. (FTIR). Los espectros de FTIR fueron obtenidos en un espectrofotómetro Perkin Elmer modelo Frontier acoplado a un accesorio de reflectancia totalmente atenuada (ATR) con una resolución espectral de 4 cm^{-1} .

2.1.3 Calorimetría diferencial de barrido (DSC). El análisis de calorimetría diferencial de barrido se realizó en un equipo Mettler Toledo DSC822^e con crisoles de aluminio y en atmósfera de N_2 .

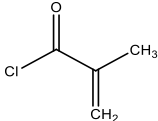
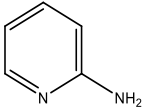
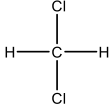
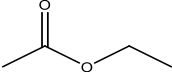
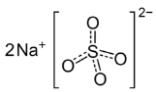
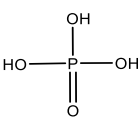
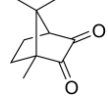
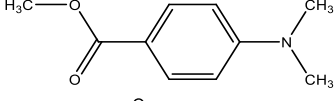
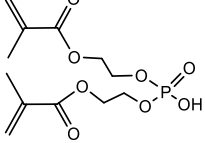
2.1.4 Análisis termogravimétrico (TGA). El análisis termogravimétrico se realizó en un equipo Mettler Toledo TGA/SDTA 851^e acoplado a un horno estándar y crisoles de alúmina

de 60 μL con tapa, bajo una atmosfera de N_2 con flujo de 80 mL/min. El tratamiento de datos de pérdida de peso con respecto a la temperatura se realizó con el software Stare SW 12.10.

2.1.5 Adsorción de N_2 . Para el estudio de parámetros texturales se utilizó un equipo micromeritics ASAP 2020 utilizando la función de adsorción física de N_2 por el método volumétrico con un rango de medición de 0.35 a 50 nm para microporos y mesoporos. Los datos fueron procesados por el software ASAP 2020 y los resultados de superficie específica se obtuvieron por el método BET (Brunauer, Emmett y Teller).

2.2 Reactivos y disolventes

Tabla 2.1 Reactivos y disolventes utilizados durante la síntesis de los materiales adsorbentes

Nombre	Fórmula	Marca	Estructura
Cloruro de metacrililo	$\text{C}_4\text{H}_5\text{ClO}$	Sigma Aldrich	
2-aminopiridina	$\text{C}_5\text{H}_6\text{N}_2$	Sigma Aldrich	
Tetrahidrofurano	$\text{C}_4\text{H}_8\text{O}$	Química alvi	
Diclorometano	CH_2Cl_2	Química alvi	
Acetato de etilo	$\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2$	Química alvi	
Sulfato de sodio anhidro	Na_2SO_4	Meyer	
Ácido fosfórico	H_3PO_4	Meyer	
Canforquinona	$\text{C}_{10}\text{H}_{14}\text{O}_2$	Sigma Aldrich	
4-dimetilaminobenzoato de etilo	$\text{C}_{11}\text{H}_{15}\text{NO}_2$	Sigma Aldrich	
Bis[2-(metacrililoiloxi)etil]fosfato	$\text{C}_{12}\text{H}_{19}\text{O}_8\text{P}$	Sigma Aldrich	

2.3 Metodología experimental

2.3.1 Síntesis del monómero 2MAAP

Se obtuvo el monómero 2-metacrililoilamidopiridina utilizando una relación estequiométrica de 1 a 1.2 moles de cloruro de metacrililo y 2-aminopiridina respectivamente y tetrahidrofurano como disolvente (Figura 2.1).

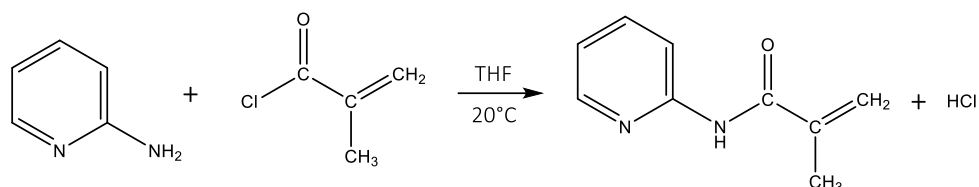


Figura 2.1. Síntesis del monómero 2-metacrililoilamidopiridina.

En un matraz de fondo redondo, provisto de un agitador magnético se adicionaron 0.5 g (5.31×10^{-3} moles) de 2-aminopiridina, 0.4324 mL (4.4325×10^{-3} moles) de cloruro de metacrililo y 10 mL de tetrahidrofurano. Durante la adición del cloruro de metacrililo el matraz se colocó en un baño de hielo. Posteriormente la reacción se llevó a cabo a temperatura ambiente con agitación constante por 24 horas.

Durante la reacción se formó un precipitado de color blanco que se separó del producto por decantación. Para poder aislar la mayor cantidad de monómero, el sólido se disolvió en una solución de hidróxido de amonio y se extrajo el monómero remanente con diclorometano, manteniendo el subproducto en la fase acuosa (clorhidrato de amino piridina) y el monómero 2-metacrililoilamidopiridina en la fase orgánica. Después se adicionó 1 g de sulfato de sodio anhidro en la fase orgánica para eliminar el exceso de agua.

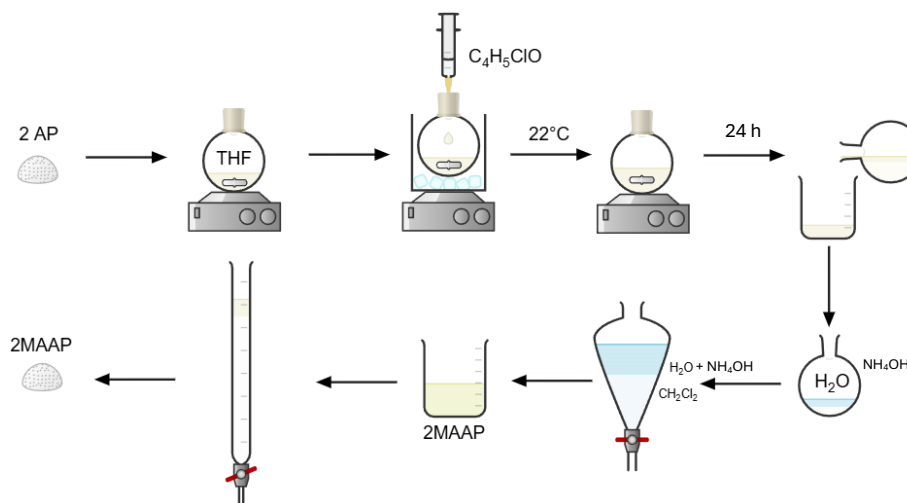


Figura 2.2. Esquema del proceso de reacción y purificación del monómero 2MAAP.

Posteriormente, se purificó el monómero por columna cromatográfica utilizando como fase estacionaria sílica y como fase móvil una mezcla de disolventes con proporción 1:1 hexano:acetato de etilo, después se evaporó el disolvente y el monómero se secó usando flujo de aire continuo. El proceso de síntesis se describe gráficamente en la Figura 2.2.

El rendimiento de la síntesis del monómero 2-metacrililamidopiridina fue de 32.16 % (0.2132 g). **RMN¹H**: (400 MHz, CDCl₃) δ (ppm); 8.85 (1H, s, H5), 8.32 (1H, dd, $J_m=1.0$, $J_o=8.3$, H1), 8.25 (1H, H4), 7.74 (1H, dd, $J_m=1.8$, $J_o=7.6$, H3), 7.06 (1H, ddd, $J_p=0.8$, $J_m=5.0$, $J_o=7.6$, H2), 5.91 (1H, H7'), 5.54 (1H, H7), 2.15 (3H, s, H6) Figura 23. **FT-IR**: (cm⁻¹); 3228 (ν NH), 1629 (ν C=C_{Metacrílico}), 1672 (ν C=O amida I), 1510 (δ N-H_{amidall}), 1430 (δ C-H en el plano), 1296 (ν C-N_{amidall}), 940 (δ C-H fuera del plano).

2.3.2 Síntesis del polielectrolito poli(BMAEP-co-2MAAP)

Para la síntesis del polielectrolito poli(BMAEP-co-2MAAP) se utilizó la técnica de polimerización en masa con un sistema fotoiniciador de 1:2 % en peso de canforquinona/4-dimetilaminobenzoato de etilo (CQ/EDAB) respectivamente. (Figura 2.3)

La fotopolimerización del polielectrolito poli(BMAEP-co-2MAAP) se realizó mezclando 500 mg del monómero 2MAAP, 993.4 mg de BMAEP, 44.79 mg (0.26 mmol) de CQ y 104 mg (0.53 mmol) de EDAB. Posteriormente se colocó la mezcla frente a una lámpara de fotopolimerización Bluephase® (Ivoclar-Vivadent) durante 120 s.

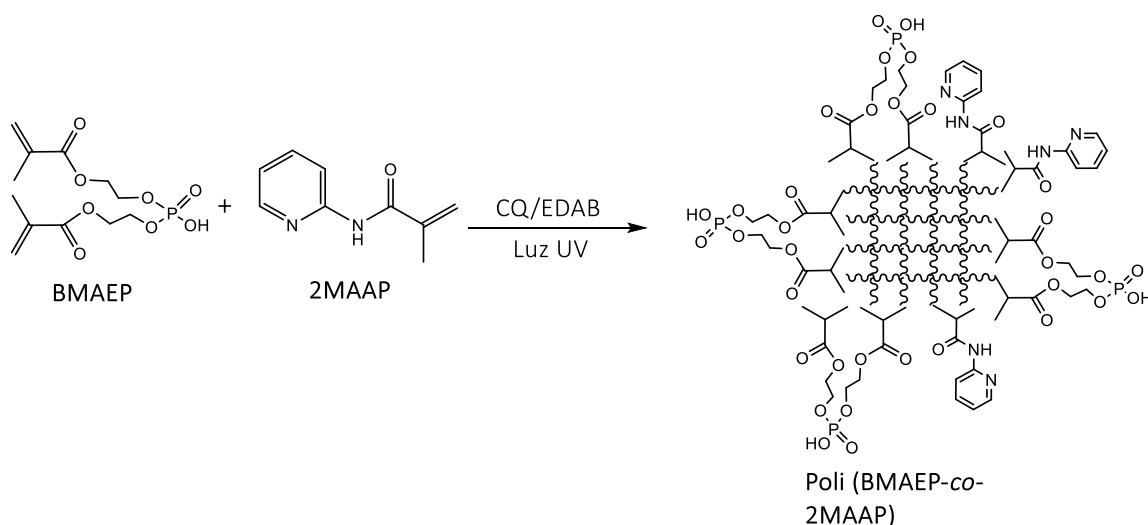


Figura 2.3. Síntesis del polielectrolito poli(BMAEP-co-2MAAP).

2.3.3 Síntesis del carbón activado

El carbón activado fue sintetizado a partir de cáscara de nuez, la activación del carbón se llevó a cabo químicamente con la finalidad de obtener diferentes grupos funcionales en la superficie.

Se utilizó una cantidad de 15 g de cáscara de nuez, como primer paso, se colocó la cáscara de nuez en inmersión en 60 mL de ácido fosfórico concentrado al 87% durante 24 horas, posteriormente se filtró con la finalidad de retirar la mayor cantidad de ácido, después se colocó en la mufla con una rampa de calentamiento de 5°C por minuto hasta alcanzar los 400°C. Una vez alcanzada la temperatura de 400°C se mantuvo durante una hora, posteriormente se enfrió dentro de la mufla hasta temperatura ambiente. (Figura 2.5)

Se realizaron 3 lavados de 30 min en 150 mL de agua cada uno en el ultrasonido. Una vez concluidos los lavados, se secó dentro de la estufa a 80°C durante 2 horas.

El carbón activado fue triturado para controlar el tamaño de partícula, se obtuvieron 2 fracciones, una con un tamaño de partícula menor a 0.25 mm y otra de 0.25mm a 0.4mm. Finalmente, el rendimiento de la síntesis del carbón activado químicamente fue de 49.60%. El esquema de la obtención del carbón activado químicamente se muestra en la Figura 2.4.

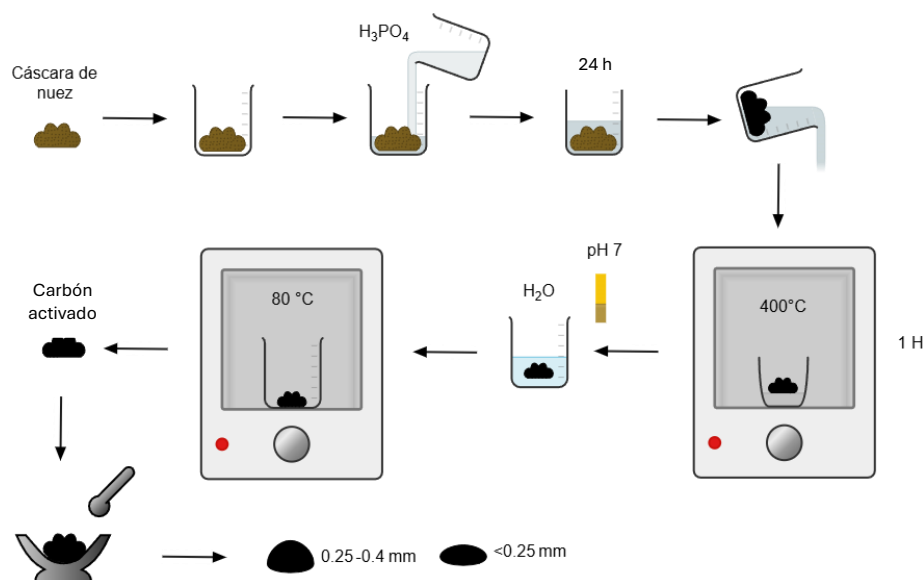


Figura 2.4. Esquema de obtención del carbón activado

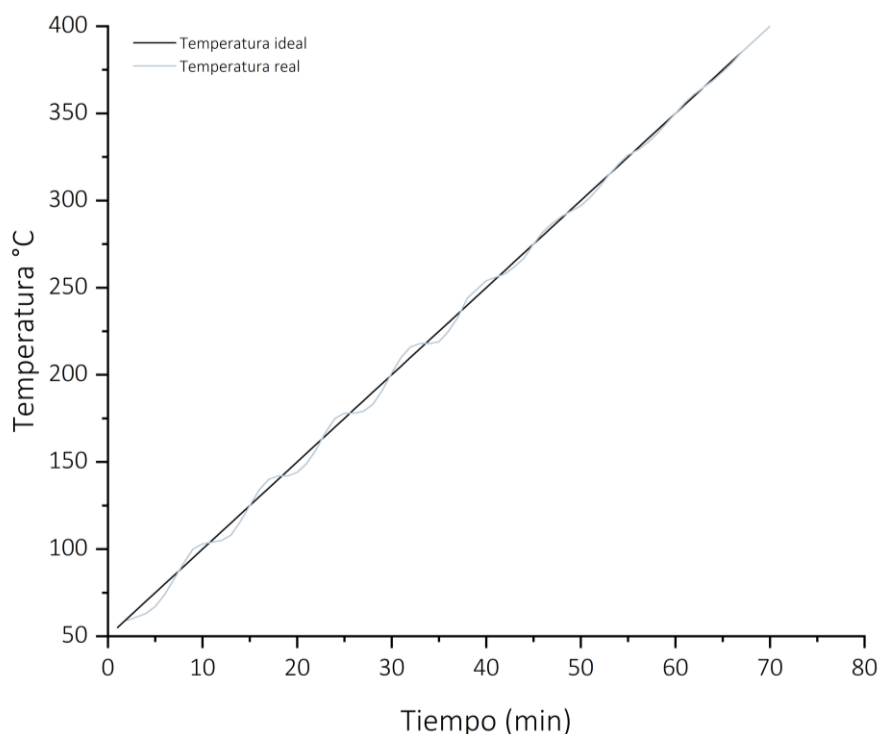


Figura 2.5 Rampa de calentamiento para el material CQN.

2.3.4 Síntesis del material compuesto

Para el desarrollo del material compuesto, se mezcló el carbón activado y los monómeros 2MAAP y BMAEP con una proporción de 70 y 30 % en peso del total respectivamente. Los monómeros 2MAAP y BMAEP se utilizaron en concentración equimolar (1:1 moles). Finalmente se adicionó un sistema fotoiniciador conformado por canforquinona y EDAB en la proporción 1% y 2% en peso con respecto al peso de los monómeros. En la tabla 2.2 se muestra la proporción de las materias primas.

Tabla 2.2 Concentración de las materias primas para la formación del material compuesto

Carbón activado	Monómeros	Sistema fotoiniciador	
70% en peso	30% en peso	CQ	EDAB
1293 mg	556.50 mg	1% en peso	2% en peso
		5.40 mg	11.06 mg

En un vidrio de reloj, se mezclaron 1293 mg de carbón activado con 371.1 mg de BMAEP (1.1419 mmol). Posteriormente, se solubilizaron 185 mg de 2MAAP (1.1419 mmol) en 2 mL de diclorometano los cuales se añadieron a la mezcla, después, se incorporó el sistema fotoiniciador, compuesto por 5.40 mg de CQ (1% en peso) y 11.06 mg de EDAB (2% en peso). La mezcla se integró durante 1 minuto y se distribuyó uniformemente sobre la superficie del vidrio, después se colocó otro vidrio de reloj sobre la mezcla y se irradió con una lámpara de fotopolimerización Bluephase® (Ivoclar-Vivadent) durante 120 s, alternando ambas caras del vidrio de reloj.

2.3.5 Calorimetría diferencial de barrido (DSC)

Esta técnica de caracterización permite identificar la temperatura de fusión del monómero 2MAAP. El experimento se registró de 25°C a 90°C con una rampa de calentamiento de 3°C /min y una masa de 7.31 mg del monómero 2MAAP. Como referencia se utilizó un crisol de aluminio vacío.

2.3.6 Extracción sol gel del polielectrolito

El copolímero fue triturado y pesado, posteriormente se colocó en un vial con 10 mL de etanol y se mantuvo en agitación durante 24 horas.

Se obtuvieron 2 fases, una líquida denominada sol y una sólida denominada gel. La parte sólida se separó de la parte líquida por decantación, finalmente el sólido fue secado en una estufa de vacío a presión reducida durante 24 horas.

Para calcular el porcentaje de gel se utilizó la ecuación 2.1 con respecto al sólido remanente y se determinó el porcentaje de monómero sin reaccionar por diferencia de pesos, la fase sol o material soluble corresponde al monómero sin reaccionar y oligómeros de bajo peso molecular.

$$\%gel = \frac{mg_{antes\ de\ la\ extracción}}{mg_{después\ de\ la\ extracción}} \quad \text{Ecuación (2.1)}$$

2.3.7 Punto de carga cero

El punto de carga cero pH_{pzc} permite determinar la carga en la superficie del polímero. Para determinar el pH_{pzc} se utilizaron 11 viales con 15 mL de solución de NaCl 0.1 M, se ajustó el pH de cada uno de los viales entre 2 a 12 con soluciones de HCl y NaOH 0.1 N, posteriormente se añadió una muestra de 25 mg de polímero y se mantuvieron en agitación y temperatura constante durante 48 horas. Se repitió la metodología antes descrita para determinar el pH_{pzc} del carbón activado y el material compósito utilizando 20 mL de solución de NaCl 0.1 M y una muestra de 60 mg de CQN y CQN-poli(BMAEP-co-2MAAP) respectivamente.

2.3.8 Análisis termogravimétrico (TGA)

El análisis termogravimétrico del polielectrolito se realizó utilizando una masa de 9.8 mg con una rampa de calentamiento de 10 °C/min en un rango de 25 a 800 °C. Este análisis nos permite identificar la estabilidad térmica del polímero, así como las diferentes pérdidas de masa relacionadas con las etapas de degradación.

Se realizó el análisis termogravimétrico de los materiales CQN y CQN-poli(BMAEP-co-2MAAP) con una masa de 14.86 mg y 14.94 mg respectivamente con una rampa de calentamiento de 10°C/min en un rango de 25 a 800°C. Este análisis nos permite conocer la diferencia entre la estabilidad térmica del CQN y el CQN-poli(BMAEP-co-2MAAP).

2.3.9 Densidad aparente

La densidad aparente es aquella que considera la cantidad de masa presente en un volumen conocido incluyendo poros, huecos y espacios entre partículas. Para determinar la densidad aparente se colocó el carbón activado en un matraz con un volumen de 1 cm³, el material fue distribuido, compactado y se midió su masa.

