



***UNIVERSIDAD AUTÓNOMA  
DEL ESTADO DE HIDALGO***

**INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E  
INGENIERÍA**

***“OBTENCIÓN DE CARBÓN ACTIVADO A PARTIR DE  
ACETATO DE CELULOSA DE COLILLAS DE  
CIGARRO”***

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO DE MATERIALES**

**PRESENTA**

**EYLIN ISABEL COCA GONZÁLEZ**

**DIRECTORA DE TESIS:**

**DRA. ANA MARÍA HERRERA GONZÁLEZ**

**CODIRECTORA DE TESIS:**

**DRA. ALEJANDRA ALICIA PELÁEZ CID**

**MINERAL DE LA REFORMA, HGO. 2020**



Mineral de la Reforma, Hgo., a 20 de octubre de 2020

Número de control: ICBI-D/2328/2020  
 Asunto: Autorización de tesis.

**M. EN C. JULIO CÉSAR LEINES MEDÉCIGO**  
**DIRECTOR DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR DE LA**  
**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO**

Por este conducto le comunico que el Jurado asignado a la pasante de la Licenciatura en Ingeniería en Materiales **Eylin Isabel Coca González**, quien presenta el trabajo de: **“OBTENCIÓN DE CARBÓN ACTIVADO A PARTIR DE ACETATO CELULOSA DE COLILLAS DE CIGARRO”**, después de revisar el trabajo ha decidido autorizar la impresión del mismo, hechas las correcciones que fueron acordadas.

A continuación, se anotan las firmas de conformidad de los integrantes del Jurado:

PRESIDENTE: Dr. Jesús García Serrano

PRIMER VOCAL: Dra. Ana María Herrera González

SECRETARIO: Dra. Alejandra Alicia Peláez Cid

SUPLENTE: Dra. Nayely Trejo Carbajal

Sin otro particular, le reitero a usted la seguridad de mi atenta consideración.

Atentamente  
 “Amor, Orden y Progreso”

Dr. Otilio Arturo Acevedo Sandoval  
 Director del ICBI



OAAS/IVL



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

www.uaeh.edu.mx

## AGRADECIMIENTOS

A mis padres por confiar y creer en mis expectativas, por los consejos, valores y principios que me han inculcado, por su amor, trabajo y sacrificio en todos estos años, gracias a ustedes he logrado llegar hasta aquí y convertirme en lo que soy. A mi hermano por su cariño y apoyo incondicional, durante todo este proceso, por estar conmigo en todo momento gracias. A toda mi familia porque con sus oraciones, consejos y palabras de aliento hicieron de mí una mejor persona y de una u otra forma me acompañan en todos mis sueños y metas.

A la Dra. Ana María Herrera González por haber sido la primer y última profesora que me impartió clase, le agradezco por todo el apoyo y los consejos que me ha brindado a lo largo de mi carrera. También le agradezco el haber compartido su conocimiento y su tiempo conmigo, por haber confiado en mí para realizar este proyecto, es una persona a la cual admiro y respeto bastante, en pocas palabras usted me inspira a ser una mejor persona.

A la Dra. Alejandra Alicia Peláez Cid por brindarme los recursos que fueron necesarios para llevar a cabo este proyecto de investigación. No hubiese podido arribar a estos resultados de no haber sido por su incondicional ayuda.

A la Dra. Nayeli Trejo Carbajal por haberme enseñado a desenvolverme un poco más en el laboratorio, por su paciencia, por las explicaciones, por ayudarme en todas las dificultades que se llegaron a presentar y el conocimiento brindado realmente aprendí mucho gracias a usted.

A Esmeralda Gómez Merino por ayudarme en la síntesis de los carbones activados y en los experimentos de adsorción. A Mary Carmen Reyes por la manera tan clara en la que me explicabas los procedimientos, era muy fácil aprender contigo, también por la paciencia que me tenías, por ayudarme y brindarme tu apoyo siempre que lo necesitaba realmente te lo agradezco mucho. A Alma Pérez por facilitarme el conocimiento con los programas en los que tenía dificultad, por ayudarme a redactar los párrafos en donde era necesario, por resolver mis dudas en general y créeme que nunca olvidaré los principios básicos

de la destilación. A Abraham por enseñarme a utilizar los equipos cuando lo necesitaba, también te agradezco por el conocimiento y el apoyo brindado.

A mis amigos “Los bebés” aunque ese fue el último nombre que se quedó, por haber pasado todos esos momentos juntos y haber hecho la carrera más amena espero de todo corazón que cada uno cumpla lo que se proponga y a mis amigos en general que han estado conmigo en estos años les agradezco todo el tiempo que hemos pasado juntos, gracias a todas estas personas he madurado, he cambiado mi manera de pensar, he vivido muchas experiencias y lo más importante he aprendido todos los días a intentar ser una mejor persona.

A Spot Sustentable una organización sin fines de lucro por la colaboración en el presente trabajo a través de la recolección de colillas de cigarro en establecimientos como bares, restaurantes, cafeterías, plazas comerciales en Pachuca, Hidalgo.

El presente trabajo se realizó en el Laboratorio de Polímeros del Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, bajo la dirección de la Dra. Ana María Herrera González y en el Laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Ingeniería de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla con la dirección de la Dra. Alejandra Alicia Peláez Cid.

## Índice

Índice de figuras .....	8
Índice de tablas.....	10
Símbolos y abreviaturas .....	11
Introducción .....	12
<b>CAPÍTULO 1. GENERALIDADES.....</b>	<b>14</b>
1.1 Definición de polímero .....	14
1.2 Historia de los polímeros.....	14
1.3 Clasificación de los polímeros.....	15
1.4 Aplicaciones de los polímeros.....	17
<b>CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES .....</b>	<b>18</b>
2.1 Celulosa.....	18
2.1.1 Obtención de la celulosa.....	19
2.1.2 Acetilación de celulosa.....	21
2.2 Acetato de celulosa.....	22
2.2.1 Ventajas y desventajas del acetato de celulosa .....	23
2.2.2 Desacetilación del acetato de celulosa.....	24
2.2.3 Degradación del acetato de celulosa.....	25
2.2.4 Tipos de degradación del acetato de celulosa.....	25
2.2.5 Aplicaciones del acetato de celulosa.....	26
2.3 Filtros de acetato de celulosa en cigarros .....	26
2.3.1 Elaboración de filtros de acetato de celulosa .....	28
2.3.2 Residuos generados con los filtros de acetato de celulosa .....	28
2.3.3 Componentes en las colillas de cigarro después de su uso .....	28

2.3.4 Degradación de las colillas de cigarro .....	29
2.3.5 Spot Sustentable.....	30
2.4 Carbones activados .....	30
2.4.1 Método físico o térmico .....	31
2.4.2 Método químico.....	31
2.5 Colorantes .....	32
CAPÍTULO 3. DESARROLLO EXPERIMENTAL .....	34
3.1 Recolección y limpieza de colillas .....	34
3.2 Caracterización de las colillas de acetato de celulosa.....	35
3.2.1 Análisis FT-IR.....	35
3.2.2 Método TGA de análisis .....	35
3.2.3 Resonancia magnética nuclear .....	35
3.2.4 Superficie específica de BET .....	35
3.2.5 Análisis microestructural .....	36
3.2.6 Pruebas de solubilidad .....	37
3.2.7 Punto de fusión .....	37
3.2.8 Hidrólisis del acetato de celulosa .....	37
3.2.9 Obtención de los carbones.....	37
3.2.10 Tamizado .....	38
3.2.11 Adsorción de colorantes en solución acuosa.....	39
CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIONES .....	40
4.1 Caracterización del acetato de celulosa, celulosa y los carbones activados .....	40
4.1.1 Análisis FT-IR.....	40
4.1.2 Análisis termograviméticoTGA .....	43

4.1.3 Resonancia magnética nuclear .....	46
4.1.4 Análisis microestructural .....	47
4.1.5 Pruebas de solubilidad .....	49
4.1.6 Punto de fusión .....	49
4.2. Adsorción de colorantes en soluciones acuosas .....	50
4.2.1 Superficie específica de BET .....	52
Conclusiones .....	54
Bibliografía.....	55

## Índice de figuras

**Figura 1.** Diagrama de las diferentes clasificaciones de polímeros

**Figura 2.** Molécula de celulosa

**Figura 3.** Cadenas de celulosa unidas entre sí mediante puentes de hidrógeno

**Figura 4.** Acetilación de la celulosa

**Figura 5.** Molécula del acetato de celulosa

**Figura 6.** Reacción de desacetilación del acetato de celulosa

**Figura 7.** Composición de un cigarro

**Figura 8.** Contenedores de colillas de la organización Spot Sustentable

**Figura 9.** A)Carbón activado físicamente de colillas limpias (CarCLF) y B)Carbón activado físicamente de colillas sucias (CarCSF)

**Figura 10.** A)Carbón activado químicamente de colillas limpias (CarCLQ) y B)Carbón activado químicamente de colillas sucias (CarCSQ)

**Figura 11.** Espectros FT-IR de las colillas después del lavado

**Figura 12.** Espectros FT-IR de los carbones activados

**Figura 13.** Espectros FT-IR de los carbones activados químicamente después de la adsorción del colorante BB9

**Figura 14.** Termogramas del acetato de celulosa de las colillas sin lavar y de las colillas lavadas con Clarasol

**Figura 15.** Termogramas de los cuatro carbones activados

**Figura 16.** Espectros de RMN de  $^1\text{H}$  a) acetato de celulosa; b) celulosa obtenida de la hidrólisis del acetato de celulosa

**Figura 17.** Imágenes de SEM de los carbones CarCLQ (A, B, C), CarCLF (D, E, F), CarCSQ (G, H, I), CarCSF (J, K, L).

**Figura 18.** Adsorción de colorantes textiles con una concentración inicial de  $300 \text{ mg / dm}^3$

**Figura 19.** Adsorción del colorante BB9 pasados 10 minutos de adicionar los carbones (1.CarCLQ, 2.CarLF, 3.CarCSQ, 4.CarCSF)

**Figura 20.** Adsorción del colorante BB9 pasadas 48 horas de adicionar los carbones (1.CarCLQ, 2.CarLF, 3.CarCSQ, 4.CarCSF)