El cálculo de la densidad aparente se realizó con la ecuación 2, donde ρ es la densidad en g/cm³, m es la masa del polímero y V es el volumen ocupado por el material.

$$\rho = m/V \quad \text{Ecuación (2.2)}$$

Se repitió el mismo procedimiento para calcular la densidad aparente del material adsorbente.

2.4 Discusión de resultados

2.4.1 Espectroscopia de resonancia magnética nuclear del monómero 2MAAP

El monómero 2MAAP fue obtenido como un sólido con un rendimiento del 32.16%. En la Figura 2.6 se muestra el espectro de RMN-¹H de la materia prima 2AP en el cual se observan 4 señales en el intervalo de 6.2 a 8.2 ppm que integran para los cuatro protones pertenecientes al anillo aromático, además de una señal en 4.6 ppm que corresponde a los dos protones del grupo amina.

La Figura 2.7 muestra el espectro de RMN-¹H del monómero 2MAAP donde se observan en un rango de 6.75 a 8.5 ppm las señales que corresponden a los cuatro protones del anillo aromático, en 8.85 ppm se encuentra la señal del protón del grupo amida, en el desplazamiento de 2.15 ppm aparece una señal que pertenece a los tres protones del metilo,

finalmente entre 5.75 y 6 ppm se observan dos señales de los protones del doble enlace del grupo metacrílico.

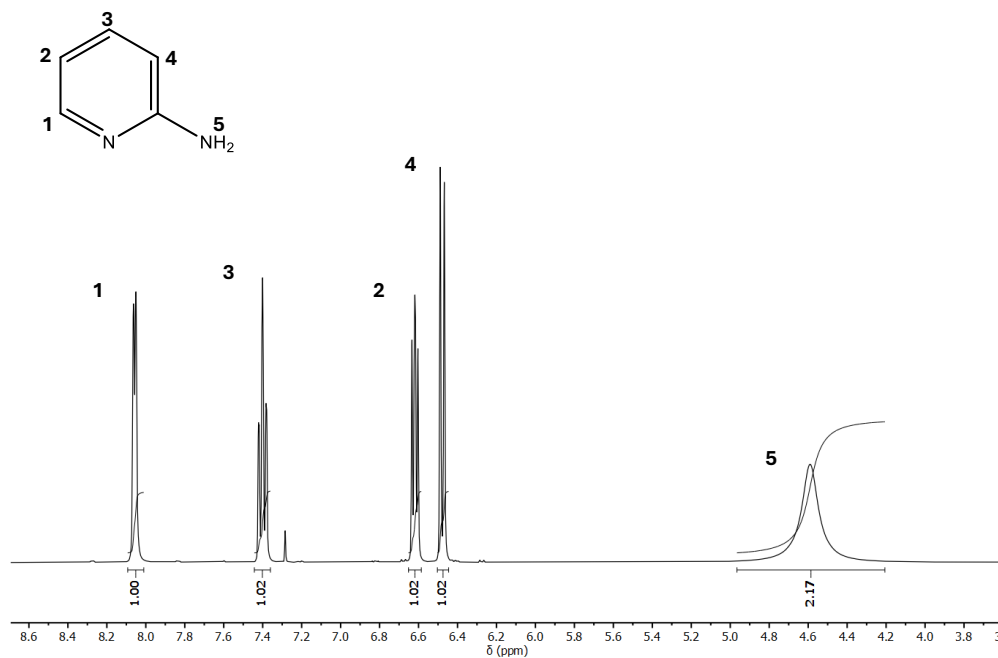


Figura 2.6 Espectro de RMN- ^1H de la materia prima 2-aminopiridina.

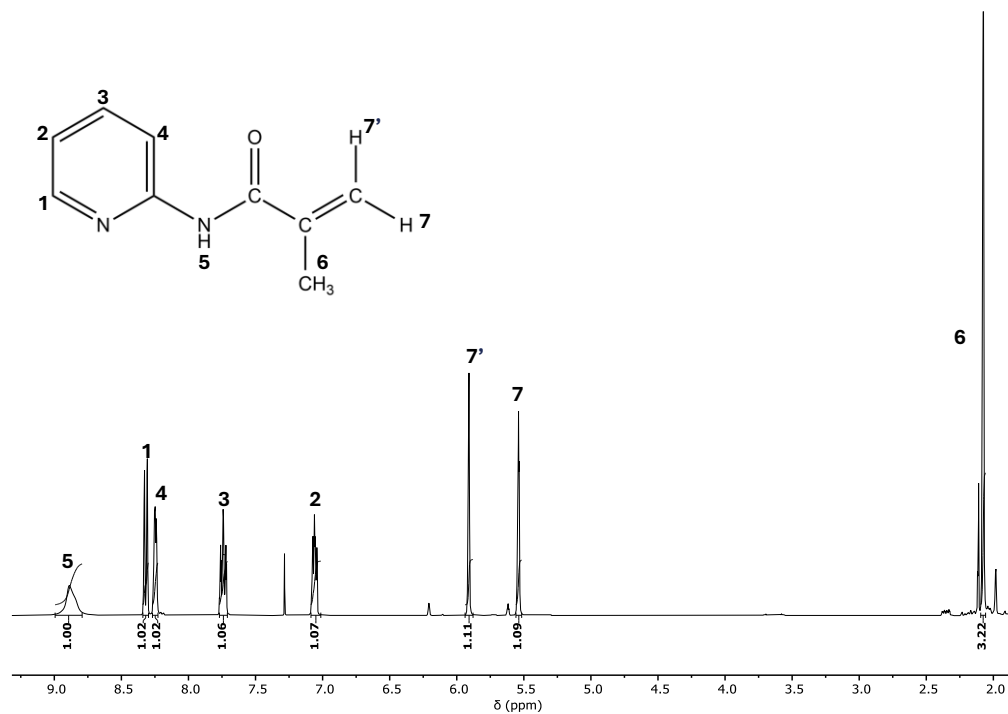


Figura 2.7 Espectro de RMN- ^1H del monómero 2-metacrililamidopiridina.

2.4.2 Análisis de espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier del monómero 2MAAP

En el espectro de FT-IR de la 2-aminopiridina podemos identificar las principales bandas de absorción de los grupos funcionales amina.

La Figura 2.8 muestra el espectro FT-IR correspondiente a la 2-aminopiridina. Se observan las tres bandas características del movimiento de vibración de la amina primaria ($\nu\text{N-H}_2$); en 3442 cm^{-1} atribuida al movimiento de elongación asimétrico y 3288 cm^{-1} para el movimiento de elongación simétrico y en 1624 cm^{-1} se encuentra la banda de vibración $\delta\text{N-H}$ que describe el movimiento de deformación. Asimismo, en 1595 cm^{-1} y 1559 cm^{-1} se observan dos bandas de absorción para la vibración del anillo aromático $\nu\text{C}=\text{C}_{\text{ar}}$ y $\nu\text{C}=\text{N}_{\text{ar}}$, respectivamente. Finalmente, en 1276 cm^{-1} se encuentra la banda de absorción que corresponde al movimiento de elongación del enlace $\nu\text{C-N}$ entre el anillo aromático y nitrógeno del grupo amina.

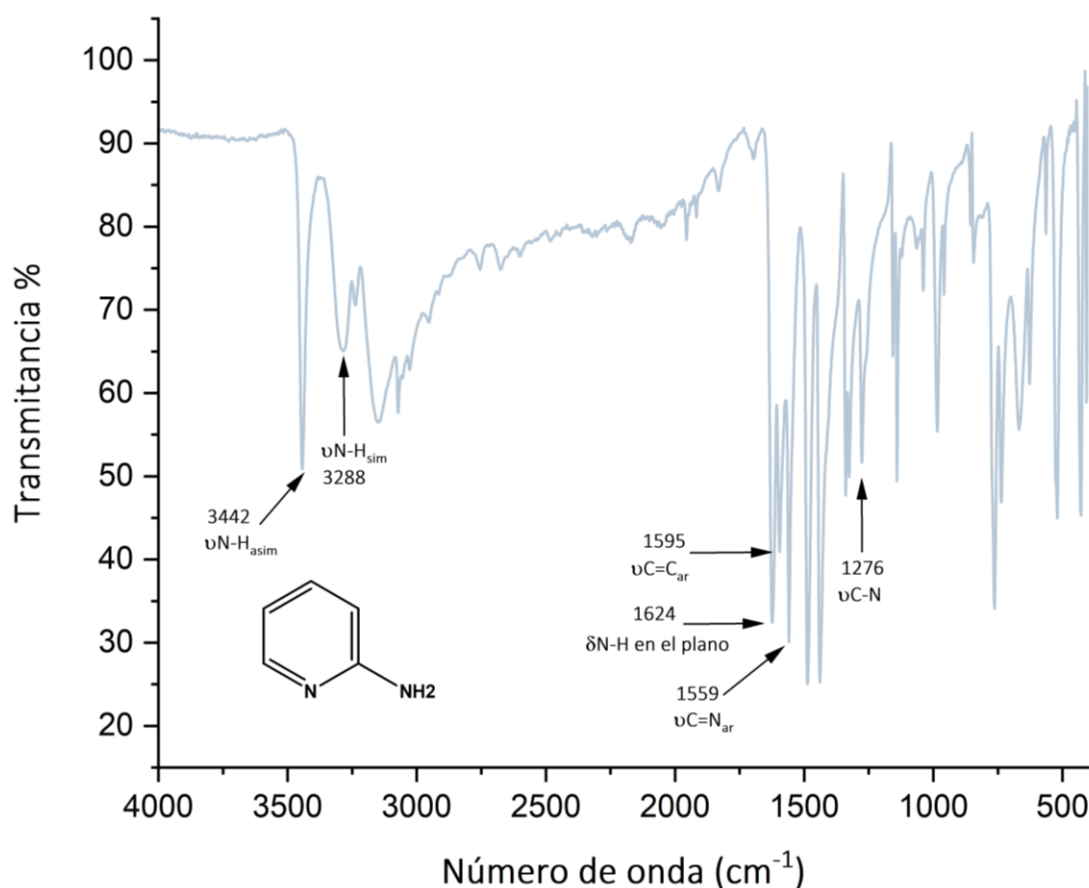


Figura 2.8 Espectro FT-IR de la materia prima 2-aminopiridina.

La síntesis del monómero 2MAAP se realizó a partir de la reacción de sustitución nucleofílica acíclica entre la 2-aminopiridina y el cloruro de metacriloilo, por lo que la principal evidencia de la formación del monómero es la ausencia del grupo amina primaria (NH_2) y la presencia del grupo amida (RCONH) en el monómero 2-metacriloilamidopiridina.

En la Figura 2.9 se muestra el espectro FT-IR del monómero 2MAAP. Se observa la banda característica en 3228 cm^{-1} de la vibración de $\nu\text{N-H}$ de amida que describe el movimiento de elongación, en 1672 cm^{-1} se encuentra la banda asociada a la vibración $\nu\text{C=O}$ (amida I), en 1510 cm^{-1} la banda del movimiento de deformación de $\delta\text{N-H}$ (amida II) y a 1296 cm^{-1} la banda de la vibración $\delta\text{C-N}$ (amida III). Además, en 1430 cm^{-1} y 940 cm^{-1} se observan dos bandas que corresponden a la vibración $\delta\text{C-H}$ en el plano y fuera del plano respectivamente, en 1629 cm^{-1} se visualiza una banda de absorción atribuida al movimiento de elongación $\nu\text{C=C}$ que pertenece al del doble enlace terminal metacrílico, finalmente en 1576 cm^{-1} se encuentra la banda que se atribuye al movimiento de elongación $\delta\text{C=C}$ que corresponde al anillo aromático.

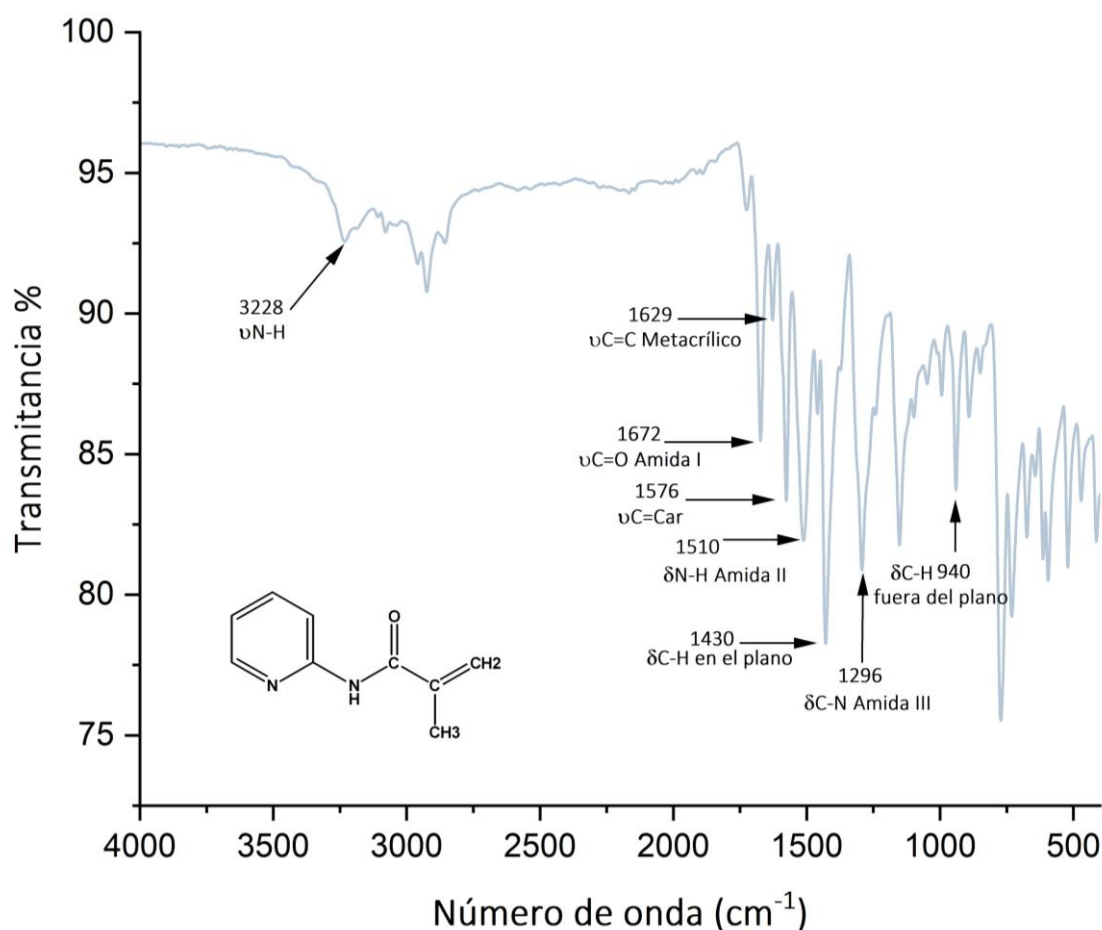


Figura 2.9 Espectro FT-IR del monómero 2MAAP

2.4.3 Temperatura de fusión por DSC

De acuerdo el diagrama de calorimetría diferencial de barrido de la Figura 2.10 el monómero 2MAAP funde a los 46°C y tiene una pureza del 93%.

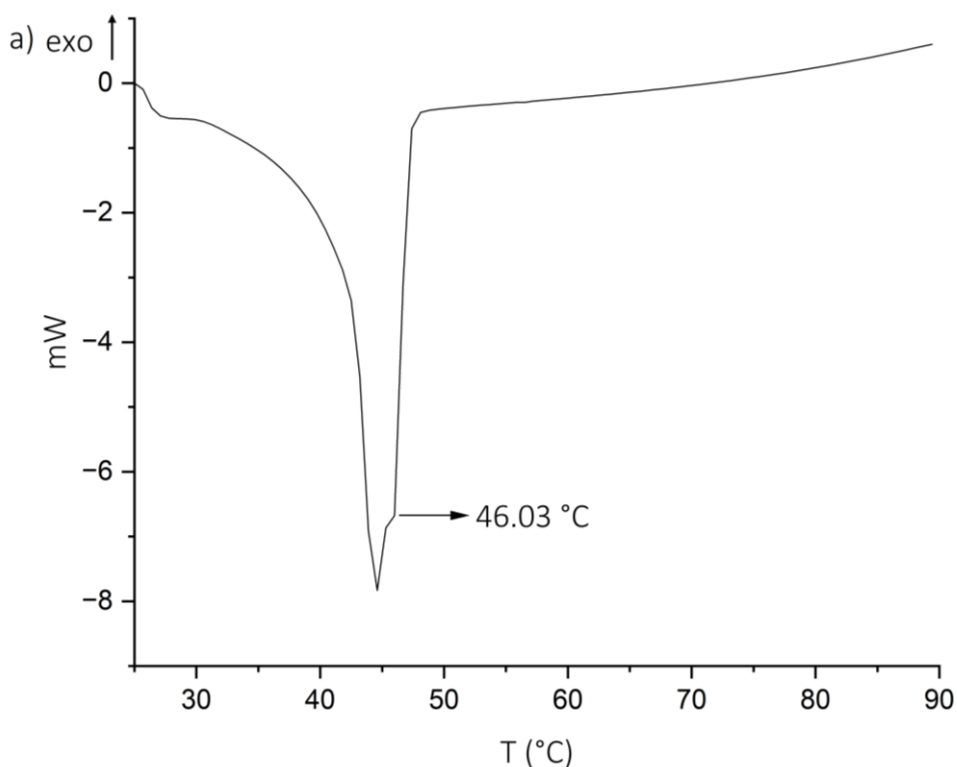


Figura 2.10 Termograma del monómero 2MAAP.

2.4.4 Porcentaje de sol gel

De acuerdo con las pruebas de solubilidad el monómero 2MAAP es soluble en cloroformo, diclorometano, etanol, metanol, acetona y DMSO e insoluble en agua, por lo que se seleccionó etanol como disolvente durante la extracción sol-gel del polielectrolito.

El polielectrolito (BMAEP-co-2MAAP) presentó un porcentaje del 85% de gel en un tiempo de 120 s de reacción, se ha reportado que por la alta velocidad de reacción de polimerización este tiempo de fotopolimerización es el óptimo para alcanzar la formación de la red polimérica (8).

2.4.5 Punto de carga cero

El punto de carga cero (pH_{pzc}) para el copolímero poli(BMAEP-co-2MAAP) es de 3.14, lo que indica que el polielectrolito posee una superficie de carácter ácida, esto se debe a la presencia predominante de grupos fosfato en la estructura del copolímero. El punto de carga cero (pH_{pzc}) de los materiales adsorbentes fue de 2.18 para el CQN y 2.0 para el compuesto CQN-poli(BMAEP-co-2MAAP). Estos valores demuestran que la superficie de ambos materiales es de carácter ácido y puede ser atribuido al tratamiento de activación con ácido fosfórico y la formación de una capa de poli(BMAEP-co-2MAAP) en el caso del compuesto CQN-poli(BMAEP-co-2MAAP).

2.4.6 Análisis de espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier. (FT-IR)

En la figura 2.12 se comparan los espectros de FT-IR de la materia prima cáscara de nuez CN y el carbón activado CQN. Para el espectro de la materia prima CN se identificaron las bandas de absorción correspondientes a los movimientos de elongación del enlace C-H asimétrico en 2923 cm^{-1} y simétrico en 2851 cm^{-1} , además del movimiento de elongación de C=C del anillo aromático a 1665 cm^{-1} . Finalmente, las bandas de absorción en 1066 cm^{-1} y 1031 cm^{-1} se asignaron al movimiento de elongación de C-C y C-O respectivamente. De acuerdo con el espectro de la materia prima CN se identifican las bandas que corresponden a enlaces característicos de la materia lignocelulósica de la que está formada el precursor CN. En la Figura 2.11 se muestran las estructuras químicas de los componentes de la masa lignocelulósica. Para el espectro del carbón activado CQN se observa la ausencia de las bandas antes mencionadas que corresponde a la materia orgánica del precursor y la aparición de 3 bandas que corresponden al ácido fosfórico utilizado durante la activación. En 1568 cm^{-1} se observa una banda atribuida al movimiento de elongación del enlace $\nu\text{P=O}$, en 1173 cm^{-1} una banda para el movimiento de elongación de $\nu\text{P-O-C}$ y finalmente una banda en 983 cm^{-1} que se asignó al enlace P-O debido al movimiento de elongación.

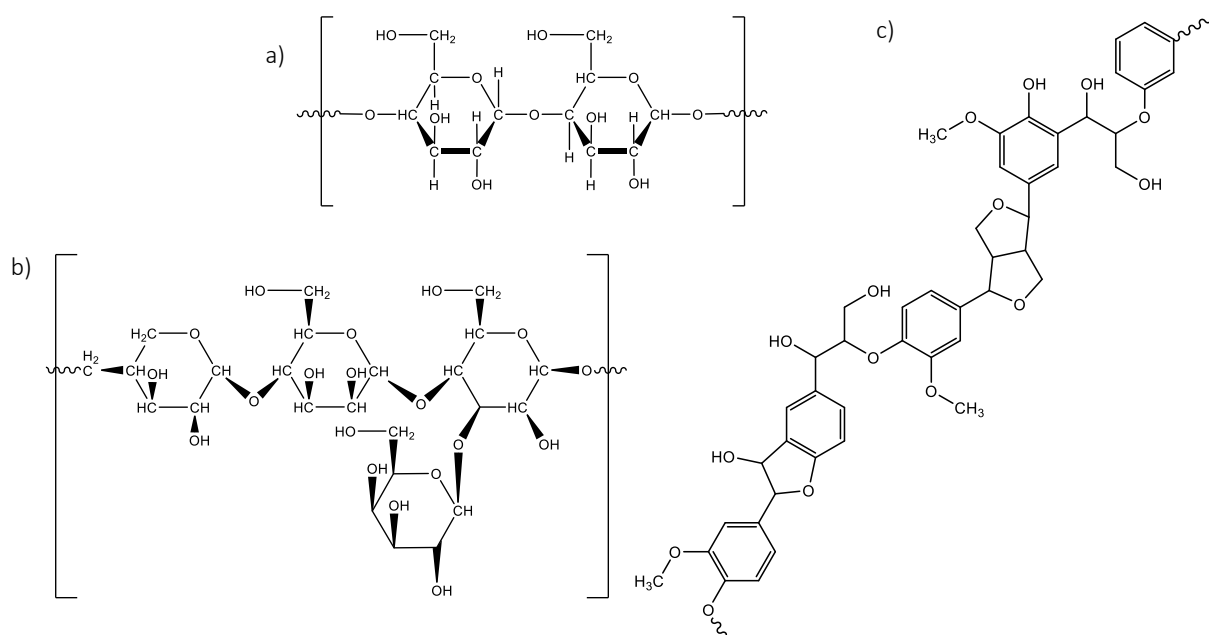


Figura 2.11 Estructura química de los componentes de la materia lignocelulósica a) celulosa b) hemicelulosa y c) lignina.

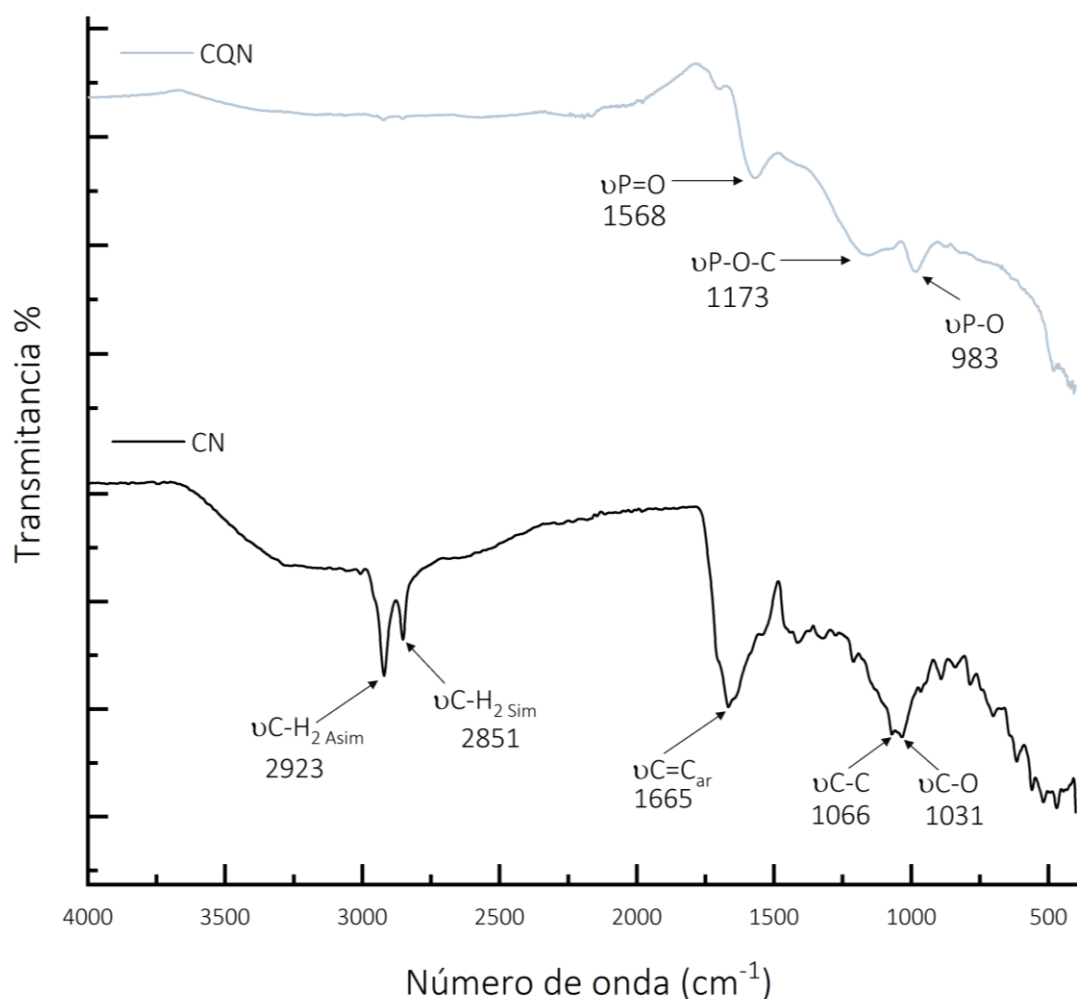


Figura 2.12 FT-IR del carbón activado CQN y el precursor cáscara de nuez CN.

Durante la formación del material compuesto CQN-poli(BMAEP-co-2MAAP) se formó una capa superficial del polímero poli(BMAEP-co-2MAAP). Se comprobó la formación de esta película con la comparación de los espectros FT-IR del CQN y el CQN-poli(BMAEP-co-2MAAP) en la Figura 2.13. En el espectro del compuesto CQN-poli(BMAEP-co-2MAAP) se observan dos bandas de vibración en 1158 y 976 cm^{-1} debidas al movimiento de elongación de los enlaces P-O-C y P-O respectivamente que corresponden a los grupos ácidos presentes en el polímero poli(BMAEP-co-2MAAP) y el ácido fosfórico utilizado durante la activación. Además, en 1694 cm^{-1} se encuentra la banda del movimiento de elongación $\nu\text{C}=\text{O}$ (Amida I), en 1582 cm^{-1} la banda del movimiento de deformación N-H (Amida II) y en 1292 cm^{-1} la banda del movimiento de deformación del enlace C-N (Amida III) que se adjudican al grupo amida del polímero poli(BMAEP-co-2MAAP).

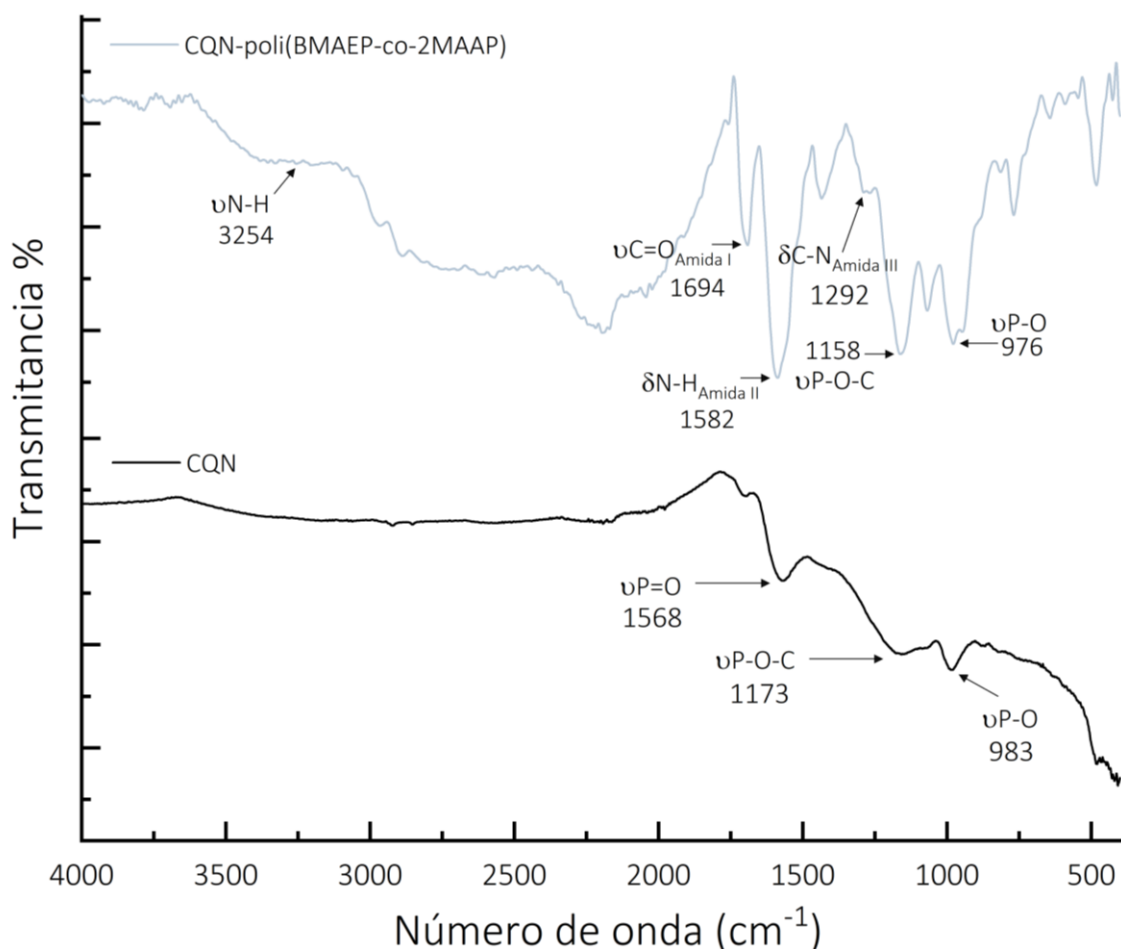


Figura 2.13 Espectros FT-IR del compuesto CQN-poli(BMAEP-co-2MAAP) y el carbón CQN.

2.4.7 Análisis termogravimétrico

Se realizó el análisis termogravimétrico del poli(BMAEP-co-2MAAP) para conocer su estabilidad térmica y temperatura de descomposición. De acuerdo con el termograma se identificaron tres eventos térmicos relacionados con la descomposición del polianfolito.

En la figura 2.14 se observa el termograma donde se determinó una pérdida de peso que comienza en 29 °C y termina en 104°C atribuida a agua ocluida dentro de la red polimérica, posteriormente ocurre una pérdida del 52 % que comienza en 151°C y termina en 464°C que corresponde a la eliminación de los grupos fosfato, por último, transcurre una pérdida que comienza en 477°C hasta la temperatura final del experimento 800°C que se atribuye a la ruptura aleatoria de las cadenas poliméricas. Al final del experimento se recuperó una masa de carbón residual que corresponde al 30.74% de la muestra inicial.

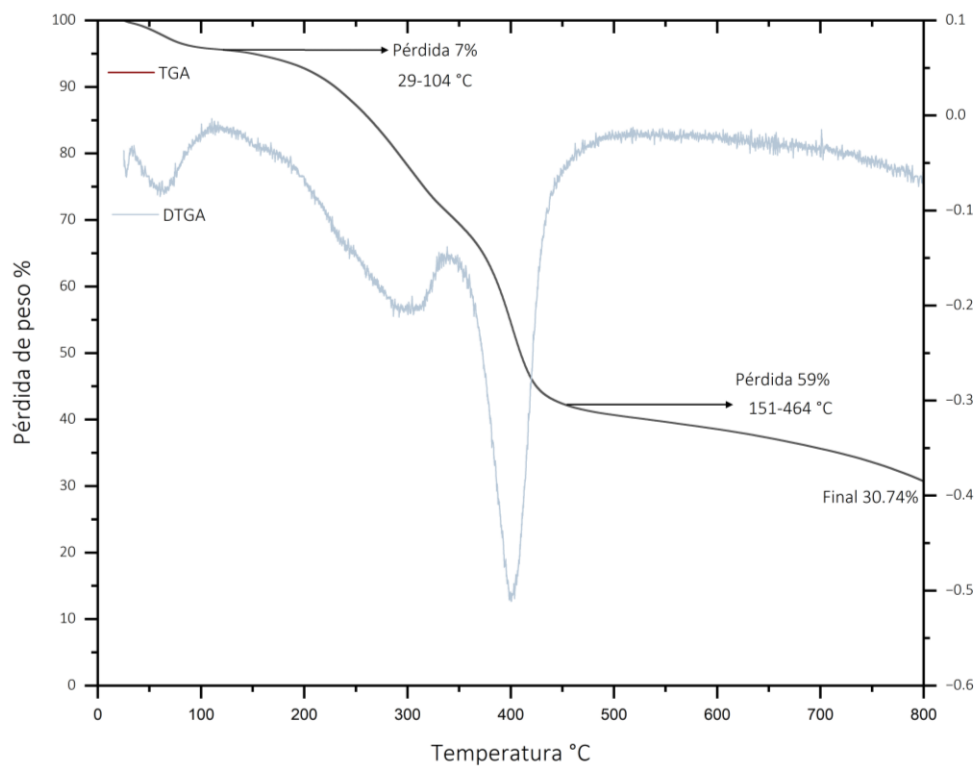


Figura 2.14 Termograma del polielectrolito poli(BMAEP-co-2MAAP).

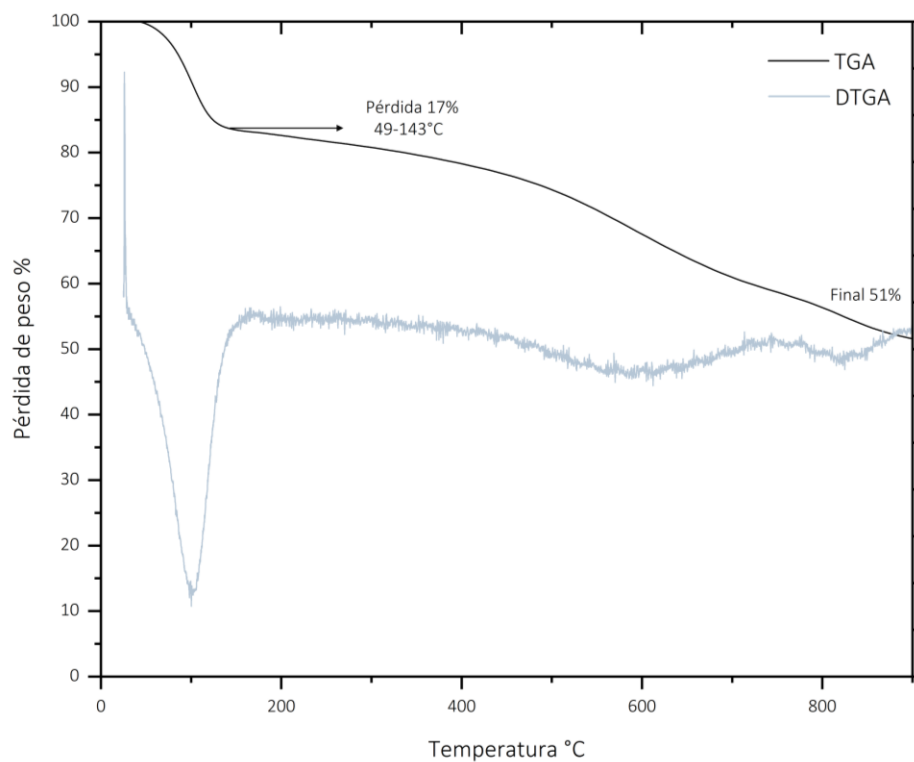


Figura 2.15 Termograma del carbón químico CQN.

De acuerdo con el termograma de la Figura 2.15 que corresponde al CQN se observa un evento térmico que se relaciona con la pérdida de agua, a partir de 143°C, posteriormente de 500 a 600°C hay pérdida de materia orgánica remanente en el CQN.

En el termograma correspondiente al compuesto CQN-poli(BMAEP-co-2MAAP) (Figura 2.16) se observan 2 eventos térmicos, el primero a 80.75°C que corresponde a la pérdida del agua ocluida dentro del material, posteriormente se observa el segundo evento a 304°C que es provocado por la eliminación de los grupos ácido fosfónico presentes en el poli(BMAEP-co-2MAAP), finalmente se observa una pérdida progresiva de la masa de la muestra que se atribuye a la ruptura de las cadenas poliméricas del poli(BMAEP-co-2MAAP) y la carbonización de materia orgánica presente en el CQN.

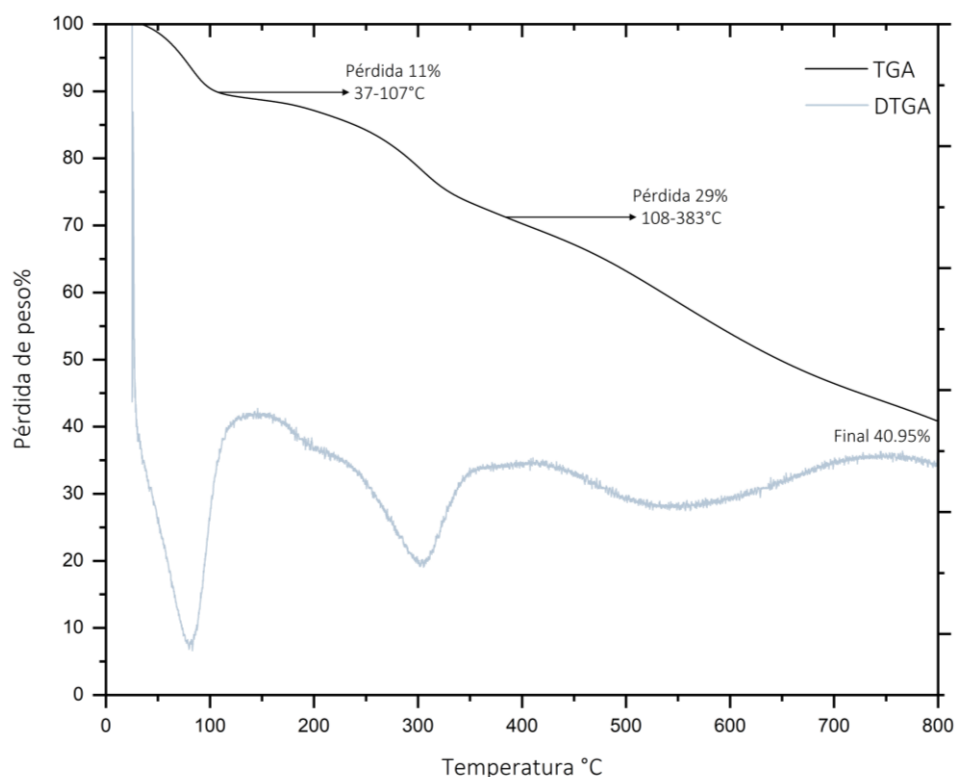


Figura 2.16 Termograma del compuesto CQN-poli(BMAEP-co-2MAAP).

Finalmente, la masa residual de 51% y 40.95% del CQN y el compuesto CQN-poli(BMAEP-co-2MAAP) respectivamente indica que el CQN tiene menor materia orgánica y presenta mayor estabilidad térmica en comparación con el compuesto CQN-poli(BMAEP-co-2MAAP).