## **Índice de tablas**

**Tabla 1.** Características físico - químicas de la celulosa

**Tabla 2.** Propiedades físicas y químicas del azul de metileno y del turquesa sirius

**Tabla 3.** Propiedades de los colorantes utilizados

**Tabla 4.** Pruebas de solubilidad del acetato de celulosa

**Tabla 5.** Punto de fusión del acetato de celulosa

**Tabla 6.** Parámetros texturales de los carbones activados preparados a partir de colillas de cigarro

## **Símbolos y abreviaturas**

**Å** Angstrom

**°C** Grados Celsius

**η** Grado de polimerización

**λ máx** Longitud de onda de máxima absorbancia

**AC** Acetato de celulosa

**AGU** anhidro-D-glucopiranososa

**ATR** Reflectancia Totalmente Atenuada

**CarCLQ** Carbón de colillas limpias activado químicamente

**CarCSQ** Carbón de colillas sucias activado químicamente

**CarCLF** Carbón de colillas limpias activado físicamente

**CarCSF** Carbón de colillas sucias activado físicamente

**cm<sup>-1</sup>** Ciclos por centímetro

**DMF** Dimetilformamida

**DMSO** Dimetilsulfóxido

**DS** Grado de sustitución

**IUPAC** Unión Internacional de Química Pura y Aplicada

**NaOH 1M** Hidróxido de Sodio 1 molar

**HB** Posición horizontal

**OMS** Organización Mundial de la Salud

**PS** Parcialmente soluble

**S<sub>BET</sub>** Superficie específica BET

**SEM** Microscopía Electrónica de Barrido

**T<sub>g</sub>** Temperatura de transición vítrea

## Introducción

Mediante distintos medios de comunicación se ha informado del incremento de la contaminación ambiental en los últimos años<sup>1</sup>, es a causa de los objetos desechados en buen estado, pero que el consumidor considera basura<sup>2</sup>, de la misma manera los sectores de transporte, industrial y comercial<sup>3</sup> juegan un papel importante en la generación de contaminantes. Sin embargo, un contaminante que podría parecer insignificante, pero en realidad es bastante dañino es el cigarro; desde su cultivo, producción, uso y desechos causa daños al ambiente, por ejemplo, pérdida de biodiversidad, incendios forestales, aumento del cambio climático, mala calidad del aire<sup>4</sup> y de los cuerpos de agua, además de enfermedades respiratorias al ser humano.

De acuerdo con datos de la OMS, se requiere talar 8 árboles para producir 300 cigarrillos, sin contar los árboles usados en la fabricación del papel para el cigarrillo y las cajetillas<sup>5</sup>. Además, se estima que aproximadamente el 56% de los fumadores arroja la colilla al piso<sup>6</sup>. Los filtros de cigarro, que posteriormente serán colillas, son elaborados con acetato de celulosa, un polímero semi-sintético derivado de la celulosa. La celulosa un polímero termoestable natural muy abundante en la naturaleza que se puede encontrar en el algodón, la caña de azúcar, la madera y prácticamente en todos los vegetales. Para obtener acetato de celulosa se extrae la pulpa de la madera y mediante una reacción con ácido acético y anhídrido acético en presencia de catalizadores como ácido sulfúrico, clorhídrico o fosfórico, se produce la acetilación de la celulosa.

La razón por la cual los filtros de cigarro están elaborados de este material es por su resistencia a la humedad, temperatura y la firmeza que se logra con la aplicación de un plastificante durante el proceso de fabricación. El filtro estándar contiene aproximadamente entre 10,000 a 16,000 fibras orientadas de diferentes maneras para evitar que las partículas de tabaco ingresen en la boca del consumidor. Las dimensiones y el diámetro del filtro se determinan de acuerdo con

el tipo de acetato de celulosa utilizado en la fabricación de las colillas de cigarrillos.

Se buscan diversas maneras para reducir la contaminación de este residuo elaborando fertilizantes, insecticidas a base de tabaco<sup>7</sup>; además de elaborar productos de uso comercial con colillas de cigarro y la presente propuesta de producir carbón activado. El carbón activado es un material carbonoso y microcristalino, preparado por carbonización de materiales orgánicos, que se ha sometido a un proceso de activación con gases oxidantes, o adición de productos químicos, con el objetivo de aumentar su porosidad y su superficie específica, obteniendo una gran capacidad de adsorción<sup>8</sup>, las propiedades del carbón activado están ligadas a la naturaleza del precursor y a las condiciones de la activación.

El carbón activado posee una amplia gama de aplicaciones entre las que destacan eliminación de impurezas que causan color, olor y sabor en agua potable, purificación de aire y gases, decoloración de vinos, zumos y vinagres, filtros para mascarillas de gases y eliminación de colorantes en aguas residuales<sup>9</sup>. Mediante la adsorción se pueden remover este tipo de contaminantes debido a que es considerada una de las mejores técnicas y una de las más empleadas para la remoción de contaminantes orgánicos e inorgánicos del agua<sup>10</sup>. Con la selección de un adecuado adsorbente, el proceso de adsorción puede ser una técnica prometedora para la remoción de contaminantes, otro beneficio es que si el material adsorbente usado no requiere tratamiento previo este procedimiento reduce el costo<sup>11</sup>, y se añade un valor agregado. Al analizar la información anterior se determinó elaborar carbón activado mediante el uso de un precursor como son las colillas de cigarro que son un deshecho y para tratar de contrarrestar el impacto ambiental que éste genera, se determinaron cuáles eran las condiciones óptimas para que el costo fuera bajo, el carbón activado se caracterizó y se verificó su utilidad en la remoción de colorantes textiles presentes en soluciones acuosas y aguas residuales.

## CAPÍTULO 1. GENERALIDADES

### 1.1 Definición de polímero

La palabra polímero viene del prefijo griego “poli” (muchos) y del sufijo “mero” (partes o porción)<sup>12</sup>. Se puede definir un polímero como una gran molécula constituida de monómeros. La IUPAC define a un polímero como un compuesto de relativo alto peso molecular, constituido de la repetición múltiple de unidades monoméricas. Entendiendo por relativamente alto peso molecular que al adicionar o retirar una o varias unidades monoméricas sus propiedades no cambian<sup>13</sup>. Los polímeros pueden clasificarse de diferentes formas. Por ejemplo, de acuerdo a la estructura de la cadena, estos se clasifican en; lineales, muy parecida a un largo collar de perlas, los de cadena ramificada que a escala molecular se parecen a las ramas de un árbol, y por último los entrecruzados, éstos forman redes tridimensionales donde las cadenas están unidas unas a otras por enlaces laterales.

La longitud de la cadena polimérica puede ser de diferentes tamaños, y viene especificada por el número de unidades monoméricas que se repiten a lo largo de ella, llamado grado de polimerización ( $n$ )<sup>14</sup>. Cada uno de los polímeros tiene propiedades únicas que dependen de la naturaleza de los monómeros y cómo estén unidos. Dentro de sus características más importantes, resaltan su bajo costo, su alta especificidad y adaptabilidad. Estas características en los polímeros les han dado una amplia gama de aplicaciones que van desde una materia prima, un componente para mejorar otro producto o un producto final<sup>12</sup>.

### 1.2 Historia de los polímeros

En el año de 1838 fue descubierto el nitrato de la celulosa o nitrocelulosa, pero no fue hasta el año 1870 en el que Hyatt patenta el celuloide. En 1839 y mientras Charles Goodyear realizaba experimentos se percató de que un trozo de caucho había caído en una mezcla caliente con azufre, el material no presentaba fusión, pero se había quemado, de esta forma nació el proceso de vulcanización nombrado así por el Dios Vulcano o “Dios del fuego”<sup>15,16</sup>.

Tanto la celulosa como el nitrato de celulosa son polímeros lineales o bidimensionales, la celulosa no puede reblandecerse a causa de los múltiples puentes de hidrógeno que hay entre las cadenas poliméricas<sup>17</sup>. Schönbein redujo el número de puentes de hidrógeno presentes en la celulosa haciéndola reaccionar con ácido nítrico, más tarde Menard elaboró una solución equimolar de etanol con éter etílico para disolver nitrato de celulosa. Posteriormente, Hyatt añadió alcanfor ablandando el inflamable dinitrato de celulosa reduciendo la cantidad de los puentes de hidrógeno. Chardonnet transformó la celulosa en filamentos continuos después de una desnitrificación y un alargamiento. Dichos filamentos poseían todas las propiedades físicas y químicas de la celulosa original. Debido a estos experimentos la celulosa podía ser disuelta y precipitada por tratamiento químico.

Más tarde en 1907 Leo Baekeland había creado el primer material polimérico sintético denominado baquelita<sup>18</sup>. La baquelita, resina termoplástica, es obtenida por condensación de fenol con una pequeña cantidad de formaldehído en solución ácida o básica, así mismo esta resina podía convertirse en plásticos termoestables dependiendo de las condiciones de reacción. Para el año 1953 Ziegler y Natta introdujeron catalizadores, con los cuales se obtenían polímeros lineales que no presentaban ramificaciones. También estos catalizadores dieron inicio del control de la estereoquímica de los polímeros generando formas sindiotácticas, isotácticas y atácticas<sup>17,19</sup>.

### **1.3 Clasificación de los polímeros**

Los polímeros pueden clasificarse de muy diversas formas como se muestra en la Figura 1<sup>20</sup>.



**Figura 1.** Diagrama de las diferentes clasificaciones de polímeros

En el presente trabajo solo nos enfocaremos en la clasificación relacionada a su origen; naturales, semi-sintéticos y sintéticos.

**Polímeros naturales:** Son aquellos que están presentes en la naturaleza y se obtienen del reino vegetal o animal y no son modificados por el hombre. Algunos ejemplos de los más comunes son: la seda, celulosa, lana, caucho, quitina, colágeno, almidón, ADN, entre otros.

Polímeros semi-sintéticos: Son polímeros que se encuentran en la naturaleza, pero han sufrido modificaciones químicas por el hombre, por ejemplo, el acetato de celulosa, el quitosano, la hidroxipropilcelulosa, caucho vulcanizado, etc.

Polímeros sintéticos: Son aquellos obtenidos en laboratorios por el hombre a través de procesos de polimerización controlados, proporcionándoles así las características que sean requeridas. Algunos ejemplos son: policloruro de vinilo, poliestireno, caucho sintético, silicona, polietileno, neopreno, nylon, etc.<sup>12</sup>.