2.4.8 Parámetros texturales determinados por BET

Mediante el análisis de superficie por adsorción de N_2 se determinaron los parámetros texturales de CQN y el material CQN-poli(BMAEP-co-2MAAP) reportados en la Tabla 2.3. Se observa que CQN exhibió el valor más alto de S_{BET} de $1251.87 \text{ m}^2/\text{g}$ que corresponde con el alto volumen de poros ($0.6958 \text{ cm}^3/\text{g}$) y se observa que el S_{BET} ($148.62 \text{ m}^2/\text{g}$) así como V_{TP} ($0.1007 \text{ cm}^3/\text{g}$) del CQN-poli(BMAEP-co-2MAAP) es menor con respecto de CQN. Ambos

materiales son mesoporosos porque el volumen de mesoporos es de 65 y 100% para el CQN y el compuesto respectivamente indicando que la mayor parte de la superficie S_{BET} se debe a que el tamaño de los poros esta entre 2 a 50 nm (IUPAC). Corroborando con el D_{AP} de 2.22 nm para CQN y 2.71 nm para CQN-poli(BMAEP-co-2MAAP). La disminución de los parámetros texturales en el material compuesto CQN-poli(BMAEP-co-2MAAP) se atribuyen a la presencia del polielectrolito poli(BMAEP-co-2MAAP) en la superficie. Finalmente, se aprecia una relación entre el aumento del V_{TP} y la disminución de la densidad aparente para ambos materiales.

Tabla 2.3 Parámetros texturales de los materiales CQN y CQN-poli(BMAEP-co-2MAAP)

Material	S_{BET} (m ² /g)	V_{TP} (cm ³ /g)	$V_{\mu P}$ (cm ³ /g)	V_{MesoP} (cm ³ /g)	% V_{MesoP}/V_{TP}	D_{AP} (nm)
CQN	1251.87	0.70	0.24	0.45	65.15	2.22
CQN-poli(BMAEP-co-2MAAP)	148.62	0.10	0	0.10	100	2.71

2.4.9 Densidad aparente y pH_{PZC}

El material CQN presentó una densidad aparente de 0.43 g/cm³ y el compuesto CQN-poli(BMAEP-co-2MAAP) de 0.55 g/cm³. De acuerdo con los valores se puede observar un aumento en la densidad del compuesto atribuida a la adición del polielectrolito poli(BMAEP-co-2MAAP). En la tabla 2.4 se presentan los valores de ρ y pH_{PZC} correspondiente a cada material.

 Tabla 2.4 Valores de ρ y pH_{PZC} para los materiales CQN y compuesto CQN-poli(BMAEP-co-2MAAP)

Material	pH_{PZC}	ρ aparente g/cm ³
CQN	2.18	0.43
CQN-poli(BMAEP-co-2MAAP)	2	0.55

2.4.10 Análisis morfológico utilizando microscopía electrónica de barrido

Las imágenes obtenidas por SEM (Microscopia electrónica de barrido) permitieron identificar la morfología de los materiales adsorbentes CQN y CQN-poli(BMAEP-co-2MAAP), para ambos materiales se utilizaron magnificaciones de x500, x1000 y x1500.

La Figura 2.17 muestra a las imágenes SEM de los materiales, a, c y e corresponde a CQN y b, d y f a CQN-poli(BMAEP-co-2MAAP). En a, c y e se puede identificar una superficie con cavidades homogéneas con una morfología heterogénea característica de los carbones activados, la presencia de estas cavidades se debe al tratamiento previo con inmersión de ácido fosfórico para la activación del carbón. De acuerdo con las micrografías b, d y f se puede observar que la morfología del material CQN que es utilizado como base para la formación de CQN-poli(BMAEP-co-2MAAP) se conserva, sin embargo, es posible apreciar una pequeña capa que se atribuye a la adición del polielectrolito poli(BMAEP-co-2MAAP) en la superficie.

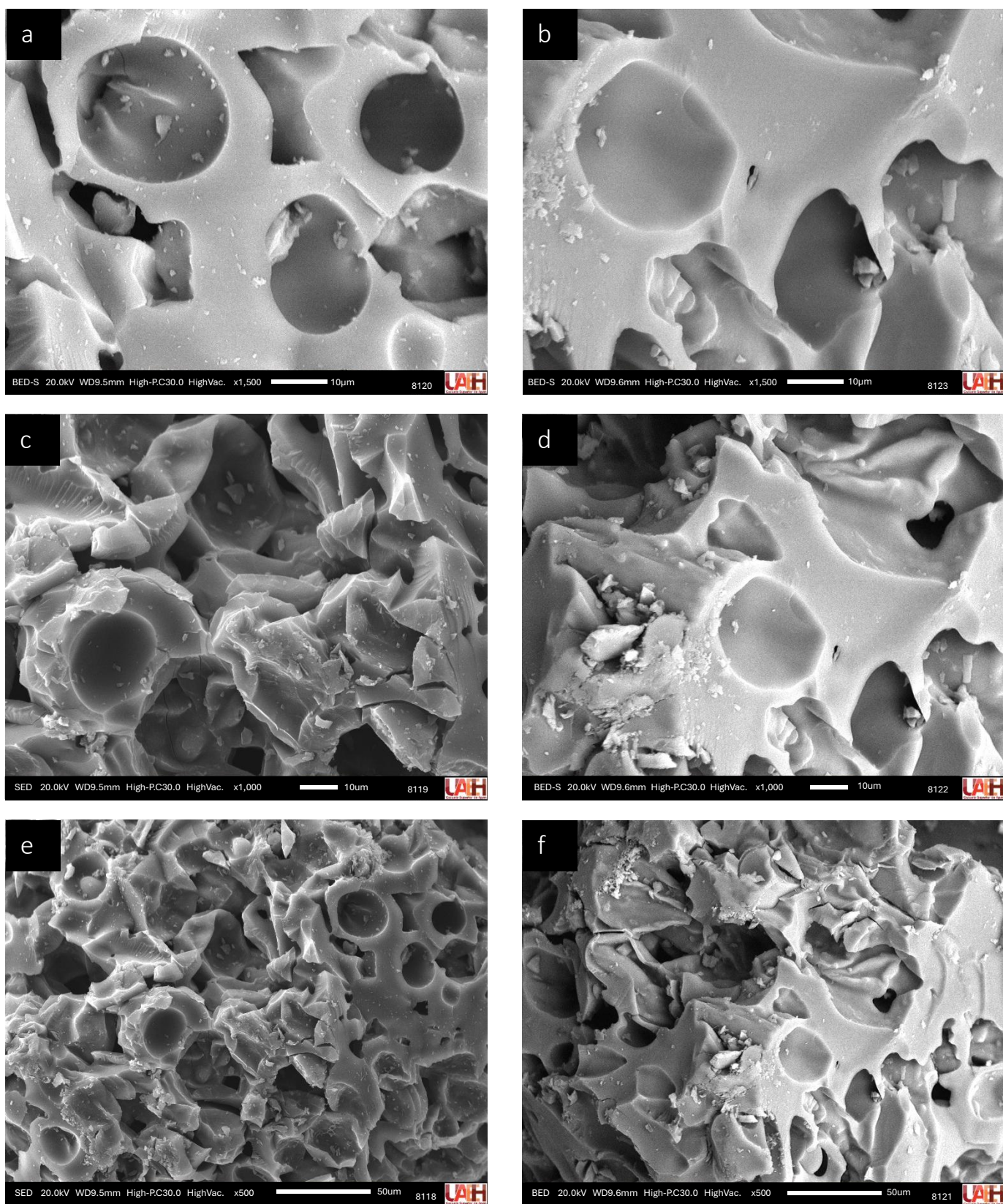


Figura 2.17 Imágenes SEM de CQN (a,c y e) y CQN-poli(BMAEP-co-2MAAP) (b, d y f)

Conclusiones

Se sintetizó el monómero 2MAAP espectroscópicamente puro a partir de la 2AP con un rendimiento de reacción del 32.16 % (0.2132 g). La síntesis del carbón activado químicamente con ácido fosfórico a partir de cascara de nuez con un rendimiento del 49.60%. De acuerdo con los valores del pH_{pzc} se identificó que la superficie del poli(BMAEP-co-2MAAP) ($\text{pH}_{\text{pzc}} = 3.14$) es de carácter ácido debido al predominio de los grupos ácido fosfato. Sin embargo, se clasifica como polianfolito porque en su estructura tiene el monómero básico 2MAAP, aunque en menor concentración que el BMAEP. Con respecto al carbón CQN ($\text{pH}_{\text{pzc}} = 2.18$) se comprobó la funcionalización de la superficie con los grupos ácido fosfórico durante la activación. Finalmente, de acuerdo con el pH_{pzc} (2) del compuesto CQN-poli(BMAEP-co-2MAAP) se observó la influencia en la superficie de los grupos fosfato del BMAEP y los grupos ácido fosfórico del carbón activado.

Adsorción y remoción de colorantes textiles

Resumen

Las isothermas de Langmuir han sido utilizadas para describir el proceso de adsorción de moléculas sobre un adsorbente. Inicialmente el modelo fue desarrollado para el estudio de adsorción sólido-gas, sin embargo, a lo largo del tiempo ha sido modificado para ampliar su aplicación a sistemas líquido-sólido y líquido-líquido. En el presente capítulo se desarrolla el estudio de adsorción utilizando el modelo de Langmuir que describe el proceso de quimisorción y el estudio cinético que permite conocer el tiempo óptimo de contacto entre el adsorbato y el adsorbente. Finalmente, se realiza el tratamiento de un efluente de una planta de lavado textil con la finalidad de evaluar el comportamiento de los materiales adsorbentes bajo condiciones industriales reales. El estudio se realizó con colorantes textiles aniónicos y catiónicos con la finalidad de comprobar la eficiencia de la funcionalización de la superficie de CQN, al final del capítulo se describen los resultados obtenidos y su relación con las propiedades de cada material.

3.1 Metodología experimental

3.1.1 Selección de colorantes textiles

El estudio de adsorción de colorantes textiles en los materiales adsorbentes CQN, poli(BMAEP-co-2MAAP) y CQN-poli(BMAEP-co-2MAAP) se realizó con soluciones modelo de ocho colorantes textiles. Como colorantes ácidos o con carácter aniónico se utilizaron índigo carmín (AB74), turquesa directo (DT86) y amarillo ácido (AY73) (Figura 3.1). Como colorantes con carácter básico o catiónico se utilizó cristal violeta (BV3), azul de metileno (BB9), amarillo oro maxilón (BY28), azul astrazón (BB3) y verde malaquita (BG4) (Figura 3.2). En la Tabla 3.1 se presenta información relevante de cada colorante. La selección de estos colorantes se realizó en función de la presencia de grupos básicos y ácidos en la estructura de los materiales adsorbentes lo que le permite interaccionar con especies de carácter aniónico y catiónico.

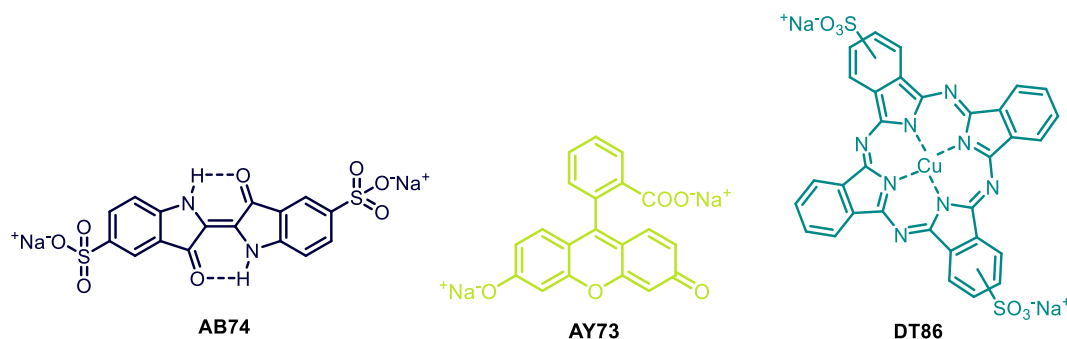


Figura 3.1 Estructura química de los colorantes ácidos AB74, AY73 y DT86.

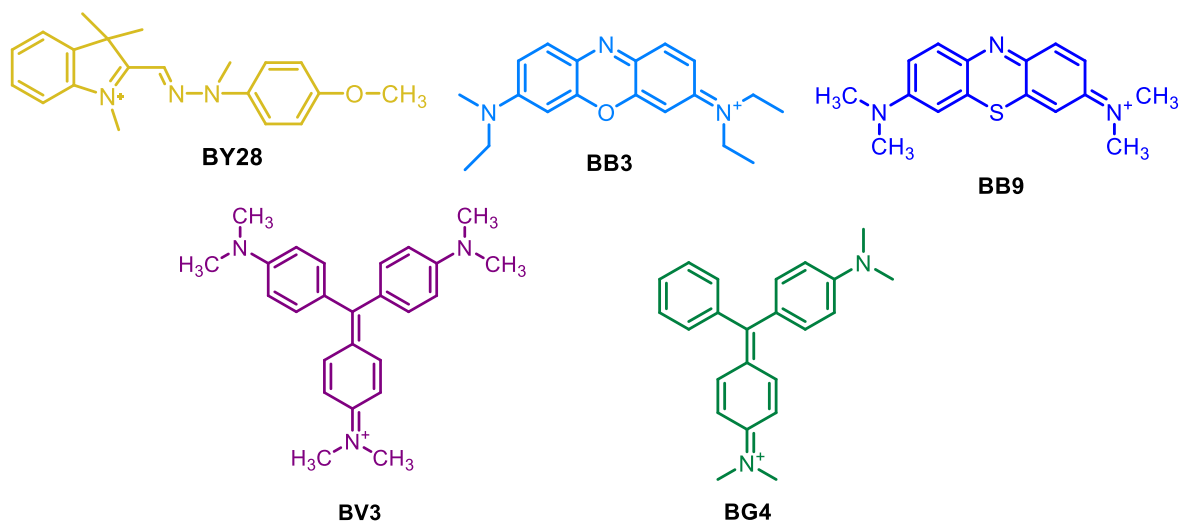


Figura 3.2 Estructura química de los colorantes básicos BY28, BB3, BB9, BV3 y BG4.

Tabla 3.1 Características de los colorantes

Colorante	Colour Index (C.I)	Clave	Peso molecular (g/mol)	Carácter	$\lambda_{\text{máx}}$
Índigo carmín	Azul ácido 74	AB74	466.35	Aniónico	610
Fluoresceína	Amarillo ácido 73	AY73	376.27	Aniónico	485
Turquesa Sirius	Turquesa directo 86	DT86	810.23	Aniónico	624
Amarillo oro maxilón	Amarillo básico 28	BY28	323.44	Catiónico	439
Azul astrazón	Azul básico 3	BB3	311.43	Catiónico	654
Azul de metileno	Azul básico 9	BB9	285.41	Catiónico	665
Cristal violeta	Violeta básico 3	BV3	373.45	Catiónico	590
Verde malaquita	Verde básico 4	BG4	330.48	Catiónico	615

3.1.2 Cuantificación de las concentraciones

La cuantificación de las concentraciones se realizó por espectroscopia UV-Vis utilizando un espectrofotómetro HACH DR2400 empleando como longitud de onda de detección la longitud de onda máxima característica para cada colorante. Para determinar la absorbancia se tomó una alícuota de volumen determinado de cada solución de colorante y se realizó una dilución. Para calcular el factor de dilución se utilizó la ecuación 3.1.

$$F_d = \frac{V_{ac} + V_a}{V_{ac}} \quad \text{Ecuación (3.1)}$$

Donde F_d es el factor de dilución, V_{ac} el volumen de la alícuota en mL y V_a el volumen de agua para la dilución. El cálculo de la absorbancia real (Abs_r) de cada solución se obtiene utilizando la ecuación 3.2.

$$Abs_r = abs * F_d \quad \text{Ecuación (3.2)}$$

3.1.3 Curvas de calibración

De acuerdo con la ley de Beer-Lambert (Ecuación 3.3) la concentración de una solución está relacionada proporcionalmente con la absorbancia.

$$Abs = \varepsilon * b * C \quad \text{Ecuación 3.3}$$

Donde Abs es la absorbancia, ε el coeficiente de extinción molar ($M^{-1}cm^{-1}$), b la longitud de la celda (cm) y C la concentración de la disolución (M). La relación entre la absorbancia y la concentración se representa con una línea recta denominada curva de calibración.

La construcción de curvas de calibración de los colorantes se realizó con soluciones acuosas con concentraciones de 200 a 2000 ppm con un intervalo de 300 ppm. A partir de la absorbancia correspondiente a cada concentración se graficó la relación concentración/absorbancia y se obtuvo la ecuación de la línea recta para cada colorante (Tabla 3.2) En la figura 3.3 se observan las curvas de calibración para los colorantes AB74, AY73, DT86, BB3, BB9 y BG4. En la Figura 3.4 se presentan las curvas de calibración para los colorantes BV3 y BY28.

Tabla 3.2 Curvas de calibración de los colorantes textiles

Colorante	Curva de calibración mg/L	R ²
DT86	$C = Abs/0.0601$	0.9385
AY73	$C = Abs/0.1293$	0.9999
AB74	$C = Abs/0.1294$	0.9983
BB9	$C = Abs/0.2409$	0.9995
BG4	$C = Abs/0.1285$	0.9999
BV3	$C = Abs/0.2551$	0.9975
BY28	$C = Abs/0.0468$	0.9962
BB3	$C = Abs/0.0322$	0.9893

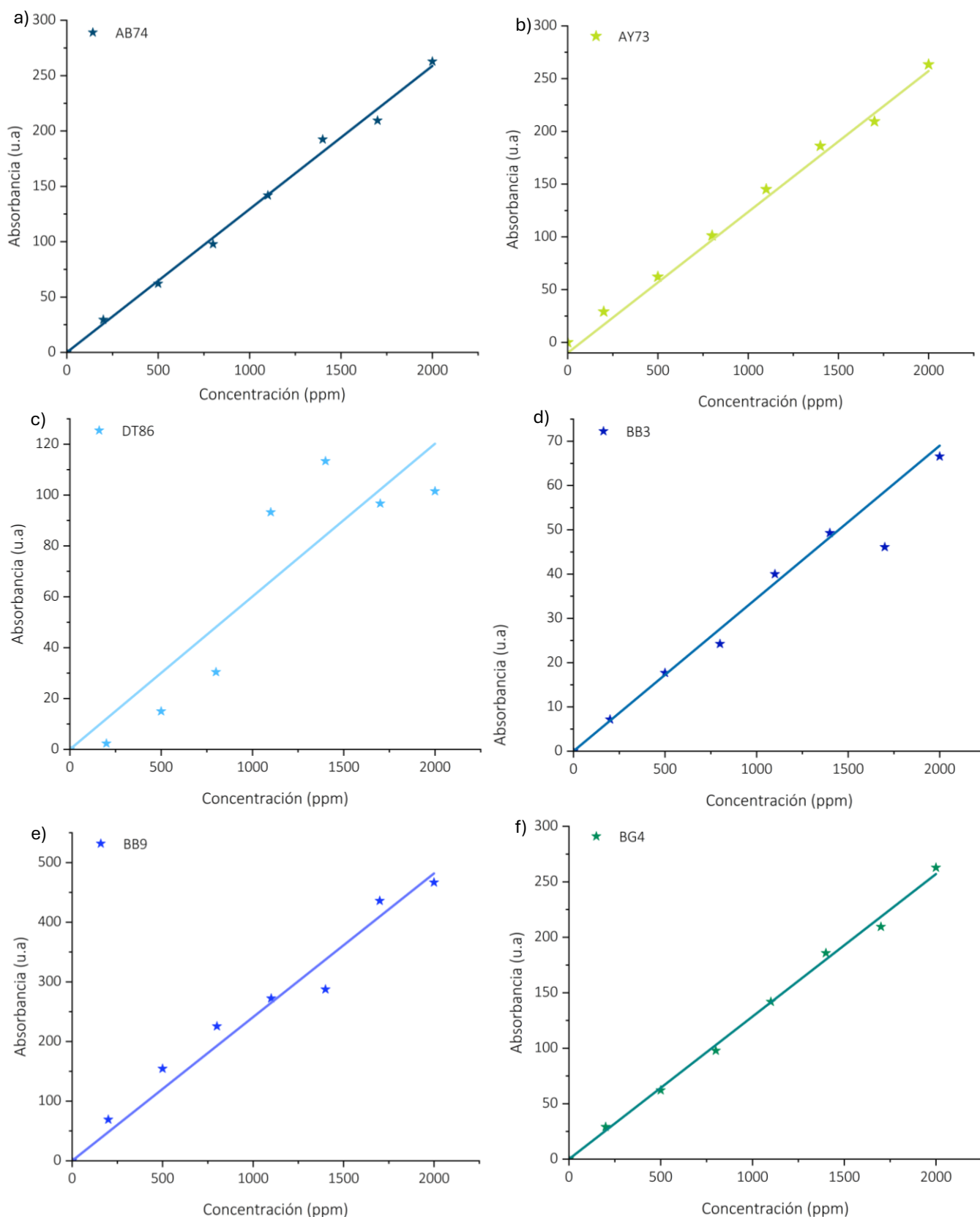


Figura 3.3 Curvas de calibración para los colorantes a) AB74, b) AY73, c) DT86, d) BB3, e) BB9 y f) BG4.