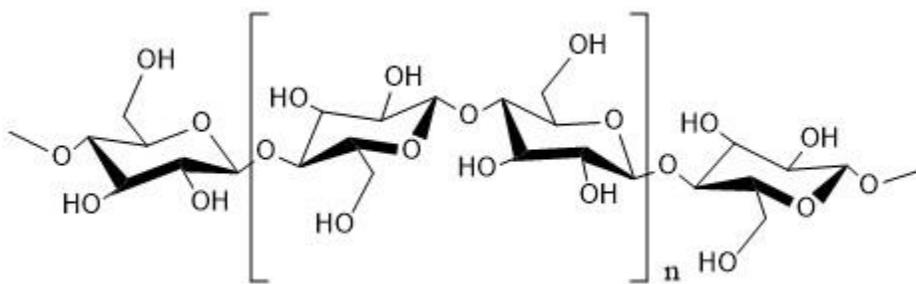
#### **1.4 Aplicaciones de los polímeros**

Debido a los avances tecnológicos que han ido surgiendo desde que se descubrieron los polímeros ahora es muy común utilizarlos en la vida cotidiana, en muchas ocasiones desconocemos que muchos productos estén fabricados a partir de materiales poliméricos; ya que los podemos encontrar en productos tan comunes como los pañales, donde los polímeros presentan una capacidad de super-adsorción de líquidos<sup>21</sup>. También se encuentran en aplicaciones automotrices y aeroespaciales, adhesivos, pinturas, envasado, ropa, materiales para estructuras de construcción y de ingeniería en piezas mecánicas<sup>12</sup>, sólo por mencionar los más comunes. Dado que estamos viviendo “la era de los polímeros”, los temas de investigación de este tipo de materiales han ido en aumento con la finalidad de darles nuevos usos como, por ejemplo, algunos polímeros cuando se someten a un proceso de dopaje poseen la característica de conducir electricidad, por otro lado, se busca que otros sean biocompatibles con el cuerpo humano, así como también hay biopolímeros producidos por fermentación bacteriana. Otros temas de interés son los polímeros conductores, termocromáticos, piezoeléctricos, cristales líquidos<sup>15</sup> y la lista continúa debido a que modificando su estructura química y/o combinándolos de una manera adecuada con otros materiales se pueden encontrar nuevos usos.

## CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES

### 2.1 Celulosa

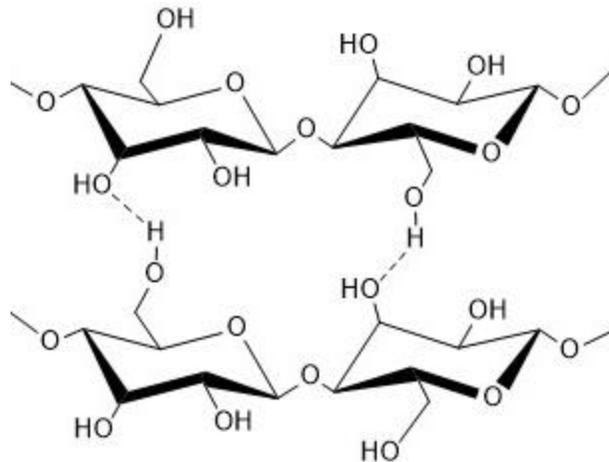
La celulosa es un polímero orgánico<sup>22</sup>, renovable<sup>23</sup>, muy abundante en el reino vegetal<sup>23,24,25,26</sup>, es un polisacárido, de la clase homopolisacáridos, que está constituida por un solo tipo de monosacáridos, la glucosa<sup>27</sup>. Está estructurada en unidades de glucosa unidas a  $\beta$ -1,4-glucósidos tal como se observa en la Figura 2<sup>27,28</sup>, se encuentra en la naturaleza en fuentes como algodón, caña de azúcar, madera, paja entre otros materiales de origen vegetal<sup>23,29,30</sup>. Su fórmula empírica es  $(C_6H_{10}O_5)_n$ , en el cual "n" representa el grado de polimerización, el cual depende del origen de la celulosa. La celulosa es la biomolécula orgánica más abundante, ya que conforma la mayor parte de la biomasa terrestre<sup>31</sup>.



**Figura 2.** Molécula de celulosa

La celulosa está constituida de largas cadenas poliméricas constituida de unidades llamadas anhidro-D-glucopiranososa (AGU); cada molécula de celulosa posee tres grupos hidroxilo por AGU, que se encuentran libres en las posiciones C2, C3 y C6 de las unidades de repetición de la glucosa con la excepción de los extremos terminales<sup>26,32</sup>. La rigidez de la celulosa aumenta con el compacto empaquetamiento intercrystalino y su flexibilidad disminuye al aumentar la relación de forma cristalina a amorfa. Además, los grupos -OH libres a lo largo de la cadena polimérica de la celulosa están involucrados en una serie de puentes de hidrógeno inter e intramoleculares (Figura 3), la escasa solubilidad se atribuye a estos enlaces, que pueden ayudar en la formación de varios planos cristalinos

ordenados de largo alcance<sup>26</sup>. Las microfibras de la celulosa tienen un diámetro desde 20 hasta 200 Å, mientras su longitud puede alcanzar varias decenas de micrones, su Tg es de 225°C<sup>13</sup>.



**Figura 3.** Cadenas de celulosa unidas entre sí mediante puentes de hidrógeno

Dado que las nanofibras de celulosa a base de plantas tienen el potencial de ser extraídas en fibras más delgadas que la celulosa bacteriana, muchos investigadores han estudiado ampliamente la extracción de nanofibras de la madera y de otros vegetales. En las paredes celulares, las nanofibras de celulosa están incrustadas en sustancias como la hemicelulosa y la lignina<sup>33</sup>.

Las propiedades físicas de la celulosa, así como su comportamiento químico y reactividad, están fuertemente influenciadas por la disposición de las moléculas de celulosa entre sí (Tabla 1)<sup>34</sup>. La mayoría de los reactivos penetran sólo en las regiones amorfas y es sólo en estas regiones con un bajo nivel de orden y en la superficie de los cristalitos que las reacciones pueden tener lugar, sin afectar las regiones cristalinas<sup>22</sup>.

### 2.1.1 Obtención de la celulosa

Celulosa química: Se obtiene haciendo un tratamiento de la biomasa con productos químicos en condiciones de temperatura y presión elevadas. Estas

celulosas se caracterizan por ser más resistentes, debido a que en el proceso no se producen modificaciones.

Celulosa mecánica: Esta es obtenida desfibrando la materia prima a altas temperaturas y presiones. Se caracteriza por ser menos resistente que la celulosa química ya que sufre un cambio en su proceso de fabricación.

Celulosa quimio-termo mecánica: Utiliza los dos procesos anteriores. La celulosa resultante de estos procesos tiene la forma de una pasta (con un alto contenido de agua) y tiene aún una proporción importante de lignina, ésta le da una tonalidad color café, similar al color natural de la madera<sup>27</sup>.

**Tabla 1. Características físico - químicas de la celulosa**

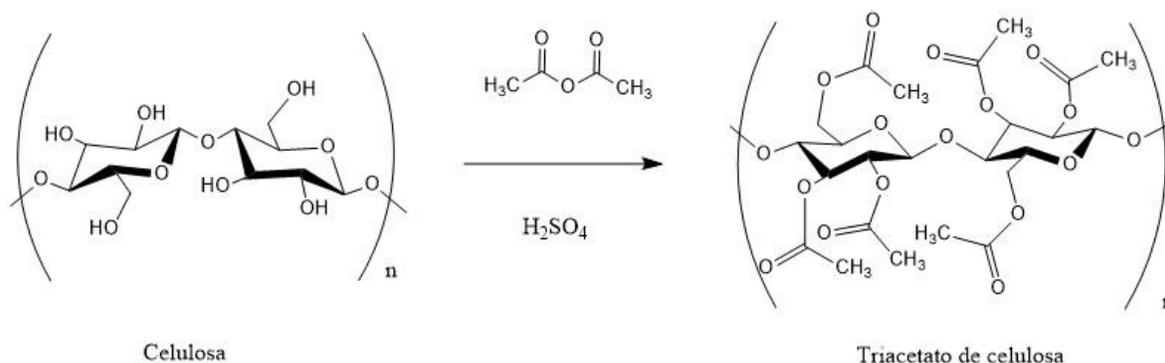
<b>Propiedades eléctricas</b>	
Constante dieléctrica (1 MHz)	~5
Factor de disipación (1 kHz)	0.06
Resistencia dieléctrica (kV / mm)	11
Resistividad de volumen (Ohm cm)	$5 \times 10^{12}$
<b>Propiedades físicas</b>	
Adsorción de agua en 24 h (%)	1.9 – 7.0
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	1.3
Índice de refracción	1.49
Índice de oxígeno límite (%)	19
Inflamabilidad	HB*
Resistencia a la radiación solar	Aceptable
Resistencia a los rayos UV	Aceptable
<b>Propiedades mecánicas</b>	
Dureza – Rockwell	34 – 125
Módulo de tracción (GPa)	1.0 – 4.0
Resistencia a la abrasión – ASTM D1044 (mg / 1000 ciclos)	65
Resistencia a la tracción (Mpa)	12 – 110
Resistencia al impacto Izod (J / m)	100 – 450
<b>Propiedades térmicas</b>	
Calor específico (J / K kg)	1200 – 1900
Coefficiente de expansión térmica ( $1 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ )	80 – 180
Conductividad térmica a 23 °C (W / m K)	0.16 – 0.36
Temperatura máxima de uso (°C)	55 – 95
Temperatura mínima de uso (°C)	-20
Temperatura de deflexión en caliente 0.45 Mpa (°C)	52 – 105
Temperatura de deflexión en caliente 1.8 Mpa (°C)	48 – 86
<b>Resistencia química</b>	
Ácidos minerales – concentrados	Mala

Ácidos minerales – diluidos	Buena – mala
Alcalis – concentrados	Buena – mala
Alcoholes	Aceptable – buena
Cetonas	Mala
Grasas y aceites	Buena
Halógenos	Mala
Hidrocarburos halogenados	Buena – mala
Hidrocarburos aromáticos	Buena – mala

HB\*: Posición horizontal

### 2.1.2 Acetilación de celulosa

Para que el proceso de acetilación sea exitoso se requieren de varios factores; uno de ellos es la etapa de activación de los grupos hidroxilo, que facilitará la accesibilidad y reactividad de dichos grupos a los agentes acetilantes. En general, durante cualquier reacción química que involucre celulosa, los reactivos se difunden en la capa interna de la fibra de celulosa, lo que conduce a la ruptura de los enlaces intra e intermoleculares. Este proceso degrada la región cristalina de la fibra haciendo que más grupos hidroxilo sean accesibles para la reacción, lo que resulta en un aumento en el grado de sustitución (DS). Con un adecuado hinchamiento de celulosa<sup>35</sup>, debido a la penetración de los disolventes y reactivos entre las cadenas poliméricas, facilitan la activación de los grupos hidroxilo y la reacción de acetilación es favorecida y, por lo tanto, mejora el DS.

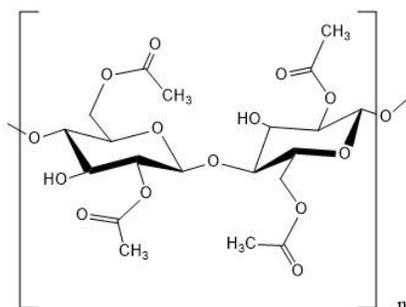


**Figura 4.** Acetilación de la celulosa

Los métodos heterogéneos son comúnmente aplicados en la producción de la mayoría de los derivados de celulosa comercial<sup>36</sup>, el acetato de celulosa se produce por la reacción homogénea de la celulosa con exceso de anhídrido acético en presencia de un catalizador<sup>27,29,37</sup>. Este proceso tiene algunas limitantes, una de ellas es que la preparación directa de acetatos de celulosa monosustituidos y disustituidos es imposible, debido a las diferentes reactividades y accesibilidad a los grupos -OH en la celulosa en las regiones amorfas y cristalinas. Sin embargo, la acetilación es homogénea si los grupos -OH en la cadena de celulosa son accesibles para la derivatización. Como principales ventajas podemos encontrar que el valor de DS se controla de manera efectiva ajustando el tiempo de reacción, la temperatura y la relación molar del agente derivatizante respecto a la celulosa. Aunque durante la acetilación existe degradación de celulosa, la degradación del polímero natural es insignificante durante la reacción y, es posible controlar el grado total de sustitución, creando más opciones para introducir nuevos grupos funcionales y abrir nuevas vías para el diseño de productos. Desafortunadamente, no existe un ejemplo industrial para producir acetatos de celulosa mediante acetilación homogénea. El principal obstáculo es la falta de conocimiento sobre las condiciones de reacción, la estructura y las propiedades de los productos, así como también el re-uso de los disolventes<sup>38</sup>.

## **2.2 Acetato de celulosa**

El acetato de celulosa (Figura 5), es uno de los derivados de la celulosa más importantes ya que la gama de productos que se elaboran a partir de él es bastante amplia y de alta calidad<sup>26</sup>. Su fórmula empírica es  $(C_{20}H_{24}O_{13})_n$  se elabora típicamente a partir de pulpa de madera<sup>39</sup> mediante una reacción con ácido acético y anhídrido acético en presencia de catalizadores como ácido sulfúrico, clorhídrico, fosfórico, entre otros<sup>27,29,37</sup>. La esterificación lleva al triacetato de celulosa a un DS máximo de 3.0, dado que tiene una escasa solubilidad y muy pocas aplicaciones técnicas, el triacetato se hidroliza parcialmente a un DS de 2.45<sup>39</sup>. El grado de sustitución puede variar, pero el valor más común es el de 2.5 debido a la buena solubilidad en disolventes comunes<sup>24</sup>.



**Figura 5.** Molécula del acetato de celulosa

Inicialmente, la producción comercial de acetato de celulosa utilizaba cloruro de zinc como catalizador, pero fue reemplazado por ácido sulfúrico, que era más barato y tenía un tiempo de producción más corto. Aunque la adición de acetona como disolvente ayudó a completar la reacción, se produjo diacetato en lugar del triacetato totalmente esterificado, por lo que este proceso no se adoptó<sup>37</sup>. También se demostró que los acetatos de celulosa con diferentes DS se pueden obtener variando la relación molar y el tiempo de reacción en una síntesis completamente homogénea<sup>36</sup> por lo tanto, la solubilidad y la termoplaticidad de los derivados de celulosa dependen del DS<sup>40</sup>.

### 2.2.1 Ventajas y desventajas del acetato de celulosa

Entre las ventajas que se pueden encontrar son, que es un polímero termoestable con un módulo de Young de 138 GPa<sup>41</sup>, Tg de 135.92°C, no es inflamable, tiene buena resistencia a la exposición de la luz<sup>27</sup>, es biodegradable, tiene excelente claridad óptica, alta tenacidad<sup>30</sup>, es de bajo costo<sup>39,42</sup>, posee buena resistencia química y estabilidad térmica<sup>17</sup>, es mecánicamente estable, inerte, bioestable, se puede disolver en una mezcla de ácido acético / acetona<sup>23</sup>, es un polímero hidrofílico con buen transporte de líquidos y buena capacidad de adsorción de agua<sup>26</sup>. Otra ventaja destacable es que el poliácridonitrilo (PAN) y el acetato de celulosa pueden producir fácilmente fibras en N, N-dimetilformamida (DMF)<sup>43</sup>.

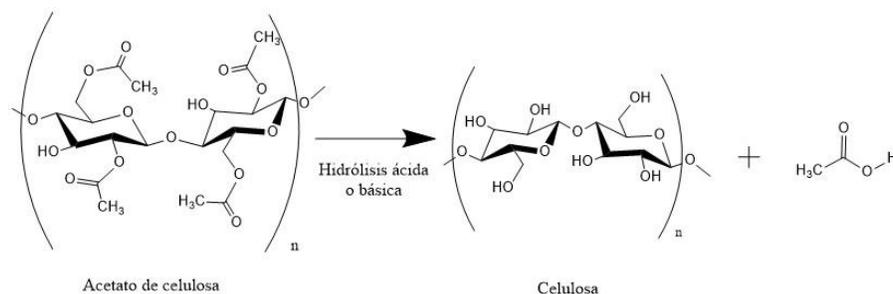
Sin embargo también se encuentran algunas desventajas en las que se destacan las bajas propiedades mecánicas y de resistencia que limitan sus aplicaciones

como material de apósito para heridas<sup>26</sup>, su rango de fusión típico está cerca de su temperatura de descomposición<sup>30</sup>; posee una alta temperatura de transición vítrea (Tg) pero no puede procesarse en estado fundido como materia prima porque comienza a descomponerse antes de fundirse por lo tanto, requiere el uso de plastificantes para reducir su Tg y la temperatura de procesamiento. En la plastificación de la celulosa se usan citratos, ftalatos, derivados de glicerol, fosfatos, pero los ésteres de ftalato son una amenaza para la salud entonces nuevos estudios han implementado el uso de plastificantes como el poli(caprolactontriol), el polietilenglicol y el propilenglicol solo por mencionar algunos<sup>24</sup>.

### 2.2.2 Desacetilación del acetato de celulosa

El acetato de celulosa (AC) tiene grupos éster y enlaces glucosídicos en su estructura, y es concebible que los enlaces glucosídicos del AC reaccionen durante la hidrólisis por catálisis de ácidos y bases en un sistema homogéneo o a altas temperaturas. La hidrólisis (es decir, la desacetilación) reduce el DS y cambia las propiedades físicas<sup>40</sup>.

La desacetilación se caracteriza por la formación del ácido acético. El ácido acético generado puede actuar como un catalizador para una mayor desacetilación, esta reacción puede volverse autocatalítica debido a que el ácido acético liberado permanece atrapado dentro de la matriz polimérica y migra lentamente a la superficie<sup>37</sup>.



**Figura 6.** Reacción de desacetilación del acetato de celulosa

### **2.2.3 Degradación del acetato de celulosa**

La celulosa se degrada fácilmente por organismos que utilizan enzimas de celulasa<sup>24</sup>, pero en el caso del acetato de celulosa los grupos acetato impiden que se degrade con facilidad. El proceso que conduce a la degradación puede estar en función de factores externos como la temperatura, la atmósfera del oxígeno y la exposición a la radiación, entre otros<sup>44</sup>: a menor DS, el acetato de celulosa se degradara más fácilmente debido al ataque de microorganismos en los grupos no sustituidos en la cadena del polímero<sup>42</sup>. Cuando se comenzaron a hacer estudios acerca de la biodegradabilidad de este material solo utilizaban hongos, esto ocasionó que la comunidad científica lo calificara como no biodegradable; más tarde se encontró que el acetato de celulosa requiere la presencia de esterases como paso principal para que ocurra la biodegradación, después de que ocurre el proceso de desacetilación parcial por enzimas o por hidrólisis química parcial la cadena principal del polímero se puede degradar fácilmente. El acetato de celulosa se degrada fotoquímicamente por longitudes de onda UV menores a 280 nm, pero tiene una fotodegradabilidad limitada en la luz solar debido a la falta de cromóforos para absorber la luz ultravioleta<sup>24,28</sup>.

### **2.2.4 Tipos de degradación del acetato de celulosa**

Escisión del enlace glucosídico: se asocia con la hidrólisis y, por lo general, también se considera catalizada por un ácido, por lo tanto, esta es facilitada por la presencia de ácido acético o sulfúrico. La escisión de la cadena y la apertura del anillo hacen que la matriz sea susceptible a una mayor entrada de humedad, lo que puede conducir a una reducción en la fuerza mecánica y cambios de volumen en la matriz. La escisión del enlace glucosídico generalmente sigue a la desacetilación de AC.

Pérdida de plastificante: Las películas y los grandes volúmenes de acetato de celulosa pueden tener niveles significativos de plastificante que oscilan entre el 20-40% en peso, además de contener pigmentos y cargas. La lixiviación del plastificante puede hacer que la superficie del artefacto sea pegajosa y

desagradable al tacto; la pérdida de plastificante con el tiempo provoca fragilidad y grietas en el material provocando su degradación<sup>37</sup>.