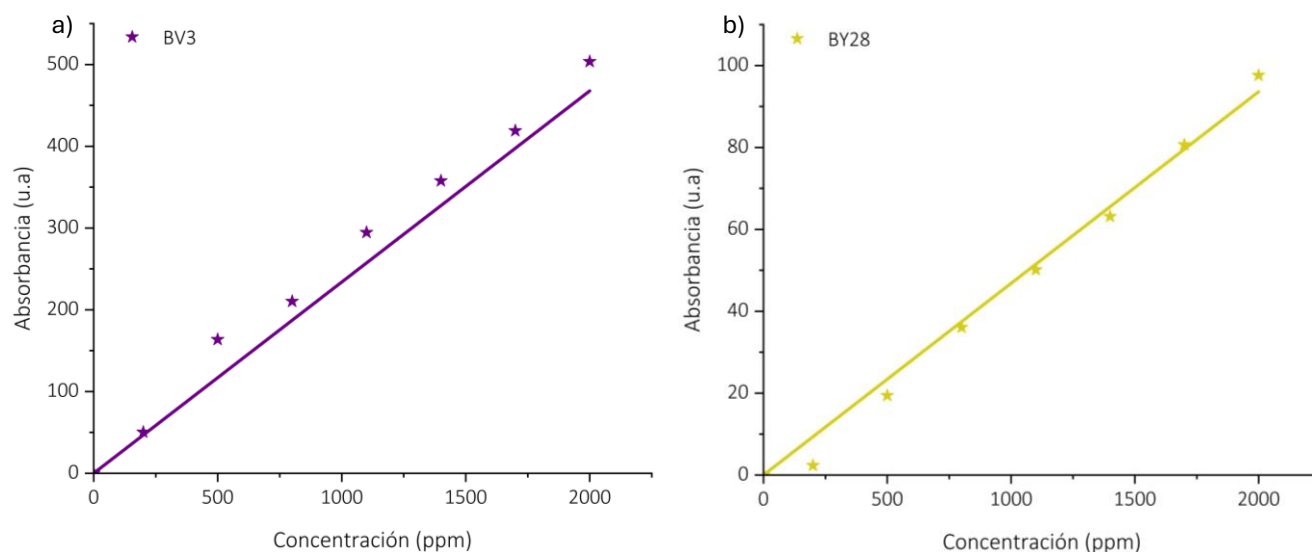


Figura 3.4 Curvas de calibración para los colorantes a) BV3 y b) BY28.

3.1.4 Adsorción estática

El análisis cuantitativo de adsorción de colorantes textiles se realizó con los parámetros de porcentaje de adsorción, cinética y construcción de isothermas de adsorción.

Para el estudio de adsorción estática se utilizaron 0.01 L de ocho soluciones de 300 (mg/L) de cada colorante y se colocaron en ocho viales con 0.025 g de carbón activado CQN, posteriormente se colocaron en un agitador orbital Shaker modelo KJ-201BD durante 48 horas a temperatura ambiente.

Para la cuantificación de las concentraciones, se muestreó la solución final para obtener la absorbancia real (Abs_r) y se realizó el cálculo descrito en la tabla 3.2 para cada colorante. Finalmente, el porcentaje de adsorción se determinó con la ecuación 3.4 donde C_i es la concentración inicial de la solución y C_f la concentración final.

$$\%Adsorción = \frac{C_i - C_f}{C_i} * 100 \quad \text{Ecuación (3.4)}$$

Se repitió el mismo procedimiento con los materiales adsorbentes poli(BMAEP-co-2MAAP) y CQN-poli(BMAEP-co-2MAAP) para conocer el porcentaje de adsorción.

3.1.5 Cinética de adsorción

Para conocer el tiempo óptimo del proceso de adsorción se realizó el estudio cinético de los tres materiales adsorbentes, para ello se emplearon ocho viales con 0.01 L de soluciones de 300 mg/L de cada colorante textil con 0.025 mg de carbón activado CQN que se colocaron en agitación orbital, para determinar el tiempo óptimo, se tomaron alícuotas en diferentes tiempos para cuantificar su concentración a través de la Abs_r y conocer la velocidad de adsorción.

La cuantificación de la concentración se realizó de acuerdo con la ecuación 3.5 donde Abs_r es la absorbancia real a la concentración N y Abs_{r300} es la absorbancia real a la concentración inicial de 300 mg/L.

$$Concentración = \frac{300 * Abs_r}{Abs_{r300}} \quad \text{Ecuación (3.5)}$$

Se repitió la metodología con los materiales adsorbentes poli(BMAEP-co-2MAAP) y CQN-poli(BMAEP-co-2MAAP) para conocer el porcentaje de adsorción.

3.1.6 Isotermas de adsorción

Para determinar la capacidad máxima de adsorción se realizaron 0.01 L de siete soluciones para cada colorante con concentraciones en un rango 200 a 2000 ppm con un intervalo de 300 ppm, se colocaron en siete viales con 0.050 g del material adsorbente y se mantuvieron en agitación constante durante 48 horas. Se cuantificó la concentración final de cada solución utilizando la fórmula descrita en la tabla 3.2 para cada colorante.

Esta metodología se realizó con los tres materiales adsorbentes CQN, poli(BMAEP-co-2MAAP) y CQN-poli(BMAEP-co-2MAAP).

3.1.7 Medición de parámetros de calidad del agua

Se obtuvo una muestra de agua residual proveniente de la planta de lavado textil de Zacualtipan la cual se caracteriza por la presencia de colorante AB74 que es utilizado para el teñido de pantalones de mezclilla. Para la caracterización del agua residual se realizó la determinación de los parámetros físicos pH, conductividad, color y el parámetro químico DQO utilizando un equipo HACH DR2400. Estos parámetros fueron medidos antes y después del tratamiento con los materiales adsorbentes CQN, poli(BMAEP-co-2MAAP) y CQN-poli(BMAEP-co-2MAAP).

El tratamiento de aguas residuales se realizó colocando 25 mg de cada material adsorbente en 3 viales con tapa, después se adicionaron 5 mL de agua residual y se mantuvieron en agitación constante durante 48 horas, finalmente se retiró el material adsorbente utilizando un embudo de tallo y papel filtro y se realizaron las mediciones correspondientes a cada parámetro.

Para la determinación del pH se colocaron 10 mL de agua residual en un vaso de precipitados, posteriormente se realizó la medición con un potenciómetro OAKTON pH 550 previamente calibrado. Se repitió este procedimiento para las 3 muestras de agua posterior al tratamiento. Las mediciones de conductividad se realizaron en el equipo Thermo Scientific Orion®star a con las muestras de 10 mL antes mencionadas.

De acuerdo con la metodología descrita en la bibliografía (24) se agregaron 2mL de cada una de las muestras de agua en tres tubos con reactivo digestor de la marca HACH respectivamente. Adicionalmente, se preparó un blanco con un tubo con las mismas características con 2 mL de agua destilada, después se colocaron en un baño de glicerina a 150°C por 2 horas, finalmente se dejaron enfriar y se realizó la medición con el equipo HACH DR2400.

La determinación del parámetro de color se realizó por espectrofotometría, para ello se colocaron 3mL de cada una de las muestras en 3 tubos de ensayo de la marca HACH, además se realizó un blanco con 3mL de agua destilada. Se realizó la calibración del equipo con el blanco y se realizaron las medidas correspondientes a cada muestra utilizando como longitud de onda la longitud de onda $\lambda_{\text{máx}}$ del colorante AB74.

3.2 Discusión de resultados

3.2.1 Porcentajes de adsorción estática

Los porcentajes de adsorción sobre el material CQN se muestran en la Figura 3.5. En el gráfico se observa una alta capacidad adsorptiva para colorantes textiles básicos y ácidos alcanzando porcentajes cercanos al 100% a excepción del colorante DT86. El carbón activado posee una superficie con carga negativa corroborado con el valor del pH_{pzc} de 2.18. En soluciones acuosas el grupo fosfato presente en la superficie se disocia formando cargas formales negativas que permiten la interacción atractiva y repulsiva entre los cationes y aniones de los colorantes. La adsorción entre el material adsorbente CQN y los colorantes básicos ocurre paralelamente por dos procesos; uno es a través del intercambio iónico con el remplazo de iones de la misma carga y el segundo es a través de los poros que posee el CQN. En los colorantes ácidos la adsorción se atribuye solo a la adsorción de las moléculas de colorante dentro de los poros del carbón activado. Para el caso del colorante DT86 la adsorción no se llevó a cabo por el impedimento estérico provocado por su volumen. De acuerdo con la tabla 3.1 el colorante DT86 presenta el mayor peso molecular que se relaciona directamente con su alto volumen.

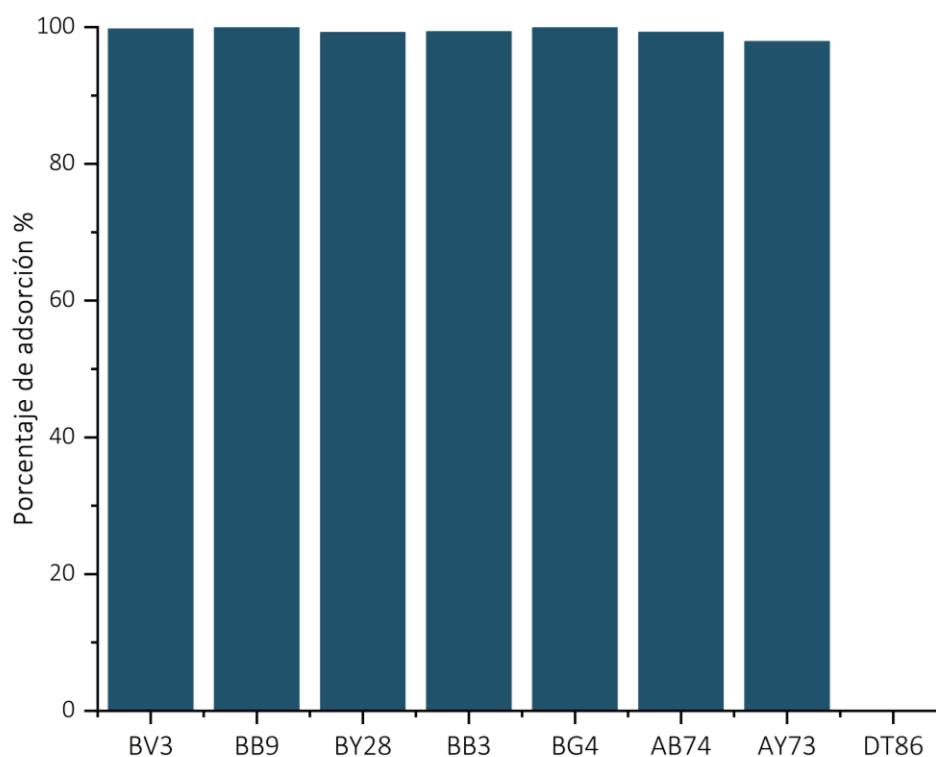


Figura 3.5 Porcentaje de adsorción sobre CQN.

De acuerdo con la Figura 3.6 el porcentaje de adsorción con el poli(BMAEP-co-2MAAP) se ve disminuido comparado con el CQN para los colorantes BV3, BB9, BB3 y BG4. Sin embargo, el colorante DT86 presentó un aumento del 80% en comparación del porcentaje de adsorción sobre CQN. La superficie del material poli(BMAEP-co-2MAAP) tiene una carga superficial negativa de acuerdo al resultado del pH_{pzc} de 2. Sin embargo, la presencia de grupos amina del monómero 2MAAP permite la interacción con especies químicas ácidas y básicas. La reducción del porcentaje de adsorción con respecto al CQN se debe a que el polielectrolito no es un material mesoporoso y la adsorción solo se llevó a cabo por intercambio iónico.

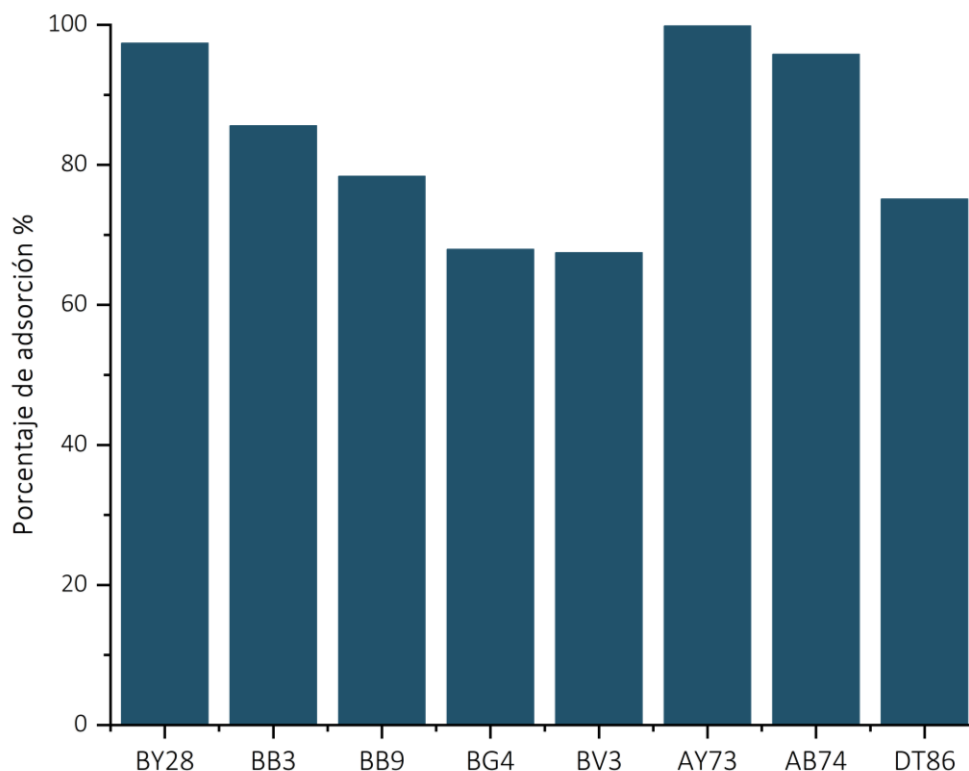


Figura 3.6 Porcentaje de adsorción sobre poli(BMAEP-co-2MAAP).

El gráfico en la Figura 3.7 muestra los porcentajes de adsorción sobre el material compuesto CQN-poli(BMAEP-co-2MAAP) donde la adsorción de todos los colorantes básicos y el colorante ácido AY73 es cercana al 100% y para los colorantes AB74 y DT86 es cercana al 90% y 37% respectivamente. La combinación de la funcionalidad de la superficie del CQN y el comportamiento del polianfolito poli(BMAEP-co-2MAAP) permiten interacciones electrostáticas en los sitios activos ácidos del grupo fosfato del BMAEP y CQN y los sitios básicos del grupo amina del 2MAAP, lo que le permite al material compuesto interactuar con ambos tipos de colorantes. De acuerdo con los resultados se observa una disminución en la adsorción del colorante AB74 en comparación con la adsorción sobre los materiales CQN y poli(BMAEP-co-2MAAP), esta disminución se atribuye a la reducción del área superficial provocada por el recubrimiento del polielectrolito sobre el carbón activado, esto se comprueba con el valor S_{BET} de 1251.87 (m^2/g) para CQN y 148.62 (m^2/g) para el compuesto, por otro lado, la adsorción del colorante DT86 presenta una disminución en comparación con

la adsorción sobre poli(BMAEP-co-2MAAP) pero un aumento con respecto a la adsorción en CQN. La adsorción de colorantes básicos permanece constante sobre CQN y el compuesto CQN-poli(BMAEP-co-2MAAP) debido al predominio de los grupos fosfato en ambos materiales. Con lo anterior se demuestra la eficiencia de la combinación del área superficial del carbón activado y la funcionalidad del polielectrolito.

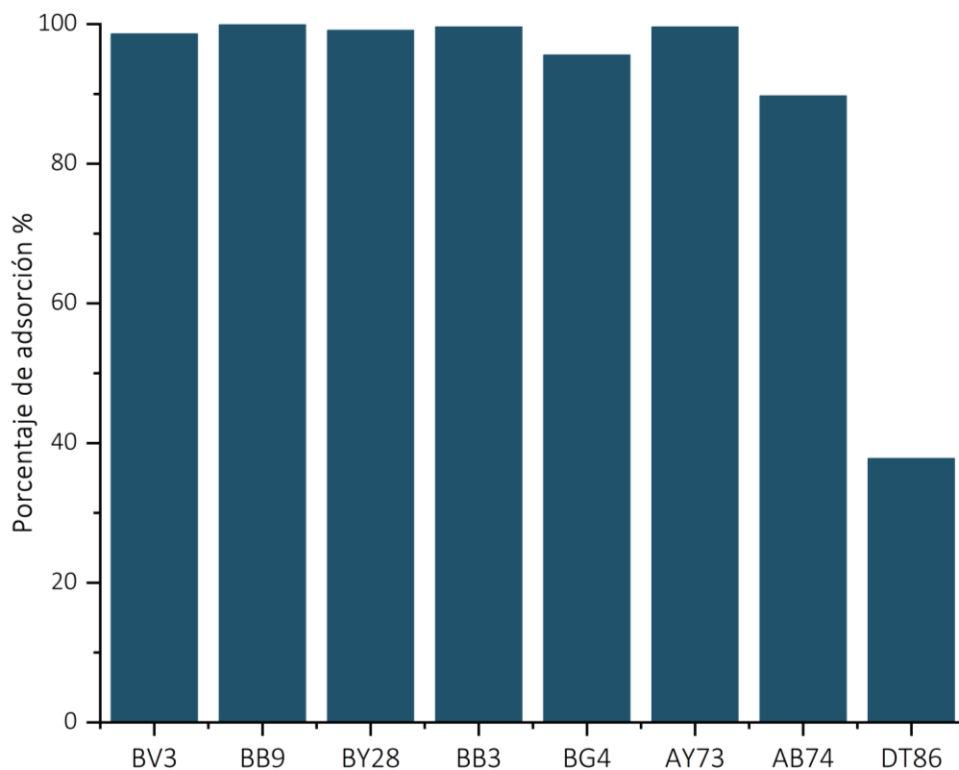


Figura 3.7 Porcentaje de adsorción sobre CQN-poli(BMAEP-co-2MAAP).

3.2.2 Cinética de adsorción

Los datos obtenidos del estudio cinético de los colorantes textiles ácidos y básicos sobre los materiales adsorbentes fueron tratados de acuerdo con el modelo de pseudo segundo orden que se relaciona con el proceso de quimisorción que tiene como paso limitante el mecanismo de difusión. De acuerdo con (44) el proceso de difusión en adsorción comienza con el acercamiento de las moléculas de la solución a la superficie del adsorbente. Posteriormente comienzan a moverse dentro del material difundiéndose dentro de los macroporos, mesoporos y microporos. Finalmente, las moléculas interactúan con los sitios activos del adsorbente debido a las interacciones electrostáticas permitiendo la formación de la monocapa. En la Figura 3.8 se observan los gráficos t/a_t en función del tiempo para los materiales CQN, poli(BMAEP-co-2MAAP) y CQN-poli(BMAEP-co-2MAAP) donde los puntos representan los datos experimentales y la línea continua corresponde a la tendencia obtenida por regresión lineal.

De acuerdo con los parámetros cinéticos de la Tabla 3.3 donde K_2 representa la constante de velocidad de pseudo segundo orden, a_e la cantidad adsorbida al equilibrio, R^2 el coeficiente de correlación y H la velocidad del proceso de adsorción. Se observa un ajuste

ideal $R^2 > 0.9900$ al modelo de pseudo segundo orden para la mayoría de los colorantes a excepción de AB74, DT86 y AY73 sobre CQN esto se relaciona con la gran cantidad de fuerzas de repulsión entre los sitios activos aniónicos característicos de los grupos fosfato en la superficie del material CQN y los colorantes de carácter ácido. Con respecto a los valores de a_e , la cantidad de adsorbida al equilibrio sobre el polielectrolito Poli(BMAEP-co-2MAAP) es menor en comparación de los materiales CQN y CQN-poli(BMAEP-co-2MAAP) lo que da evidencia de que la combinación de las características superficiales del carbón activado y las características estructurales del polielectrolito permiten la adsorción de colorantes aniónicos y catiónicos por intercambio iónico.