Fotodegradación: En general, se sabe que las fibras de acetato de celulosa tienen una mejor estabilidad a la luz que las fibras de celulosa, pero bajo la irradiación con radiación UV, se observa invariablemente la fotodegradación de los materiales de acetato de celulosa, y generalmente se considera como un proceso que involucra radicales libres<sup>45</sup>.

### **2.2.5 Aplicaciones del acetato de celulosa**

Entre sus usos más comunes se encuentran aplicaciones en el área automotriz, electrónica<sup>31</sup>, en productos de consumo incluidos textiles debido a su bajo costo, aditivos en recubrimientos de superficie y tintas<sup>39</sup>, plásticos, películas, en membranas, fibras y filtros de cigarrillos.

Como ya se mencionó anteriormente ya que es un polímero hidrofílico este evita el bloqueo de poros y la adsorción de solutos en comparación con sus contrapartes hidrófobas de alto flujo como polietersulfonas, polietileno y polipropileno<sup>25</sup>, así que se puede utilizar en aplicaciones como ósmosis inversa, ultrafiltración, membranas semipermeables para diálisis y microfiltración<sup>23</sup>. Puesto que nuevas investigaciones han informado que es un polímero biodegradable se puede aplicar en más campos como en medicina y farmacia, en la producción de materiales biocompuestos y para otros campos relacionados con biomateriales<sup>31</sup>.

### **2.3 Filtros de acetato de celulosa en cigarros**

Los filtros de cigarrillos, fabricados de acetato de celulosa, eliminan partículas sólidas<sup>39</sup>, así como sustancias orgánicas contenidas en el humo de cigarro. Proporcionan superficies para la condensación de vapor y poseen una boquilla funcional evitando que todas las partículas de tabaco entren en la boca del consumidor<sup>46</sup>. El grado en que se produce la condensación de vapor en los filtros depende de la longitud de la varilla de tabaco y es independiente de la caída de presión del filtro<sup>47</sup>. El filtro estándar contiene aproximadamente entre 10,000 a 16,000 fibras, estas fibras no están orientadas de manera paralela al flujo de aire,

sino que están puestas intencionalmente de manera perpendicular o desigual, lo que proporciona un mejor efecto de filtración<sup>48</sup>. Cuando se observa con un microscopio de luz blanca, las fibras de acetato de celulosa parecen tener una estructura interna similar a un canal. La mayoría de las otras fibras sintéticas son redondas u ovoides y no se conoce ninguna otra fibra sintética o natural que tenga la misma forma en “Y” que la fibra de filtro de cigarrillo<sup>49</sup>.

El tipo de filtro de cigarrillo más utilizado consiste en una sola barra de fibra de acetato de celulosa (AC). Otros diseños de filtros con geometría modificada o incorporando carbón granulado también son populares en ciertas partes del mundo. La elección de la fibra AC depende en gran medida de la resistencia a la humedad, la temperatura y la caída de presión (el esfuerzo aplicado por un consumidor para extraer una cantidad aceptable de humo) del filtro. La firmeza del filtro se logra mediante la aplicación de una pequeña cantidad de plastificante durante el proceso de fabricación del filtro.

Los cigarrillos comerciales modernos tienen orificios de ventilación a través del papel de envoltura que rodea el filtro para diluir el humo de la corriente principal debajo de la bocanada. La posición de los orificios de ventilación y su distribución también pueden tener una influencia secundaria en el comportamiento de filtración<sup>46</sup>. En la Figura 7 se muestran los componentes de un cigarro y su función.



- 1) Extremo de la varilla que se encuentra abierto para exponer el material de relleno y donde se enciende
- 2) Papel envolvente del material de relleno.
- 3) Varilla cilíndrica de material de relleno fumable.
- 4) Extremo donde se permite el paso del aire y humo y donde se pone la boca<sup>50</sup>.

**Figura 7.** Composición de un cigarro

### **2.3.1 Elaboración de filtros de acetato de celulosa**

Los filtros de cigarrillos están hechos de fibras de acetato de celulosa plastificadas envueltas en papel. El fabricante de varillas utiliza para convertir una banda continua (cable) de fibras de celulosa en una pequeña varilla de filtro. Durante este proceso, el fabricante de la barra, aplica un plastificante y luego envuelve el cable con papel en una barra continua<sup>51</sup>. La barra continua pasa a través de un cabezal de corte, que lo corta a una longitud específica, posteriormente se utilizan con uno o más plastificantes que suavizan la fibra. Luego, las barras de filtro se combinan con columnas de tabaco para producir el cigarrillo terminado<sup>51</sup>. Las dimensiones y el diámetro de la fibra se determinan de acuerdo con el tipo de acetato de celulosa utilizado en la fabricación de los filtros de cigarrillos<sup>48</sup>.

### **2.3.2 Residuos generados con los filtros de acetato de celulosa**

El filtro de acetato de celulosa se agregó a los cigarrillos en la década de 1950 a raíz de la evidencia científica, cada vez más convincente, que los cigarrillos causaban cáncer de pulmón y otras enfermedades graves. Se descubrió que el filtro reducía la cantidad de nicotina y alquitrán volviéndolos “más seguros”<sup>52</sup>. Los filtros de cigarrillos comprenden una porción significativa de basura que se ve en todo el mundo como se evidencia alrededor de edificios públicos, en estacionamientos y en puntos clave de tránsito<sup>51</sup>, además de ser el elemento más recolectado en la limpieza de playas<sup>52</sup>. Cada año acaban en los océanos aproximadamente 5 billones de colillas, vertiendo contaminantes metálicos y orgánicos que se liberan en contacto con el agua. Cada colilla puede llegar a contaminar entre 8 y 10 litros de agua marina y hasta 50 litros de agua dulce<sup>53</sup>. Se están introduciendo varias formas de recolección de colillas para no afectar el medio ambiente, sin embargo, debido a la falta de conciencia en la población aún es un problema y está en aumento.

### **2.3.3 Componentes en las colillas de cigarro después de su uso**

La composición química del humo del cigarrillo depende del tipo de tabaco utilizado, el papel del cigarrillo, la categoría y la efectividad del filtro, así como el grado de ventilación de la punta<sup>54</sup>. El humo del cigarro tiene dos fases definidas;

una que se debe al alquitrán conteniendo partículas sólidas que son retenidas por un filtro y la fase gaseosa que es la que penetra en los pulmones y atraviesa el filtro<sup>34</sup>.

En un cigarro se pueden encontrar hasta 4,000 componentes químicos tan solo en el humo, de los cuales 3,000 se encuentran en la fase gaseosa, 1,000 en el alquitrán y 60 productos químicos que se sabe son cancerígenos<sup>34,54</sup>. Entre los componentes más importantes se encuentran los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), N-nitrosaminas, aminas aromáticas, formaldehído, acetaldehído, benceno, metales tóxicos, aminas heterocíclicas, aldehídos volátiles, óxidos de nitrógeno, compuestos nitrogenados, entre otros. Muchas de estas sustancias son bioacumulables y persisten en la cadena trófica, o pueden llegar a filtrarse en el suelo y contaminar los mantos acuíferos<sup>55</sup>.

#### **2.3.4 Degradación de las colillas de cigarro**

Los filtros desechados persisten en el ambiente porque la envoltura de papel inhibe la radiación UV de la luz solar, pero cuando este se desprende aumenta la exposición de la matriz de las fibras a la radiación UV. Sin embargo, la estructura plastificada de la matriz limita el área superficial expuesta total de las fibras individuales y el DS debe ser menor o igual a uno para que los microorganismos lo perciban como alimento. Una forma de intentar que la degradación ocurra de manera más rápida es por medio de hidrólisis, pero es muy lento este proceso químico en condiciones ambientales. Generalmente, una vez que se consume el producto se descarta el filtro, el agua del ambiente libera el catalizador, este migra hacia la matriz del filtro, el pH desciende y comienza la hidrólisis catalizada por ácido.

Los microorganismos, la radiación UV, la temperatura, el estrés mecánico, el agua y la contaminación (smog) pueden degradar los materiales cuando están expuestos en el medio ambiente pero estos procesos de degradación también son lentos<sup>24</sup>.

### 2.3.5 Spot Sustentable

Spot sustentable es una organización sin fines de lucro que se encarga de recolectar colillas de cigarro en puntos de reunión como bares, restaurantes, cafeterías, plazas comerciales y puntos donde transitan muchas personas. El interés del presente trabajo surge a partir de intentar disminuir la contaminación producida por las colillas de cigarro en el medio ambiente, ya que es uno de los principales contaminantes en todo el mundo por los residuos que generan. Mediante el uso de contenedores, esta organización planea crear conciencia en la sociedad además de buscar reusar o reciclar el acetato de celulosa del cual están fabricadas las colillas.



**Figura 8.** Contenedores de colillas de la organización Spot Sustentable

### 2.4 Carbones activados

El carbón activado es el adsorbente más antiguo y conocido. La superficie requerida para que el carbón pueda considerarse un buen adsorbente se encuentra entre 500-2000 m<sup>2</sup>/g. Las moléculas que se encuentran en fase líquida se adsorben gracias a la interacción física que tienen con la superficie del carbón activado<sup>56,57,58</sup>.

Los carbones activados se usan como adsorbentes de adsorbatos orgánicos, inorgánicos y biológicos, ya sea en fase gaseosa o líquida<sup>59</sup>. Los carbones activados se comercializan principalmente de dos maneras, la primera es en forma

granular con aproximadamente 1 mm de diámetro y la segunda es en forma de polvo con partículas inferiores a 0.2 mm de diámetro, presentando una superficie específica mayor en comparación con los carbones granulares y con la desventaja de que es complicado separar el adsorbente en polvo del fluido<sup>60,61</sup>.

La capacidad de adsorción del carbón activado depende de factores, como su superficie específica, distribución del tamaño de poro<sup>62,63</sup>, volumen de poros, polaridad, entre otros<sup>59,64,65,66,67</sup>. Los poros en los carbones activados se clasifican por su tamaño, según la IUPAC, en microporos (< 2 nm), mesoporos (2 – 50 nm) y macroporos (> 50 nm)<sup>64,68,69</sup>. La preparación de carbones activados se realiza por dos métodos: el físico y el químico.

#### **2.4.1 Método físico o térmico**

Un método físico típico consiste en un tratamiento térmico que se lleva a cabo en dos etapas: en la primera etapa o pirólisis, los materiales de partida se carbonizan en una atmósfera inerte a una temperatura moderada para producir carbones con estructuras porosas. Posteriormente, en la segunda etapa o activación física, los carbones resultantes o incluso los materiales de partida, se someten a una gasificación con dióxido de carbono, vapor de agua, los gases de combustión u otros gases oxidantes<sup>69,70,71,72</sup>. La activación física permite un mejor control sobre la creación de una estructura microporosa y su principal ventaja es que evita la incorporación de impurezas provenientes del agente activador<sup>73</sup>.

#### **2.4.2 Método químico**

El método químico se realiza mediante la carbonización en un amplio rango de temperaturas, la materia prima es impregnada con ciertos productos químicos ya sea de tipo ácido o básico<sup>69</sup> como  $ZnCl_2$ , NaOH, KOH,  $H_2SO_4$  y  $H_3PO_4$ <sup>71,73</sup>. Posteriormente, se realiza la carbonización por un tratamiento térmico con rampas de calentamiento moderadas y con atmósfera inerte en un proceso de un solo paso<sup>73</sup>. La característica común de todas las sustancias utilizadas en el proceso de activación química es que son agentes hidrolizantes que influyen en la descomposición pirolítica<sup>66</sup>. Entre las ventajas se encuentran, que los carbones poseen una superficie específica grande, temperaturas de tratamiento más bajas

que en el método físico, un tiempo de tratamiento más corto<sup>70</sup>, la microporosidad puede desarrollarse, controlarse y mantenerse en un rango estrecho y por último hay una reducción importante del contenido de materia mineral<sup>66</sup>.

## 2.5 Colorantes

La adsorción en carbones activados tiene aplicaciones importantes como en la purificación de aire en espacios habitados, procesamiento de alimentos, así como también en la purificación de muchos productos químicos, alimenticios y farmacéuticos. Una de sus aplicaciones importantes es la eliminación de colorantes en el tratamiento de aguas residuales en la industria textil<sup>68</sup>.

Los colorantes se utilizan en diversas industrias, particularmente en textil, papel, caucho, plástico, cuero, cosméticos, fármacos y alimentos, para impartirle color a sus diferentes productos<sup>74</sup>.

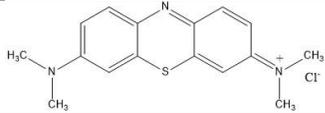
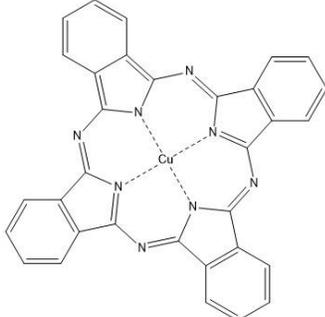
Uno de los colorantes más comunes es el azul de metileno, ha sido utilizado para el teñido de algodón y seda<sup>75</sup>. Es un compuesto químico heterocíclico aromático, su fórmula química es (C<sub>16</sub>H<sub>18</sub>ClN<sub>3</sub>S) y su nombre químico es cloruro de metiltionina<sup>2,76</sup>, es un colorante catiónico debido a que la base de la amina aporta el color mientras que la parte ácida es incolora. Posee una longitud de onda de máxima absorción a 664 nm<sup>74</sup>, esta molécula tiene una sección transversal molecular mínima de aproximadamente 0.8 nm y se ha estimado que el diámetro mínimo de poro en el que puede entrar es de 1.3 nm. Por lo tanto, solo puede ingresar a los microporos más grandes, pero es probable que la mayor parte se adsorba en los mesoporos<sup>77</sup>. En la Tabla 2 se mencionan algunas propiedades del colorante azul de metileno y del turquesa sirius.

**Tabla 2.** Propiedades físicas y químicas del azul de metileno y del turquesa sirius

Propiedades	Azul de metileno	Turquesa sirius
Solubilidad en agua	40 g/l a (20 °C)	70 g/L a (90° C)

<b>Punto de fusión</b>	180 °C	N/A
<b>Peso molecular</b>	319.9 g/mol	780,17 g/mol
<b>Estado físico</b>	Sólido	Sólido
<b>Densidad</b>	1.9 g/cm <sup>3</sup> (25 °C)	1.10 g/mL (20 °C)
<b>Color</b>	Azul verdoso	Azul
<b>Olor</b>	Inodoro	Inodoro
<b>pH</b>	3 (agua: 10 g /l , 20 °C)	1.5 (agua: 10 g /l , 20 °C)

**Tabla 3.** Propiedades de los colorantes utilizados

Colorante	Estructura química	Colour Index (C.I.)	Clave	Carácter	$\lambda_{\text{máx}}$ (nm)
Azul de metileno		Azul básico 9 (C.I. 52015)	BB9	Catiónico	664
Turquesa sirius		Turquesa directo 86 (C.I. 74180)	DT86	Aniónico	624

## **CAPÍTULO 3. DESARROLLO EXPERIMENTAL**

### **3.1 Recolección y limpieza de colillas**

La obtención de las colillas de cigarro con las que se llevó a cabo el desarrollo del presente trabajo, fue a través de la organización hidalguense “Spot Sustentable” que opera en la ciudad de Pachuca. “Spot Sustentable” realizó la recolección de las colillas de cigarro las cuales se sometieron a un tratamiento y para su posterior aplicación.

Para la primera etapa del lavado de acetato de celulosa se utilizaron dos diferentes blanqueadores comerciales a base de hipoclorito de sodio Cloralex (4 - 6% de NaClO y 0.02% de NaOH) y Clarasol (composición desconocida).

El lavado se realizó a cuatro lotes de colillas de 6 gramos, los cuales no recibieron tratamiento previo y no se removió el papel arroz que cubre el filtro. Dos de estos lotes se sumergieron en Cloralex y los otros dos en Clarasol (120 ml en cada caso) durante 20 minutos, pasado este tiempo se decantó el blanqueador y en un segundo lavado se añadieron 120 ml más del blanqueador correspondiente, por 20 minutos más. Al cabo de este tiempo se retiró el blanqueador por decantación para posteriormente realizar un tercer lavado con 120 ml de cloro limpio y dejarlas inmersas durante 24 horas. Después de retirar el blanqueador, se removió el papel arroz que cubre el filtro, así como la parte del filtro quemado.

A continuación, las colillas fueron lavadas nuevamente con agua destilada para retirar el exceso de blanqueador, posteriormente, se secaron en una estufa a 70 °C durante dos horas.

Al término del tratamiento de limpieza se observó que, las colillas tratadas con Cloralex sufren una degradación posiblemente debida a la hidrólisis de los grupos acetato. Por lo tanto, el blanqueador de la marca Clarasol es el adecuado para el proceso de limpieza de las colillas ya que evita su degradación. Previo al tratamiento con Clarasol, se realizó un lavado con agua, posteriormente se sumergieron en una solución Clarasol:agua 1:1.3 durante una hora. Para retirar la

materia ocluida en las fibras de acetato de celulosa, éstas se sumergieron en una solución etanol:agua 1:2, durante una hora con 30 minutos seguido de un lavado final con agua destilada. Finalmente, las colillas limpias y exprimidas se colocaron dentro de una estufa a 70 °C durante 12 h para secarlas completamente. Para el resto de las colillas de cigarro se realizó el mismo procedimiento de lavado.

### **3.2 Caracterización de las colillas de acetato de celulosa**

#### **3.2.1 Análisis FT-IR**

La caracterización de los grupos funcionales presentes en las colillas de cigarro y en los carbones activados preparados, se hizo mediante el método de espectroscopia infrarrojo con transformada de Fourier (FTIR), utilizando un espectrofotómetro *Perkin-Elmer FT-IR Frontier* con accesorio de reflectancia totalmente atenuada (ATR).

#### **3.2.2 Método TGA de análisis**

El análisis termogravimétrico (TGA) de las colillas de cigarro y los carbones, fue determinado utilizando un analizador termogravimétrico *Mettler Toledo TGA/SDTA 851°* en una atmósfera de N<sub>2</sub> con un rango de temperaturas de 50 °C a 900 °C y una rampa de calentamiento de 10 °C/min.

#### **3.2.3 Resonancia magnética nuclear**

La estructura del acetato de celulosa de las colillas de cigarro y de la celulosa después de la desacetilación, se elucidó mediante Resonancia Magnética Nuclear de protón (RMN de <sup>1</sup>H) en un equipo Bruker Ascend™ 400 MHz, utilizando DMSO-d<sub>6</sub>, como disolvente deuterado.

#### **3.2.4 Superficie específica de BET**

La capacidad de los carbones activados para adsorber y desorber gases, ha sido estudiada desde tiempo atrás. Uno de los modelos más utilizados para determinar la superficie de un sólido es el análisis de área superficial, propuesto por Brunauer, Emmett y Teller, de donde provienen las siglas BET. Este análisis, se basa en la adsorción de un gas inerte, generalmente N<sub>2</sub>, a baja temperatura. La aplicación de dicho método permite determinar el área de superficie real, la

distribución porosa, el tamaño y el volumen de poros en la muestra midiendo la superficie de las estructuras finas y la textura interior de las partículas. El modelo BET es una ecuación de adsorción de dos parámetros y se muestra en la ecuación (1):

$$\frac{P}{W(P_0 - P)} = \frac{1}{W_m C} + \frac{C - 1}{W_m C} \left( \frac{P}{P_0} \right) \quad (1)$$

Donde  $P_0$  es la presión de saturación del gas usado,  $W$  es la cantidad adsorbida a la presión  $P$ ,  $W_m$  es la capacidad de la monocapa y  $C$  es una constante que da información de la interacción entre adsorbato y adsorbente.

Las propiedades de los carbones fueron obtenidas por medio de la adsorción de nitrógeno a 77 K, usando un analizador de área superficial y porosidad Micromeritics. La superficie específica ( $S_{BET}$ ), el volumen total de poro ( $V_{TP}$ ), el volumen de los microporos ( $V_{\mu p}$ ) y el diámetro promedio de poro ( $D_{AP}$ ) fueron calculados con el software del equipo *ASAP 2020*. El volumen total de poro es el volumen de nitrógeno adsorbido a una presión relativa cercana a la unidad  $\frac{P}{P_0} = 0.98$ . El volumen de los microporos fue determinado usando el método de la *Curva-t*. El volumen de los mesoporos ( $V_{mesoP}$ ) fue calculado usando la diferencia entre  $V_{TP}$  y  $V_{\mu p}$ . El diámetro promedio de poro se estimó usando la relación  $\frac{4V_{TP}}{S_{BET}}$ .