Para la velocidad H se observan valores entre 40 y 525 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ para colorantes básicos y entre 5 y 21 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ para colorantes ácidos sobre el material CQN, en el material poli(BMAEP-co-2MAAP) las velocidades para colorantes básicos se encuentran entre 0.05 a 1666 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ y para colorantes ácidos entre 0.006 y 661 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$, finalmente el material compuesto CQN-poli(BMAEP-co-2MAAP) presentó un aumento en la velocidad de adsorción de colorantes básicos a excepción de los colorantes BY28 y BB3 con respecto a las velocidades sobre poli(BMAEP-co-2MAAP) con un rango entre 36 a 50 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ además, el aumento en la velocidad de adsorción para colorantes ácidos con respecto a las velocidades sobre CQN se presentó en un rango de 17 a 1998 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$. El incremento de las velocidades de adsorción sobre el nuevo material compuesto se relaciona con la combinación de grupos aniónicos y cationicos del CQN y el poli(BMAEP-co-2MAAP) que aumentan las interacciones electrostáticas entre especies ácidas y básicas. Es importante mencionar que además de las interacciones electrostáticas entre los materiales adsorbentes y los colorantes textiles existen otro tipo de interacciones (interacciones $\pi \pi$ entre los anillos aromáticos de los colorantes, puentes de hidrógeno e interacciones Van der Waals) que permiten la adsorción, sin embargo, de acuerdo con la literatura las interacciones electrostáticas son las de mayor fuerza y las que posibilitan el intercambio iónico que predomina en el proceso de quimisorción.

Tabla 3.3 Parámetros cinéticos de la adsorción de los colorantes textiles ácidos y básicos.

Adsorbente	Colorante	K_2 (gmg ⁻¹ h ⁻¹)	a_e (mgg ⁻¹) experimental	R^2	H (mgg ⁻¹ h)
Carbón activado químicamente (CQN)	BV3	0.0025	131.5789	0.9941	43.2825
	BB9	0.0082	125	0.9967	128.1250
	BY28	0.0198	121.9512	0.9996	294.4675
	BB3	0.0362	120.4819	0.9998	525.4752
	BG4	0.0081	125	0.9974	126.5625
	AB74	0.0003	138.8888	0.5140	5.7870
	AY73	0.0010	144.9275	0.7034	21.0040
Poli(BMAEP- co-2MAAP)	BV3	0.0028	4.5766	0.9557	0.0586
	BB9	0.0096	17.5746	0.9979	2.9651
	BY28	0.0148	120.4851	0.9908	214.8466
	BB3	0.0580	169.4915	0.9920	1,666.1874
	BG4	0.0036	7.6452	0.9966	0.2104
	AB74	0.0014	4.3840	0.9913	0.0269
	DT86	0.0008	2.8003	0.9908	0.0063
CQN- poli(BMAEP- co-2MAAP)	AY73	0.0372	133.3333	0.9999	661.3330
	BV3	0.0033	123.4567	0.9859	50.2971
	BB9	0.0022	121.9512	0.9931	32.7186
	BY28	0.0029	128.2051	0.9994	47.6660
	BB3	0.0039	131.5789	0.9985	67.5207
	BG4	0.0023	126.5822	0.9924	36.8530
	AB74	0.0029	76.9230	0.9924	17.1597
	DT86	0.1601	64.5161	0.9960	666.3886
	AY73	0.1513	114.9425	0.9986	1,998.9421

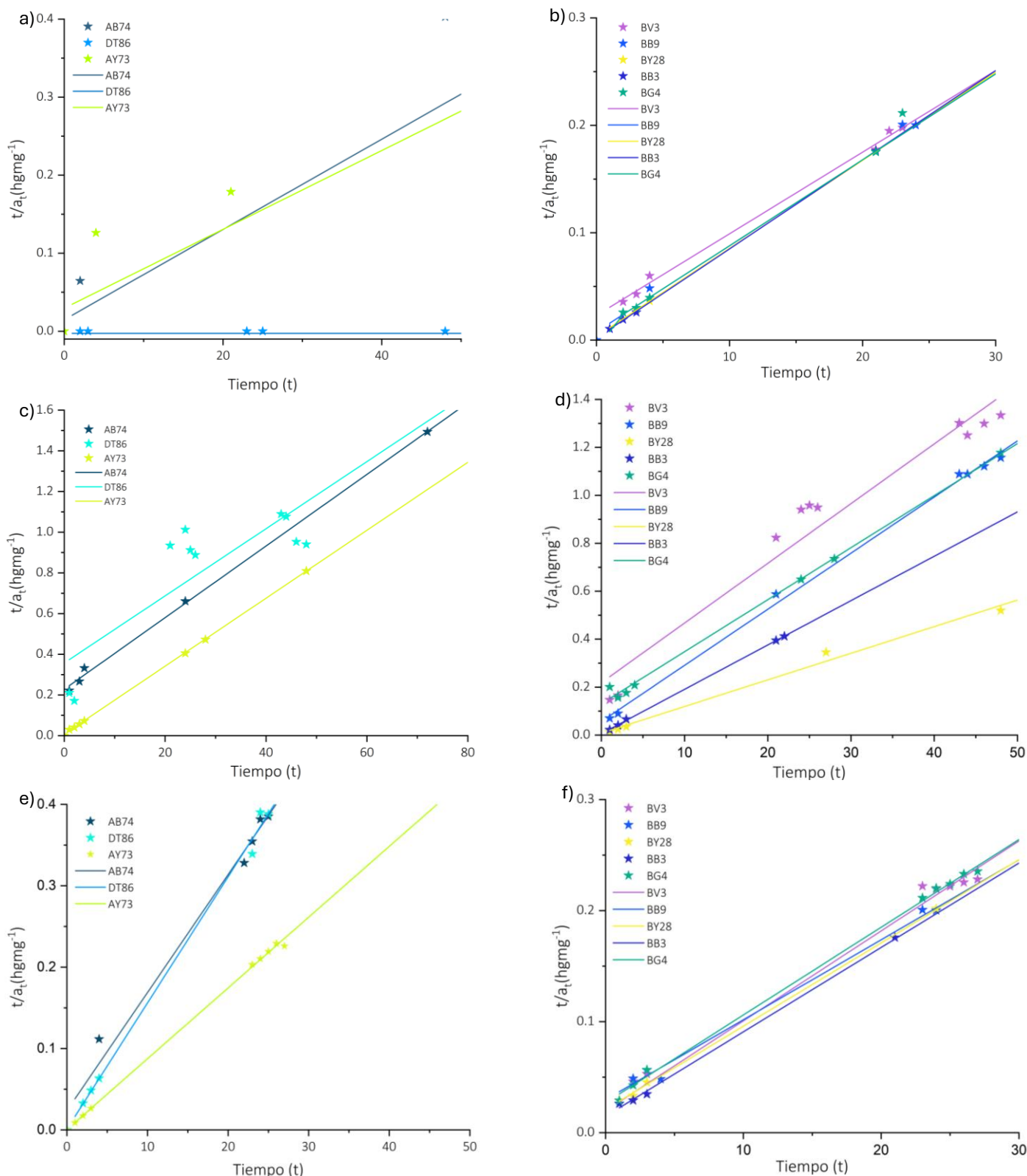


Figura 3.8 Gráficos cinéticos de acuerdo con el modelo de pseudo-segundo orden para colorantes ácidos y básicos sobre CQN (a y b), poli(BMAEP-co-2MAAP) (c y d) y CQN-poli(BMAEP-co-2MAAP) (e y f).

3.2.3 Construcción de isothermas de adsorción

El modelo de Langmuir se basa en tres supuestos fundamentales: la adsorción de las moléculas ocurre a temperatura constante, se forma una monocapa sin interacción entre las moléculas adsorbidas y todos los sitios de adsorción en la superficie del material adsorbente son equivalentes. Los datos obtenidos de a_m , K_L , R_L y R^2 donde a_m es la capacidad de la monocapa, K_L la constante de Langmuir que describe la energía con la que se lleva a cabo el proceso de adsorción, R_L el factor de separación que define la eficiencia del proceso de adsorción y R^2 el coeficiente de correlación entre los datos experimentales y la tendencia obtenida por regresión lineal permiten describir el comportamiento del material adsorbente frente a diferentes concentraciones de adsorbato.

De acuerdo con la Figura 3.9 que representa las isothermas de adsorción de Langmuir para los tres materiales adsorbentes donde los puntos representan los datos experimentales y la línea la tendencia obtenida por regresión lineal, se corrobora la adsorción del 87.5 % de los colorantes sobre el material CQN con un coeficiente de correlación entre 0.9 y 0.99 que representa un ajuste adecuado al modelo de Langmuir. Con respecto al colorante BG4 se observa una alta capacidad adsorptiva cercana al 100% (Figura 3.5) pero de acuerdo con el valor de R_2 de 0.7028 se demuestra que el proceso no presenta un ajuste al modelo de Langmuir. Sin embargo, es posible atribuir el fenómeno de adsorción a las interacciones electrostáticas que permiten la unión del adsorbato y el adsorbente a través de fuerzas intermoleculares y multicapas. Finalmente, de acuerdo con el valor de a_m (Tabla 4.6), el colorante DT86 no presenta adsorción sobre el material CQN.

En la Figura 3.9 inciso c) y d) se observan las isothermas de Langmuir que corresponden al material poli(BMAEP-co-2MAAP), de acuerdo con los valores del coeficiente de correlación R^2 entre 0.9 y 0.99 (Tabla 3.4) el proceso se ajusta al modelo de Langmuir lo que asume un proceso de quimisorción, además, el valor de $0 < R_L < 1$ para cada colorante indica un proceso favorable. En los gráficos correspondientes a las isothermas de Langmuir del material CQN-poli(BMAEP-co-2MAAP) en la Figura 3.9 se observa un comportamiento que se ajusta al modelo de Langmuir para la mayoría de los colorantes a excepción de BV3, AB74 y DT86, esto se corrobora con los valores de R_2 en la Tabla 3.4 que son menores a 0.9.

Los tres materiales adsorbentes presentaron ajustes favorables con respecto al modelo de Langmuir, la capacidad de la monocapa para los colorantes ácidos sobre CQN se encuentra en un rango de 25 a 50 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ mientras que sobre los materiales con el monómero 2MAAP presentan un mayor rango de 25 a 400 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$. Para el caso de los materiales CQN y el compuesto CQN-poli(BMAEP-co-2MAAP) los colorantes básicos son adsorbidos en un rango de 25 a 350 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$, para el polielectrolito poli(BMAEP-co-2MAAP) se observa una disminución de adsorción a 50 a 125 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$, esto ocurre como ya se había mencionado por la adición de grupos funcionales catiónicos a la superficie aniónica del carbón activado que permite la atracción o repulsión entre el adsorbato y el adsorbente.

Tabla 3.4 Parámetros de Langmuir para los colorantes ácidos y básicos.

Adsorbente	Colorante	a_m (mg*g ⁻¹)	K_L (dm ³ /mg)	R^2	R_L
Carbón activado químicamente (CQN)	BV3	129.870	0.039	0.970	0.113
	BB9	294.118	0.007	0.919	0.391
	BY28	333.333	0.086	0.991	0.543
	BB3	384.615	0.021	0.950	0.191
	BG4	128.205	0.006	0.702	0.446
	AB74	333.333	0.041	0.942	0.109
	DT86	0.008	10.593	0.787	0.001
	AY73	322.580	0.413	0.999	0.011
Poli(BMAEP-co-2MAAP)	BV3	70.423	0.010	0.990	0.250
	BB9	78.125	0.008	0.990	0.294
	BG4	128.21	0.012	0.992	0.040
	AB74	63.219	0.012	0.989	0.040
	DT86	40.650	0.008	0.989	0.058
	AY73	370.37	0.153	0.967	0.003
CQN-poli(BMAEP-co-2MAAP)	BV3	24.272	0.005	0.556	0.493
	BB9	105.263	0.051	0.996	0.088
	BY28	303.030	0.125	0.999	0.038
	BB3	333.333	0.091	0.954	0.051
	BG4	200	0.012	0.959	0.293
	AB74	67.567	0.229	0.786	0.021
	DT86	46.729	0.002	0.095	0.697
	AY73	588.235	0.064	0.441	0.072

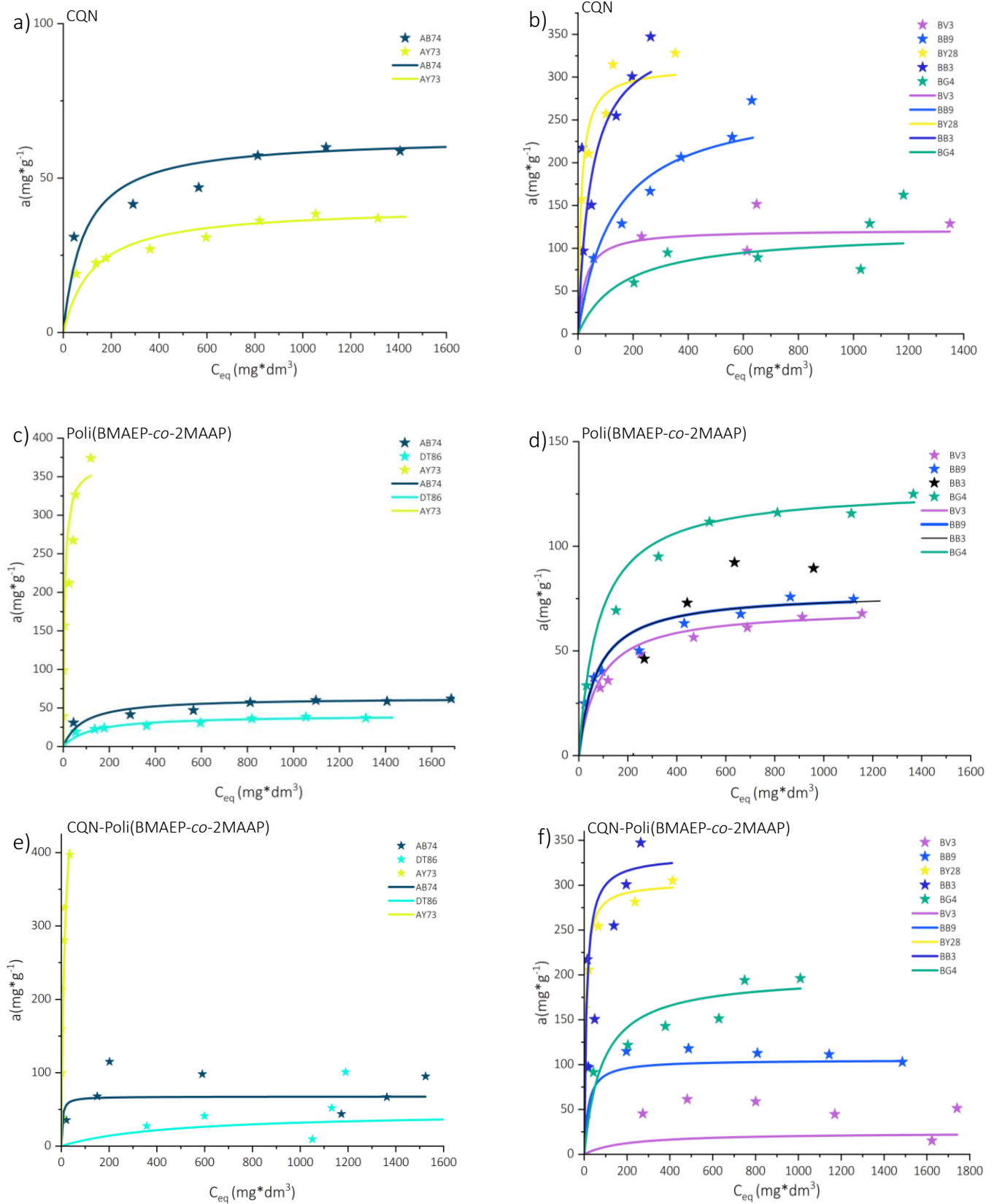


Figura 3.9 Isothermas de adsorción de colorantes ácidos y básicos.

3.2.3 Mejoramiento en la calidad del agua

Los resultados del tratamiento del agua residual con los tres materiales adsorbentes se comparan con respecto a la disminución de los parámetros de pH, conductividad, color y DQO. Los resultados se contrastaron con la NOM-CCA-014-ECOL/1993 que describe los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores provenientes de la industria textil.

La muestra de agua previa al tratamiento presenta un pH de 6, para aguas residuales la NOM-CCA-014-ECOL/1993 describe un pH entre 6-9. El resultado se encuentra dentro de los límites establecidos por la norma por lo que este parámetro no es considerado para la evaluación del tratamiento de aguas residuales con los nuevos materiales adsorbentes.

Los valores de conductividad eléctrica correspondientes a las cuatro muestras de agua residual se presentan en el gráfico de la Figura 3.10. El tratamiento del efluente textil con materiales adsorbentes evidenció una disminución en la conductividad de 1464 mS/cm a valores entre 1330 y 1318 mS/cm. Este parámetro es un indicador de la concentración de iones disueltos en el agua, debido a su relación directa con la capacidad de conducción eléctrica. Durante el proceso de teñido textil, se emplean sales como cloruro de sodio o sulfato de sodio, las cuales contribuyen a la formación de iones en solución. Los materiales adsorbentes utilizados poseen la capacidad de realizar intercambio iónico y de retener iones en su superficie, lo que se observa en una disminución de la conductividad eléctrica del efluente tratado, los tres nuevos materiales disminuyen la conductividad de agua residual eficientemente.

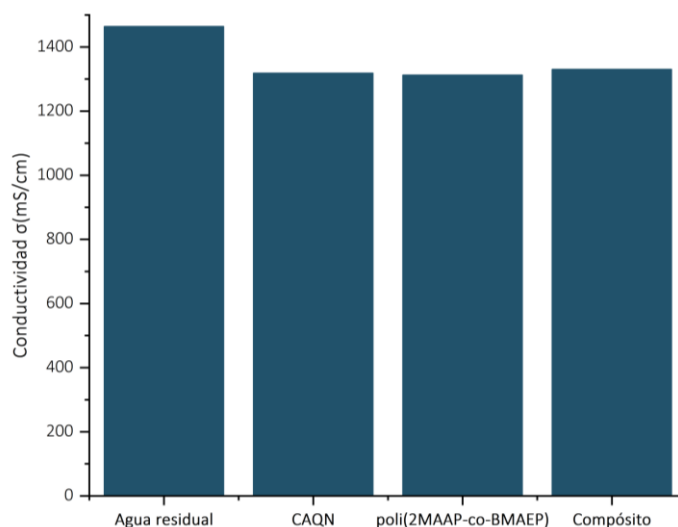


Figura 3.10 Conductividad del agua residual antes y después del tratamiento con los materiales adsorbentes.

La demanda química de oxígeno (DQO) está relacionada con la cantidad de materia orgánica presente en el efluente textil. En la Figura 3.11 se presentan los resultados obtenidos después del tratamiento del agua residual. El uso de materiales adsorbentes permitió una reducción de la DQO en un rango entre 11 % y 21 %. La disminución en este parámetro puede relacionarse con la adsorción de moléculas orgánicas con grupos orgánicos polares capaces de interaccionar con los nuevos materiales a través del proceso de adsorción.

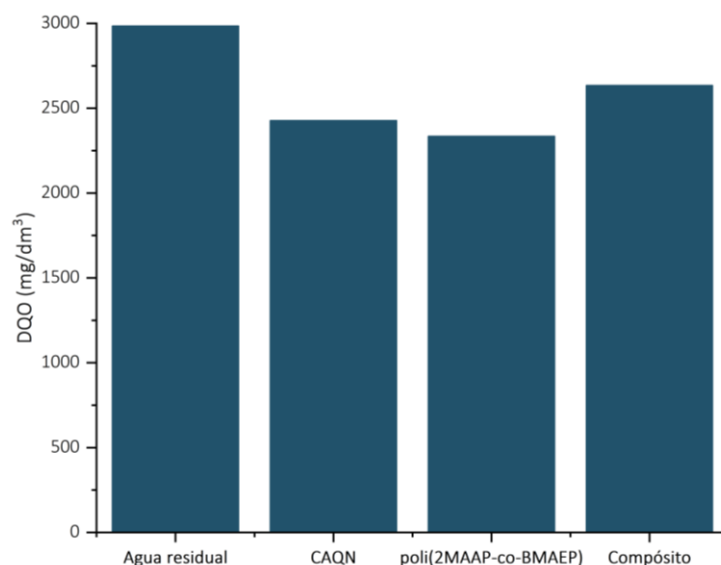


Figura 3.11 DQO del agua residual antes y después del tratamiento con los materiales adsorbentes.