### 3.2.5 Análisis microestructural

La microscopía electrónica de barrido (MEB o SEM por sus siglas en inglés), es una técnica de caracterización superficial no destructiva que proporciona información morfológica y de composición química de los materiales. Los carbones se colocaron en probetas y fueron esparcidos en una cinta de grafito para después realizar el recubrimiento con oro y hacer que la muestra sea conductora. El estudio de las muestras se realizó en un microscopio electrónico de barrido *JEOL modelo JSM-6010PLUS/LA*.

### **3.2.6 Pruebas de solubilidad**

Las pruebas de solubilidad se realizaron pesando un gramo de acetato de celulosa y utilizando 2 ml de disolventes polares y no polares tales como agua, etanol, acetona, metanol, DMF, DMSO, diclorometano, hexano, acetato de etilo, solución de NaOH 1M, solución de HCl 5% y cloroformo.

### **3.2.7 Punto de fusión**

La determinación del punto de fusión del acetato de celulosa se realizó en las colillas con lavado previo al igual que en las colillas sin tratamiento previo. Estas mediciones se realizaron utilizando un fusiómetro digital IA-9100 marca: Electrothermal.

### **3.2.8 Hidrólisis del acetato de celulosa**

Como se aprecia en la Figura 6, el acetato de celulosa puede sufrir una reacción de hidrólisis o desacetilación para remover el grupo acetato. En el presente proyecto se llevó a cabo la desacetilación de las colillas con la finalidad de obtener celulosa.

De las colillas limpias, se pesaron 500 mg y se colocaron en un matraz balón de dos bocas provisto de un agitador magnético y se añadieron 20 ml de acetona posteriormente se adicionaron 0.0925 g de LiBr (1 equivalente), 0.54 ml de terbutilamina (5 equivalentes) y 10 ml de agua destilada. La mezcla de reacción se puso bajo condiciones de reflujo y al completarse la reacción se enfrió a temperatura ambiente para recuperar el producto mediante centrifugación.

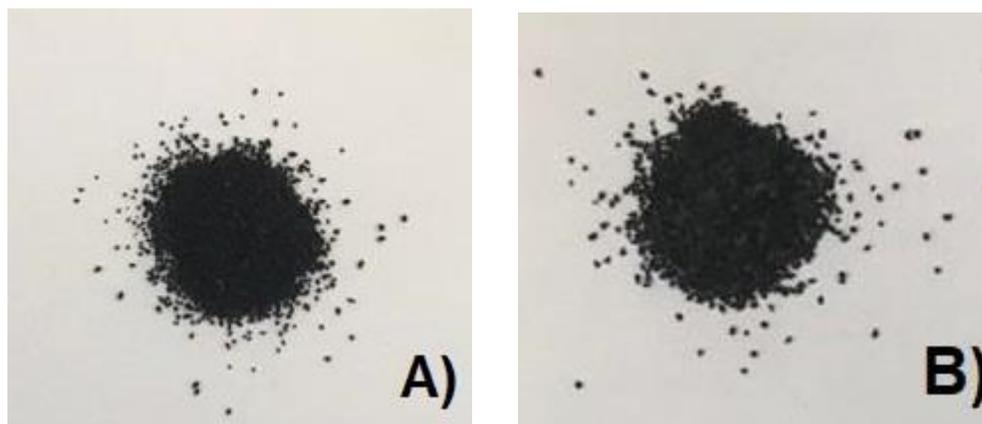
### **3.2.9 Obtención de los carbones**

Se prepararon cuatro carbones activados física y químicamente utilizando tanto colillas sucias como limpias. La temperatura, el tiempo de carbonización y la rampa de calentamiento, fue semejante para todos los carbones y fue de 350 °C, 100 min y 5 °C/min, respectivamente. Los carbones obtenidos por activación física, haciendo pasar una corriente de vapor de agua durante la carbonización, se designaron con los nombres, CarCLF y CarCSF, siendo el primero, el carbón de colillas limpias activado físicamente y el segundo el preparado con colillas sucias.

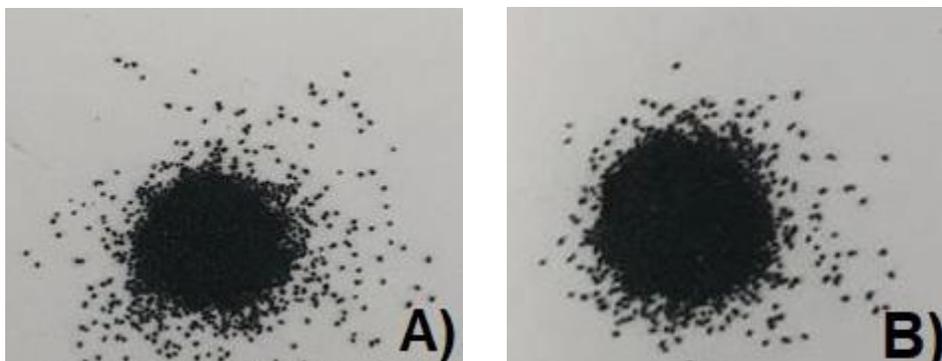
Los carbones activados químicamente se prepararon por inmersión, por separado, de cierta cantidad de colillas sucias y limpias en solución de  $H_3PO_4$  al 37.5% v/v durante una hora, transcurrido ese tiempo, se eliminó el exceso de solución ácida y se procedió a la carbonización con las condiciones antes mencionadas. CarCLQ y CarCSQ fueron los nombres asignados a los carbones activados químicamente, utilizando colillas limpias y sucias respectivamente. Posterior a la carbonización, CarCLQ y CarCSQ se lavaron con agua caliente ( $90 \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$ ) y se sometieron a ultrasonido para eliminar el exceso de ácido utilizado durante la activación química. Una vez concluido el proceso de lavado se eliminó el exceso de agua y se secaron los carbones en la estufa a  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  durante 12 h.

### 3.2.10 Tamizado

Después de la obtención de los carbones activados físicamente CarCLF y CarCSF (Figura 9), y de los carbones activados químicamente CarCLQ y CarCSQ (Figura 10) se tritularon y tamizaron para obtener un tamaño de partícula de 0.248 mm (malla 60) y 0.425 mm (malla 40).



**Figura 9.** A) Carbón activado físicamente de colillas limpias (CarCLF) y B) Carbón activado físicamente de colillas sucias (CarCSF)



**Figura 10.** A) Carbón activado químicamente de colillas limpias (CarCLQ) y B) Carbón activado químicamente de colillas sucias (CarCSQ)

### 3.2.11 Adsorción de colorantes en solución acuosa

Para la adsorción estática de los colorantes BB9 y DT86 se utilizaron soluciones acuosas con una concentración de  $300 \text{ mg/dm}^3$ , se utilizó una relación de masa de adsorbente a volumen de solución de colorante (m/V) de  $5 \text{ mg/dm}^3$ . Las celdas de adsorción que contenían las soluciones de colorantes y los diferentes adsorbentes en estudio se agitaron tridimensionalmente en un agitador orbital durante 8 horas. Posteriormente, las celdas de adsorción se mantuvieron estáticas en la estufa a  $30^\circ\text{C}$  durante 48 horas hasta que se alcanzó el equilibrio de adsorción.

La cantidad de colorante adsorbido fue calculado usando la ecuación (2):

$$a = \frac{V * (C_i - C_{eq})}{m} \quad (2)$$

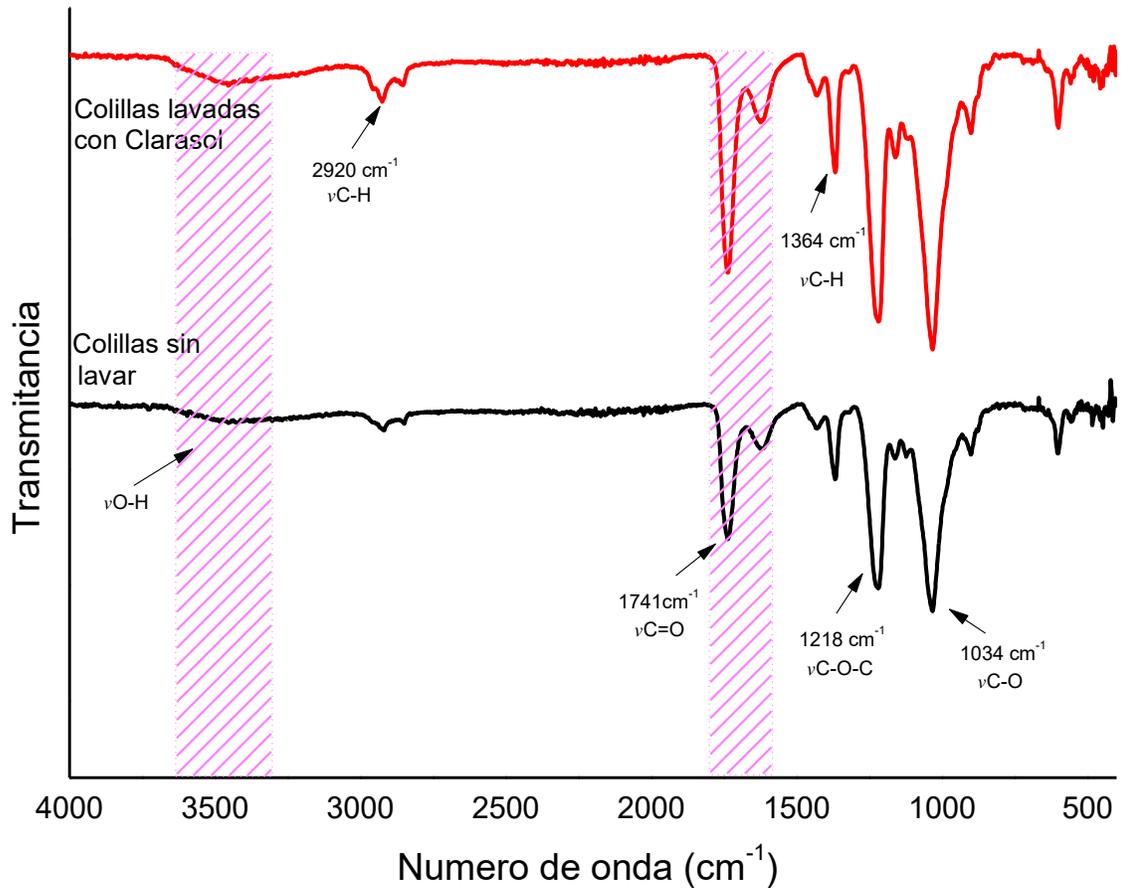
Donde **a** es la cantidad de colorante adsorbido (mg/g), **V** el volumen de la solución ( $\text{dm}^3$ ), **C<sub>i</sub>** y **C<sub>eq</sub>** son las concentraciones iniciales y de equilibrio ( $\text{mg/dm}^3$ ) respectivamente y **m** es la masa del adsorbente (g).