La Figura 3.1 muestra los resultados de la disminución del color en el agua residual antes del tratamiento y posterior al tratamiento con los materiales adsorbentes. De acuerdo con los resultados en el efluente textil se logró reducir la cantidad de colorante textil en un 71% sobre CAQN, 59% sobre poli(BMAEP-co-2MAAP) y 18% sobre el material compuesto CAQN-poli(BMAEP-co-2MAAP), la adsorción sobre el nuevo material compuesto se ve reducida debido a la presencia de otros contaminantes que pueden bloquear sitios activos impidiendo la interacción entre el material y el colorante, además el material compuesto no es considerado mesoporoso lo que confirma que el impedimento disminuye drásticamente la adsorción.

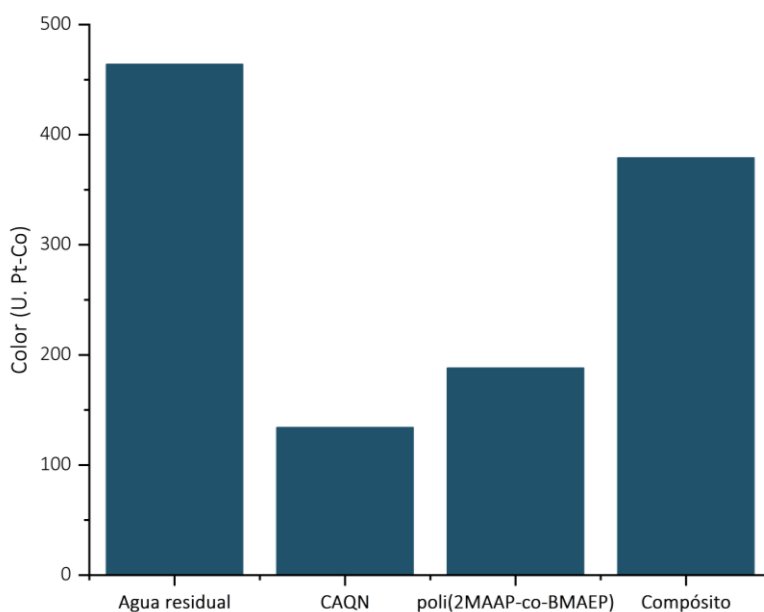


Figura 3.12 Disminución del color en agua residual antes y después del tratamiento con los materiales adsorbentes.

En la Tabla 3.5 se resumen los parámetros evaluados durante el tratamiento del agua residual con los materiales adsorbentes.

Tabla 3.5 Parámetros de mejora de la calidad del agua

Parámetro	Agua residual	CQN	Poli(BMAEP-2MAAP)	Compósito
DQO	2985	2427	2335	2634
Conductividad	1463.763	1318.380	1312.360	1330.420
Color	464	134	188	379

Conclusiones

Los materiales CQN, Poli(BMAEP-co-2MAAP) y CQN-poli(BMAEP-co-2MAAP) son adsorbentes eficientes para la remoción de colorantes textiles ácidos y básicos, los porcentajes de adsorción para colorantes aniónicos son superiores al 38% y para colorantes catiónicos superiores al 68%, alcanzando para ambos casos, porcentajes de remoción del 100%, esto permite comprobar que a pesar del predominio de grupos de carácter aniónico en la superficie del material CQN, la adición de grupos amida con carácter catiónico que pertenecen al monómero 2MAAP posibilita la interacción entre especies ácidas y básicas. Además, la combinación de las propiedades del polielectrolito de tipo polianfolito y el área superficial del carbón activado han demostrado un aumento en la capacidad adsorptiva del material CQN-poli(BMAEP-co-2MAAP). Finalmente, el parámetro R_L para todos los procesos de adsorción son menores a 1 lo que de acuerdo con la literatura se asocia con un proceso de adsorción favorable.

La remediación de aguas residuales con el nuevo material compuesto es posible de acuerdo con los valores obtenidos de DQO, pH, conductividad y color. Los resultados demostraron una mejora en la calidad del agua al utilizar los tres materiales adsorbentes. El propósito de este trabajo es emplear una menor concentración de polielectrolito y revalorizar los residuos agroindustriales mediante la obtención de carbón activado, el cual sirve como matriz para el desarrollo del nuevo material compuesto. Este material permite combinar los procesos de adsorción por intercambio iónico y por área superficial.

Anexos

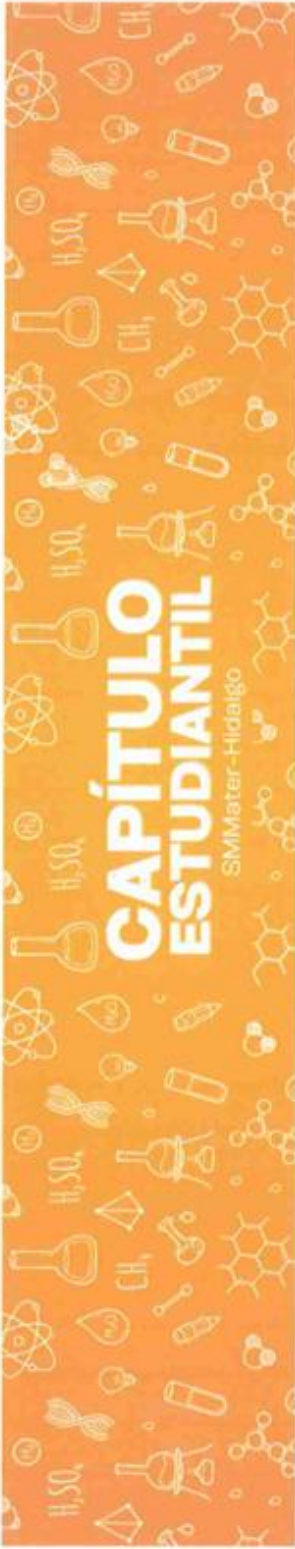
Anexo 1. Participaciones derivadas



Sociedad Mexicana
de Materiales A.C.



CAPÍTULO ESTUDIANTIL
HIDALGO-SMMATER



**CAPÍTULO
ESTUDIANTIL**
SMMater-Hidalgo

El Capítulo Estudiantil SMMater-Hidalgo
Otorga el presente

RECONOCIMIENTO A:
MARÍA GUADALUPE LOYDE CALDERON

Por haber obtenido el **segundo lugar** en la modalidad póster, con el trabajo titulado **“Adsorción selectiva de colorantes textiles usando materiales sustentables a base de polianfolitos y carbón activado”**, cuyos autores son: **Mari Carmen Reyes Angeles, María Guadalupe Loyde Calderon, Nayely Trejo Carbajal, Ana María Herrera González**, en el marco del **4º Congreso Estatal de Investigación en Ciencias de los Materiales**, organizado por el **Capítulo Estudiantil Estatal de Hidalgo de la Sociedad Mexicana de Materiales**, celebrado los días **24 y 25 de abril de 2025**.



Dr. Juan Carlos Martínez Orozco
Coordinador de CEE- SMMater



Dr. Ventura Rodríguez Lugo
Asesor Académico del Capítulo
Estudiantil SMMater-Hidalgo



Ing. Rommel Flores Cruz
Presidente del Capítulo Estudiantil
SMMater-Hidalgo



CEEH-SMM/053/2025

ADSORCIÓN SELECTIVA DE COLORANTES TEXTILES USANDO MATERIALES SUSTENTABLES A BASE DE POLIANFOLITOS Y CARBÓN ACTIVADO

María Guadalupe Loyde Calderón, Mari Carmen Reyes Ángeles, Nayeli Trejo Carbajal, Ana Maria Herrera Gonzalez

Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales, Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Carretera Pachuca-Tulancingo, Km. 8, 42184 Hgo.

1. Resumen

En el presente trabajo se reporta la síntesis del monómero 2-metacrililaminopiridina (ZMAAP), un polielectrolito de tipo anfótero a base de ZMAAP y ácido bis(metacrililox)etilfosfato (BMAEP) nombrado como poli(ZMAAP-co-BMAEP), así como un material compuesto a base de carbón activado proveniente de la cáscara de nuez y el polianfólitico poli(ZMAAP-co-BMAEP). Los materiales adsorbentes: CAQN, poli(ZMAAP-co-BMAEP) y (CAQN-poli(ZMAAP-co-BMAEP)) demostraron alta capacidad de adsorción para colorantes aniónicos y catiónicos, obteniendo porcentajes cercanos al 100% para colorantes básicos y superior al 90% de colorantes ácidos.

Además, los materiales adsorbentes se aplicaron en el tratamiento de aguas residuales de la industria textil, reportando una mejora significativa en la calidad del agua por la reducción drástica de color a través de la adsorción, la disminución del TI al 26% de la DQO y la disminución de la conductividad de 436 a 392 μS . Dando evidencia de su potencial aplicación en la remediación sustentable de aguas residuales.

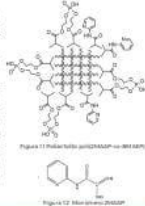


Figura 11. Estructura química del monómero ZMAAP.

Figura 12. Estructura química del monómero BMAEP.

2. Introducción

La industria textil emplea colorantes que generan aguas residuales con un impacto ambiental significativo. El carbón activado (CA) es el adsorbente más utilizado para eliminar estos contaminantes mediante adsorción. Actualmente, los polielectrolitos se evalúan como una alternativa prometedora para la remoción de colorantes textiles.

Los polielectrolitos son macromoléculas que poseen en su estructura una gran cantidad de unidades monoméricas con grupos ionizables que de acuerdo con su carga pueden clasificarse en:



Figura 13. Tipos de polielectrolitos.

El carbón activado es un producto del proceso de descomposición pirólítica de materiales a base de carbono que se caracteriza por poseer una gran porosidad, alta área superficial y una estructura microcristalina.

3. Metodología experimental

1. Síntesis del monómero ZMAAP

Se obtuvo el monómero ZMAAP utilizando cloruro de metacrililo y 2-aminopiridina como precursores y tetrahidrofurano como disolvente.

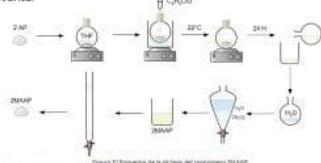


Figura 14. Síntesis del monómero ZMAAP.

2. Síntesis de poli(ZMAAP-co-BMAEP)

Para la síntesis del polielectrolito poli(ZMAAP-co-BMAEP) se utilizó la técnica de polimerización en masa con un sistema fotoiniciador de 12 % en peso de canforquinona/4-dimetilaminobenzoato de etilo (CQ/EDAB) respectivamente.

3. Síntesis del carbón activado

El carbón activado fue sintetizado a partir de cáscara de nuez, la activación del carbón se realizó con ácido fosfórico concentrado al 87%.

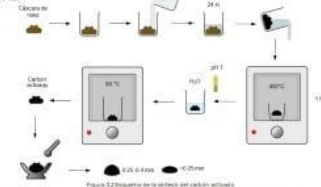


Figura 15. Esquema de la síntesis del carbón activado.

4. Síntesis de CAQN-poli(ZMAAP-co-BMAEP)

Para la síntesis se mezcló el carbón activado con BMAEP y ZMAAP después se incorporó el sistema fotoiniciador, compuesto CQ y EDAB.

4. Caracterización

1. Análisis de espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier. (FT-IR)

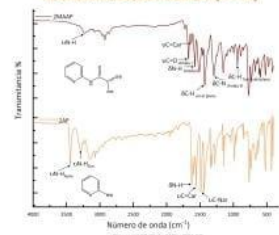


Figura 16. Análisis de espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier. (FT-IR) de ZMAAP.

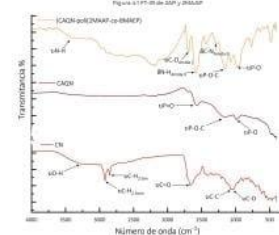


Figura 17. Análisis de espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier. (FT-IR) de CAQN-poli(ZMAAP-co-BMAEP) y CAQN.

2. Resonancia magnética nuclear RMN-¹H

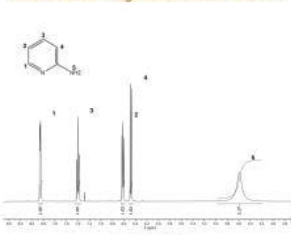


Figura 18. RMN-¹H de ZMAAP.



Figura 19. RMN-¹H de CAQN-poli(ZMAAP-co-BMAEP).

3. Análisis termogravimétrico (TGA)

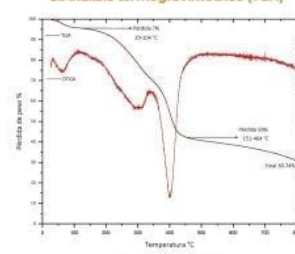


Figura 20. Análisis termogravimétrico (TGA) de ZMAAP y BMAEP.

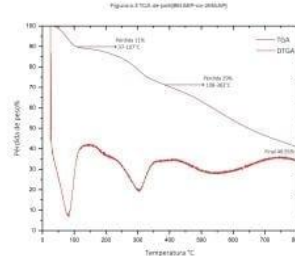


Figura 21. Análisis termogravimétrico (TGA) de CAQN-poli(ZMAAP-co-BMAEP) y CAQN.

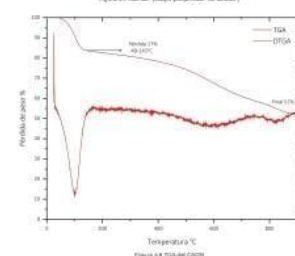


Figura 22. Análisis termogravimétrico (TGA) de ZMAAP y BMAEP.

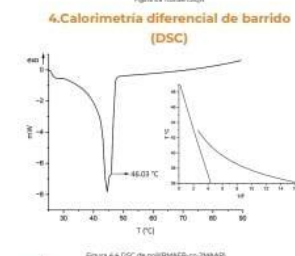


Figura 23. DSC de ZMAAP y BMAEP.

4. Calorimetría diferencial de barrido (DSC)

5. Resultados

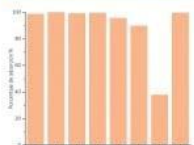


Figura 24. Porcentaje de adsorción de CAQN-poli(ZMAAP-co-BMAEP) y CAQN.

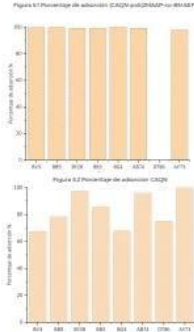


Figura 25. Porcentaje de adsorción de CAQN-poli(ZMAAP-co-BMAEP) y CAQN.

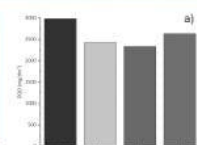


Figura 26. Porcentaje de adsorción de CAQN-poli(ZMAAP-co-BMAEP) y CAQN.

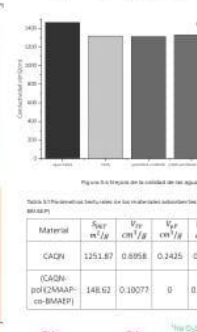


Figura 27. Porcentaje de adsorción de CAQN-poli(ZMAAP-co-BMAEP) y CAQN.

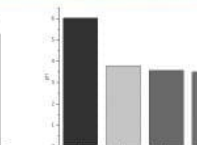


Figura 28. Porcentaje de adsorción de CAQN-poli(ZMAAP-co-BMAEP) y CAQN.

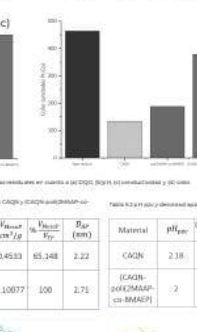


Figura 29. Porcentaje de adsorción de CAQN-poli(ZMAAP-co-BMAEP) y CAQN.

Material	R_{eq} m^2/g	V_{tot} cm^3/g	V_{mic} cm^3/g	V_{meso} cm^3/g	V_{total} cm^3/g	R_{ap} (nm)
CAQN	1251.87	0.8958	0.2425	0.4533	65.248	2.22
(CAQN-poli(ZMAAP-co-BMAEP))	148.52	0.10077	0	0.10077	100	2.71

Tabla 1. Características físicas de los materiales adsorbentes CAQN y CAQN-poli(ZMAAP-co-BMAEP).

Material	pH_{pzc}	Densidad aparente g/cm^3
CAQN	2.18	0.4253
(CAQN-poli(ZMAAP-co-BMAEP))	2	0.5533

Tabla 2. Características físicas de los materiales adsorbentes CAQN y CAQN-poli(ZMAAP-co-BMAEP).

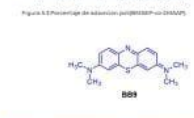


Figura 30. Estructuras químicas de los colorantes BB9, BB3, BB4, BB5, BB6, BB7, BB8, BB9, BB10, BB11, BB12, BB13, BB14, BB15, BB16, BB17, BB18, BB19, BB20, BB21, BB22, BB23, BB24, BB25, BB26, BB27, BB28, BB29, BB30, BB31, BB32, BB33, BB34, BB35, BB36, BB37, BB38, BB39, BB40, BB41, BB42, BB43, BB44, BB45, BB46, BB47, BB48, BB49, BB50, BB51, BB52, BB53, BB54, BB55, BB56, BB57, BB58, BB59, BB60, BB61, BB62, BB63, BB64, BB65, BB66, BB67, BB68, BB69, BB70, BB71, BB72, BB73, BB74, BB75, BB76, BB77, BB78, BB79, BB80, BB81, BB82, BB83, BB84, BB85, BB86, BB87, BB88, BB89, BB90, BB91, BB92, BB93, BB94, BB95, BB96, BB97, BB98, BB99, BB100.

6. Conclusiones

Los materiales adsorbentes: CAQN, poli(ZMAAP-co-BMAEP) y (CAQN-poli(ZMAAP-co-BMAEP)) demostraron alta capacidad de adsorción para colorantes aniónicos y catiónicos, obteniendo porcentajes cercanos al 100% para colorantes básicos y superior al 90% de colorantes ácidos. Este resultado se atribuye a las fuertes interacciones electrostáticas entre los materiales adsorbentes y los colorantes. Además, los materiales adsorbentes se aplicaron en el tratamiento de aguas residuales de la industria textil, reportando una mejora significativa en la calidad del agua por la reducción drástica de color a través de la adsorción, la disminución del TI al 26% de la DQO y la disminución de la conductividad de 436 a 392 μS . Dando evidencia de su potencial aplicación en la remediación sustentable de aguas residuales, justificado en el uso del residuo agroindustrial, cáscara de nuez, del estado de Hidalgo.

7. Referencias

1. Ceper, F. & Aiaz, O. (2013). Activated Carbon for Water and Wastewater Treatment. Weinheim: Wiley-VCH Verlag & Co. KGaA.
2. Chandra Bhatia, R., & Goyal, M. (2005). Activated carbon adsorption. Boca Raton: CRC Press.
3. Carpio, R., Sharma, S., Kumar, A., & Aremoud Danada, M. (2023). Activated carbon progress and applications. Reino Unido: Royal Society of Chemistry (RSC).
4. Bagal, S., Singh, S., Mishra, P., & Bhakta, S. (2023). Molecularly Imprinted Polymers (MIPs). India: Elsevier.
5. Reyes Angeles, M. C. (2023). Diseño y síntesis de polielectrolitos ácidos, básicos y anfóteros para obtener materiales funcionales con aplicaciones de intercambio iónico.
6. Sarikaya Arayaman, S., Shanthana Lakshmi, D., Vivekanandhan, S., & Nageshkrishnaiah, C. (2020). Biochar as emerging and sustainable hydrophobic/oleophilic sorbent. Sustainable Materials and Technologies.
7. Yu, S., Peng, B., Wang, Z., & Xing, J. (2025). Adjustment in physicochemical properties of PMMA particles through: Reactive and Functional Polymers, 207.



August 2025

TO WHOM IT MAY CONCERN
P r e s e n t

This is to certify that *Mari Carmen Reyes-Ángeles, María Guadalupe Loyde-Calderon, Ana María Herrera-González* presented the contribution: **SELECTIVE ADSORPTION OF TEXTILE DYES USING SUSTAINABLE MATERIALS BASED ON POLYAMPHOLITES AND ACTIVATED CARBON** as **Poster** modality, in the *B5. Materials and the Environment* Symposium at the **33rd International Materials Research Congress** held in Cancun, Mexico from August 17th to 21st, 2025.

Sincerely,


Dra. Cecilia Noguez Garrido
SMMater President



SELECTIVE ADSORPTION OF TEXTILE DYES USING SUSTAINABLE MATERIALS BASED ON POLYAMPHOLYTES AND ACTIVATED CARBON

María Guadalupe Loyde Calderón¹, Mari Carmen Reyes Angeles², Ana María Herrera González²

¹Licenciatura en Materiales, Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.
²Laboratorio de Polímeros, Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Carretera Pachuca-Tulancingo km 4.5, Colonia Carboneras, C.P. 42184, Mineral de la Reforma Hidalgo, Hidalgo, Mexico.

1. Abstract

This study reports the synthesis of an ampholyte-type polyelectrolyte based on 2-methacryloylaminoacrylonitrile (2MAAP) and bis(methacryloyloxy)ethyl phosphate (BMAEP), named poly(2MAAP-co-BMAEP). Additionally, a composite material was developed by combining activated carbon derived from nut shells with the polyampholyte poly(2MAAP-co-BMAEP). The 2MAAP monomer was synthesized carried out an acyl nucleophilic substitution reaction, while the polyelectrolyte poly(2MAAP-co-BMAEP) was obtained via free radical photopolymerization. Activated carbon derived from nut shells (ACQN) was produced by chemical activation using H_3PO_4 . The composite material [ACQN-poly(2MAAP-co-BMAEP)] was prepared using a 70/30 weight ratio of ACQN/poly(2MAAP-co-BMAEP). The structure of 2MAAP was confirmed using FTIR and NMR spectroscopy techniques. Characterization of ACQN, poly(2MAAP-co-BMAEP), and the composite [ACQN-poly(2MAAP-co-BMAEP)] was conducted using FTIR, TGA, SEM, and N_2 adsorption.

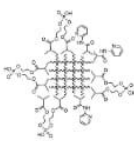


Fig. 11 Poly(2MAAP-co-BMAEP)



Fig. 12 2MAAP monomer

2. Introduction

The textile industry uses dyes that generate wastewater with a significant environmental impact. Activated carbon (AC) is the most widely used adsorbent for removing these contaminants through adsorption. Polyelectrolytes are currently being evaluated as a promising alternative for textile dye removal. Polyelectrolytes are macromolecules that possess a large number of monomeric units with ionizable groups within their structure. These can be classified according to their charge as:

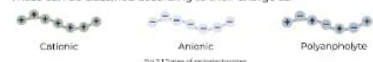


Fig. 13 Types of polyelectrolytes

Activated carbon is a product of the pyrolytic decomposition process of carbon-based materials and is characterized by high porosity, high surface area, and a microcrystalline structure.

3. Experimental section

3.1 Synthesis of the 2MAAP monomer

The 2MAAP monomer was obtained by an acyl nucleophilic substitution reaction, using methacryloyl chloride and 2-aminopyridine as precursors.

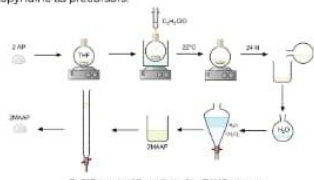


Fig. 11 Scheme of the synthesis of the 2MAAP monomer

3.2 Synthesis of poly(2MAAP-co-BMAEP)

The polyelectrolyte poly(2MAAP-co-BMAEP) was synthesized by free radical polymerization. The bulk polymerization technique was employed, using the photoinitiator system camphorquinone/ethyl 4-dimethylaminobenzoate (CQ/EDAB), 1:2 %wt, to carry out the initiation reaction.

3.3 Synthesis of activated carbon

Activated carbon was obtained from nut shell, chemical activation of the carbon was carried out using concentrated phosphoric acid (87% v/v).

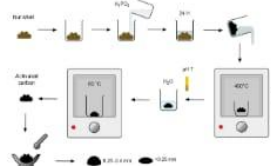


Fig. 12 Scheme of the synthesis of activated carbon

3.4 Synthesis of ACQN-poly(2MAAP-co-BMAEP) composite

The ACQN-poly(2MAAP-co-BMAEP) compound was obtained using a homogeneous mixture of CQ, BMAEP, 2MAAP and the CQ/EDAB photoinitiator system.

4. Characterization

4.1 Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) analysis

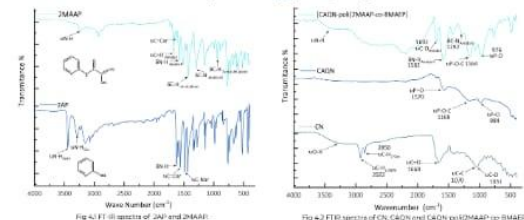


Fig. 4.1 FTIR spectra of 2MAAP and [ACQN-poly(2MAAP-co-BMAEP)]

4.2 Nuclear Magnetic Resonance 1H NMR

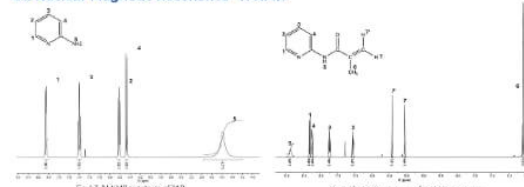


Fig. 4.2 1H NMR spectrum of 2MAAP

Fig. 4.3 1H NMR spectrum of [ACQN-poly(2MAAP-co-BMAEP)]

4.3 Thermogravimetric analysis

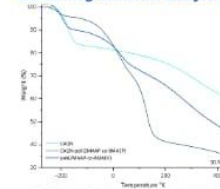


Fig. 4.4 TGA curves of ACQN, poly(2MAAP-co-BMAEP), and [ACQN-poly(2MAAP-co-BMAEP)]

4.4 Differential scanning calorimetry (DSC)

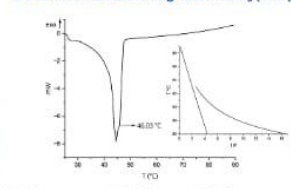


Fig. 4.5 DSC curves of ACQN, poly(2MAAP-co-BMAEP), and [ACQN-poly(2MAAP-co-BMAEP)]

4.5 Scanning Electron Microscopy (SEM)

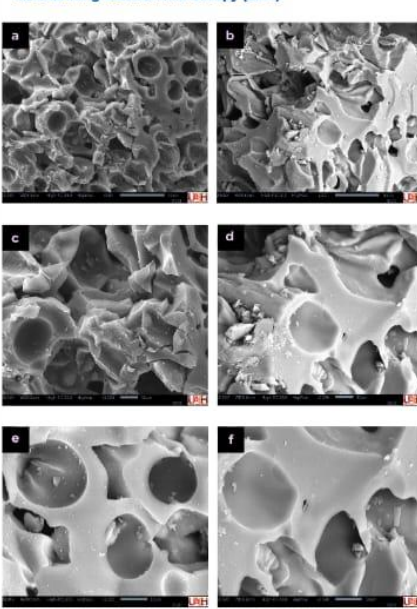


Fig. 4.6 SEM images of ACQN (a, b, c, d, e) and [ACQN-poly(2MAAP-co-BMAEP)] (f, g, h, i, j, k, l, m, n, o, p, q, r, s, t, u, v, w, x, y, z)

5. Results: Application of materials as adsorbents for textile dyes

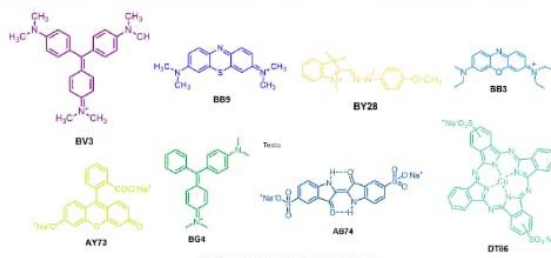


Fig. 5.1 Chemical structure of acid and basic dyes

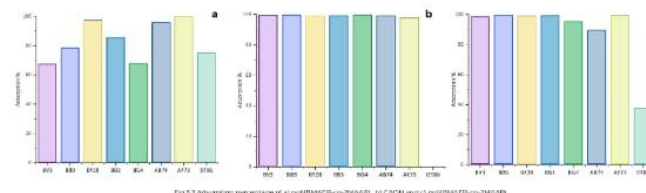


Fig. 5.2 Adsorption percentage of a) poly(2MAAP-co-BMAEP), b) ACQN and c) [ACQN-poly(2MAAP-co-BMAEP)]

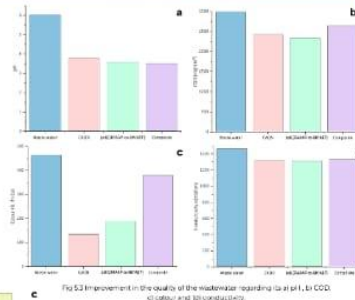


Fig. 5.3 Improvement in the quality of the wastewater according to a) pH, b) COD, c) color, and d) conductivity

Table 1. Textual parameters of ACQN and [ACQN-poly(2MAAP-co-BMAEP)]

Material	S_{BET} m^2/g	V_{TP} cm^3/g	V_{LP} cm^3/g	V_{mesop} cm^3/g	V_{mesop} cm^3/g	D_{p} (nm)
ACQN	1251.87	0.6958	0.2425	0.4533	65.148	2.22
[ACQN-poly(2MAAP-co-BMAEP)]	148.62	0.30077	0	0.10077	100	2.73

6. Conclusions

The ACQN, poly(2MAAP-co-BMAEP), and ACQN-poly(2MAAP-co-BMAEP) adsorbent materials exhibited high adsorption capacities for both anionic and cationic dyes, achieving removal efficiencies close to 100% for basic dyes and over 90% for acidic dyes. These results are attributed to strong electrostatic interactions between the dyes and the functional groups on the adsorbent surfaces. Furthermore, the materials were applied to the treatment of textile industry wastewater, showing a significant improvement in water quality. This was evidenced by a notable reduction in color intensity through adsorption, a decrease in chemical oxygen demand (COD) from 11 to 26%, and a reduction in conductivity from 436 to 392 $\mu\text{S}/\text{cm}$. These findings highlight the potential of these materials for sustainable wastewater remediation, supported by the valorization of an agro-industrial waste nut shells from the state of Hidalgo as a precursor for the activated carbon component.

7. References

- Çeçen, F., and Aktas, Ö. (2012). Activated Carbon for Water and Wastewater Treatment. Integration of adsorption and biological treatment. John Wiley and Sons.
- Bansal, R. C., and Goyal, M. (2005). Activated Carbon Adsorption. CRC Press.
- Gangoo, R., Sharma, S., Kumar, A., and Daouda, M. M. (2023). Activated Carbon: Progress and Applications. Royal Society of Chemistry.
- Rajpal, S., Singh, M. (Ed.). (2023). Molecularly Imprinted Polymers (MIPs): Commercialization Prospects. Elsevier.
- Reyes Angeles, M. C. (2023). Diseño y síntesis de polielectrolitos ácidos, básicos y anfóteros para obtener materiales funcionales con aplicaciones de intercambio iónico. Tesis UAH.

Referencias

1. **Billmeyer, Fred W.** *Ciencia de los polimeros*. Barcelona : Reverté, 1975.
2. **Unión Internacional de química pura y aplicada.** *Compendium of Chemical Terminology*. 5ta. 1996. pág. 2289.
3. **Puttegowda, Madhu, Mavinkere Rangappa, Sanjay y Siengchin, Suchart.** *Fiber-Reinforced polymer composites*. Londres : Elsevier, 2025.
4. **Todo en polimeros.** Tipos de polimeros. *Todo en polimeros*. [En línea] <https://todoenpolimeros.com/tipos-de-polimeros/>.
5. **Meira, Gregorio y Gugliotta, Luis.** *Polimeros, introducción a su caracterización y a la ingeniería de la polimerización*. Santa Fe : UNL, 2019.
6. *Polyelectrolyte and polyelectrolyte complex-incorporated adsorbents in water and wastewater remediation – A review of recent advances*. **Kwame Bediako, John, y otros.** 2023, Chemosphere, Vol. 325.
7. **Budd, Peter Martin.** Polyelectrolites.
8. **Reyes Angeles, Mari Carmen.** Diseño y síntesis de polielectrolitos ácidos, básicos y anfóteros para obtener materiales funcionales con aplicaciones de intercambio iónico. [Tesis de Doctorado] agosto de 2023.
9. **Ming, Chen, et.al.** *Application of polyelectrolytes for contaminant removal and recovery during water and waste water treatment: A critical review*. 2024, Journal of Water Process Engineering, Vol. 64.
10. **Yu, Jia-Li, y otros.** *Simultaneous dyeing and wastewater treatment in one bath by constructing cationic polyelectrolyte self-assembled coating onto cellulosic fabrics*. 2025, Sustainable Chemistry and Pharmacy, Vol. 45.
11. **Liu, Su, et. al.** *Polyelectrolyte membranes for selective nutrient recovery from PFAS-contaminated wastewater in forward osmosis*. 2025, Vol. 287.
12. **Morosanu, Irina, et. al.** *Shaping polyelectrolyte composites for heavy metals adsorption from wastewater: Experimental assessment and equilibrium studies*. 2022, Journal of Environmental Management, Vol. 321.
13. **Chand Bansal, Roop y Goyal, Meenakshi.** *Activated carbon adsorption*. Boca Raton : CRC Press, 2005.
14. **Çeçen, Ferhan y Aktaş, Özgür** . *Activated Carbon for Water and Wastewater Treatment*. Weinheim : Wiley-VCH Verlag & Co. KGaA, 2012.
15. **Sankaranarayanan, Sivashunmugam, et.al.** *Biocarbons as emerging and sustainable hydrophobic/oleophilic sorbent*. 2021, Sustainable Materials and Technologies.

16. **Ganjoo, Richika, et. al.** *Activated carbon progress and applications*. Reino Unido : Royal Society of Chemistry (RSC), 2023.
17. **Marsh , Henry y Rodriguez Reinoso, Francisco.** *Activated carbon* . s.l. : Elsevier Science & Technology Books , 2006. 0080444636 .
18. **Newcombe, Gayle y Dixon, David.** *Interface Science in Drinking Water Treatment*. s.l. : Elsevier Ltd, 2006. Vol. 10. 978-0-12-088380-6.
19. **Hussaini Jagaba, Ahmad, et.al.** *Engineered Biocomposites for Dye Adsorption*. s.l. : Elsevier, 2025. 9780443298776.
20. **Jones, D.L, Freeman, C y Sanchez Rodriguez, A.R.** *Encyclopedia of Applied Plant Sciences*. [ed.] Brian Thomas, Denis J Murphy J Murphy y Brian G Murray. s.l. : Academic Press, 2017. 9780123948083.
21. **Amaal A , Ali, Muhammad , Tawalbeh y Amani , Al-Othman.** *Comprehensive Green Materials*. [ed.] Abdul Ghani Olabi. s.l. : Elsevier, 2025. 9780443157394.
22. **Englande, A.J, Krenkel, Peter y Shamas, J.** *Wastewater Treatment & Water Reclamation*. s.l.: Elsevier, 2015. 9780124095489.
23. **Sharma, Shubhani y Mansoor Ahammed, M.** Chapter 12 - Color and nutrient removal using water treatment residuals. [ed.] Abu Zahrim Yaser, y otros. *Nutrients and Colored Compounds in Wastewater*. s.l. : Elsevier.
24. **López Hernandez, Diana Laura** . *Remoción de colorantes textiles utilizando adsorbentes preparados a partir de semillas de chirimoya*. [Tesis de Licenciatura] Puebla: s.n., 2023.
25. **Vallero, Daniel A.** Chapter 15 - Water pollution engineering. [aut. libro] Daniel A Vallero. *Fundamentals of Water Pollution*. s.l. : Elsevier, 2025.
26. **Jeyashanthi, J, et.al.** *Assessment of physical and chemical water quality parameters using naive bayes control algorithm*. **Jeyashanthi, J, et.al.** 2023, Materials Today: Proceedings, Vol. 80.
27. **Singh, Nirankar, et.al.** Chapter 9 - Challenges of water contamination in urban areas. [ed.] Arun Lal Srivastav, y otros. s.l. : Elsevier, Vol. 6.
28. **Muniraj, Selvakumar, et.al.** 6. Drinking water treatment with natural coagulants—a promising alternative for sustainable water usage. [ed.] Mika Sillanpää, Ali Khadir y Khum Gurung. *Resource Recovery in Drinking Water Treatment*. s.l. : Elsevier, 2023.
29. **Ibrahim, Azreen y Zahrim Yaser, Abu.** Chapter 24 - Treatment of biologically treated landfill leachate by coagulation for possible reuse in agriculture. *Nutrients and Colored Compounds in Wastewater*. s.l. : Elsevier, 2025.
30. **Kumar Purkait,, Mihir, Pratim Das, Pranjal y Sharma, Mukesh.** Chapter 2 - Water treatment techniques for the remediation of drinking and industrial wastewater. [ed.]

Mihir Kumar Purkait, Pranjal Pratim Das y Mukesh Sharma. *Electrocoagulation Based Treatment of Water and Wastewater*. s.l. : Elsevier, 2024.

31. **El-taweel, Reem M., et.al.** *A review of coagulation explaining its definition, mechanism, coagulant types, and optimization models; RSM, and ANN*. Egipto: Elsevier, 2023, Current Research in Green and Sustainable Chemistry, Vol. 6.

32. **de Vargas Briao, Giani, et.al.** *Electrochemical processes for the treatment of contaminant-rich wastewater: A comprehensive review*. 2024, Chemosphere, Vol. 355. 0045-6535.

33. **Yadav, Priya, y otros.** Chapter Eleven - Contamination removal from waste water using electrochemical approaches. *Advances in Chemical Pollution, Environmental Management and Protection*. s.l. : Elsevier, Vol. 10.

34. **Millán Ocampo, Daysi Elusaí, et. al.** *La electroquímica como alternativa en el tratamiento de aguas contaminadas con metales pesados*. Inventio, Vol. 19.

35. **Ariffin, Fazilah y Syahmi Latif, Mohamad Adib.** Chapter 22 - Biological treatment of azo dye in textile wastewater: a comprehensive review. [aut. libro] Fazilah Ariffin y Mohamad Adib Syahmi Latif. *Nutrients and Colored Compounds in Wastewater*. s.l. : Elsevier, 2025.

36. **Singh, Dhananjay, et.al.** *Strategies for biological treatment of waste water: A critical review*. 2024: s.n., Journal of Cleaner Production, Vol. 454. 0959-6526.

37. **Agarwal, Jyoti y Sonia.** 3 - Dyes and dyeing processes for natural textiles and their key sustainability issues. *Fundamentals of Natural Fibres and Textiles*. s.l. : Elsevier, 2021.

38. **Tamburini , Diego, et.al.** *An Introduction and Recent Advances in the Analytical Study of Early Synthetic Dyes and Organic Pigments in Cultural Heritage*. 2024, Heritage.

39. **Emil, Wich.** *The Colour Index*. 1977, Vol. 2.

40. **Ohifueme Alegbe, Emmanuel y Olatunde Uthman, Taofik.** *A review of history, properties, classification, applications and challenges of natural and synthetic dyes*. Nigeria : s.n., 2024, Heliyon, Vol. 10. 2405-8440.

41. **Benkhay, Said, El Harfi, Sara y El Harfi, Ahmed.** *Classifications, properties and applications of textile dyes: A review*. Kenitra: s.n., 2017, Applied Journal of Environmental Engineering Science.

42. **Marcano, Deanna.** *Introducción a la química de los colorantes*. Caracas Venezuela : Academia de Ciencias Físicas, Matemáticas y Ciencias Naturales , 2018. 978-980-6195-59-2.

43. **Gürses, A., Açikyıldız, M., Güneş, K., Gürses, MS.** *Dyes and Pigments: Their Structure and Properties*. *Dyes and Pigments*. s.l. : Springer, 2016.

44. **Hubbe, Martin A, Azizian, Saeid y Douven, Sigrid.** *Implications of apparent pseudo-second-order adsorption kinetics onto cellulosic materials: A review.* 2019, BioResources, págs. 7582-7626.