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIONES

### 4.1 Caracterización del acetato de celulosa, celulosa y los carbones activados

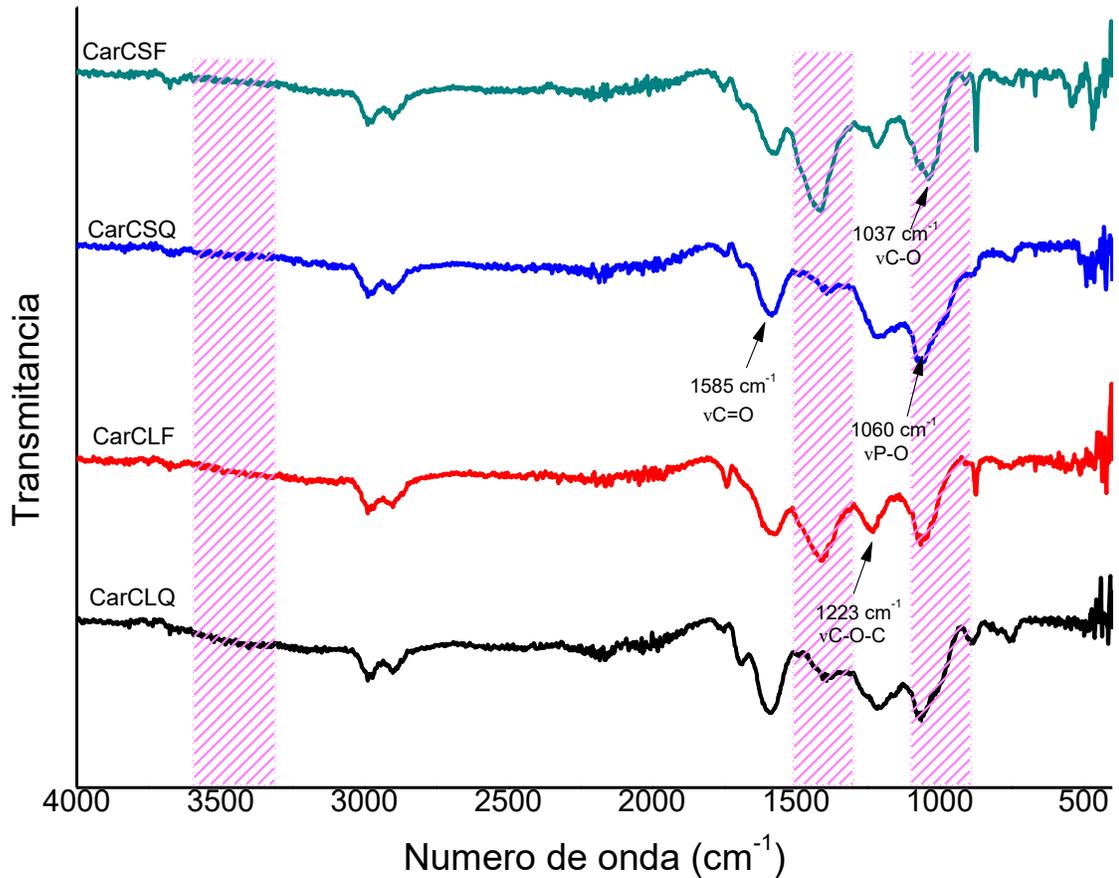
#### 4.1.1 Análisis FT-IR

La Figura 11 muestra los espectros de FT-IR de las colillas de cigarro después del lavado. En el espectro se observa una banda de absorción de 3300 a 3600  $\text{cm}^{-1}$ , correspondiente al modo de vibración de elongación perteneciente a los grupos hidroxilo  $\nu\text{O-H}$ , característico de los materiales celulósicos, se puede observar en 2920  $\text{cm}^{-1}$  una banda correspondiente al movimiento de tensión del enlace  $\nu\text{C-H}$  de los grupos metilo. Para el grupo acetato se observan dos bandas de absorción características, la primera es debida al modo de vibración de elongación  $\nu\text{C=O}$  del carbonilo en 1741  $\text{cm}^{-1}$  y en 1218  $\text{cm}^{-1}$  se puede observar una banda de absorción correspondiente al movimiento de elongación del enlace  $\nu\text{C-O-C}$ . Se observa una banda de absorción en 1364  $\text{cm}^{-1}$  correspondiente a la deformación asimétrica  $\nu\text{CH}$  del  $\text{CH}_3$  del acetato, otra banda de absorción característica del acetato de celulosa es la asociada al movimiento de elongación del grupo funcional  $\nu\text{C-O}$  en 1034  $\text{cm}^{-1}$  del anillo.



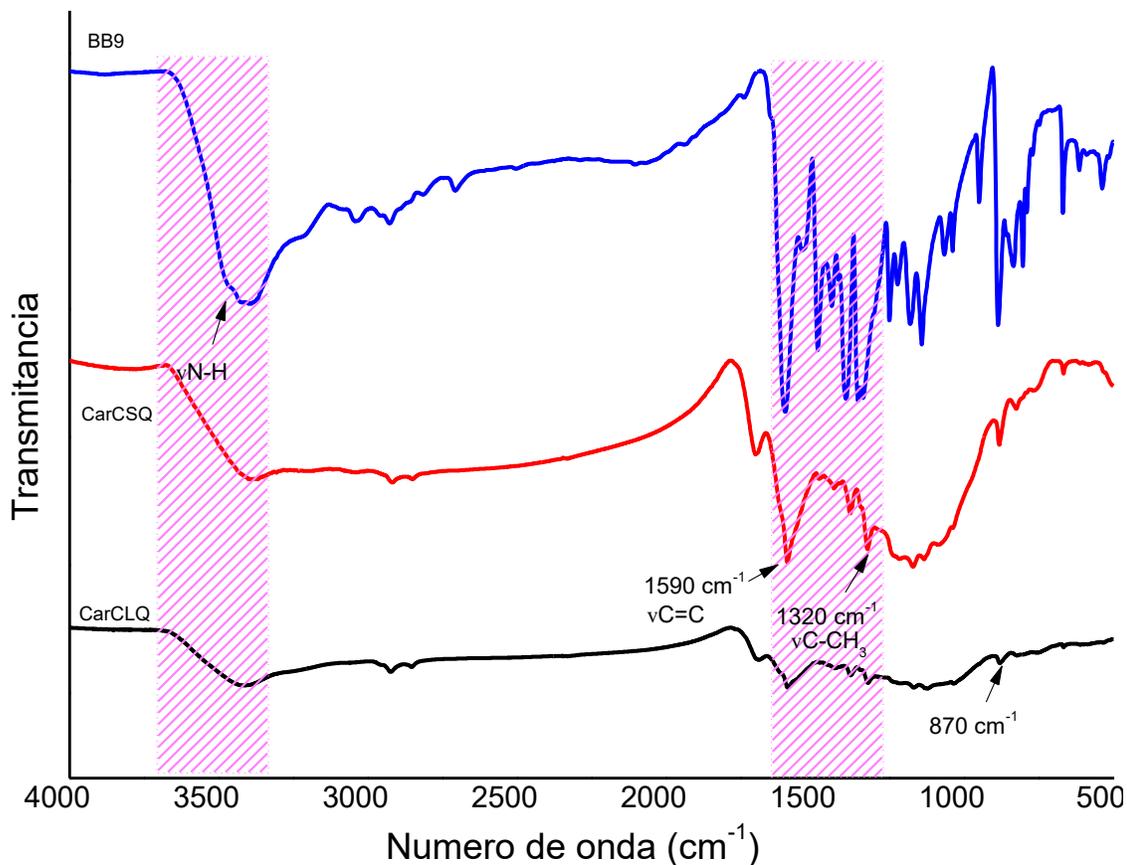
**Figura 11.** Espectros FT-IR de las colillas después del lavado

En la Figura 12, se muestran los espectros de los carbones activados, en los cuatro carbones se pueden apreciar las mismas bandas de absorción con diferentes intensidades o ligeros cambios en los números de onda. Como es de esperarse, debido a la carbonización no se observa la banda de absorción del grupo carbonilo en ambos tipos de carbones físico y químico ( $1741\text{cm}^{-1}$   $\nu\text{C}=\text{O}$ ), así como la banda de  $3300\text{ cm}^{-1}$  a  $3600\text{ cm}^{-1}$ , correspondiente al modo de vibración de elongación perteneciente a los grupos hidroxilo  $\nu\text{O-H}$ . Por el contrario, la banda en  $1585\text{ cm}^{-1}$  en los carbones químicos presenta mayor intensidad, mientras que la banda de  $1060\text{ cm}^{-1}$  no se aprecia en los carbones físicos por la falta de  $\text{H}_3\text{PO}_4$  durante la activación química<sup>78,79</sup>.



**Figura 12.** Espectros FT-IR de los carbones activados.

Después de la adsorción del colorante BB9 sobre los carbones activados CarCSQ y CarCLQ se obtuvieron los espectros FT-IR (Figura 13). En los espectros de los carbones activados químicamente después de la adsorción de BB9, aparecen las bandas de los carbones y del colorante, lo cual es una clara evidencia de la adsorción del colorante BB9 sobre la superficie de CarCLQ y CarCSQ.

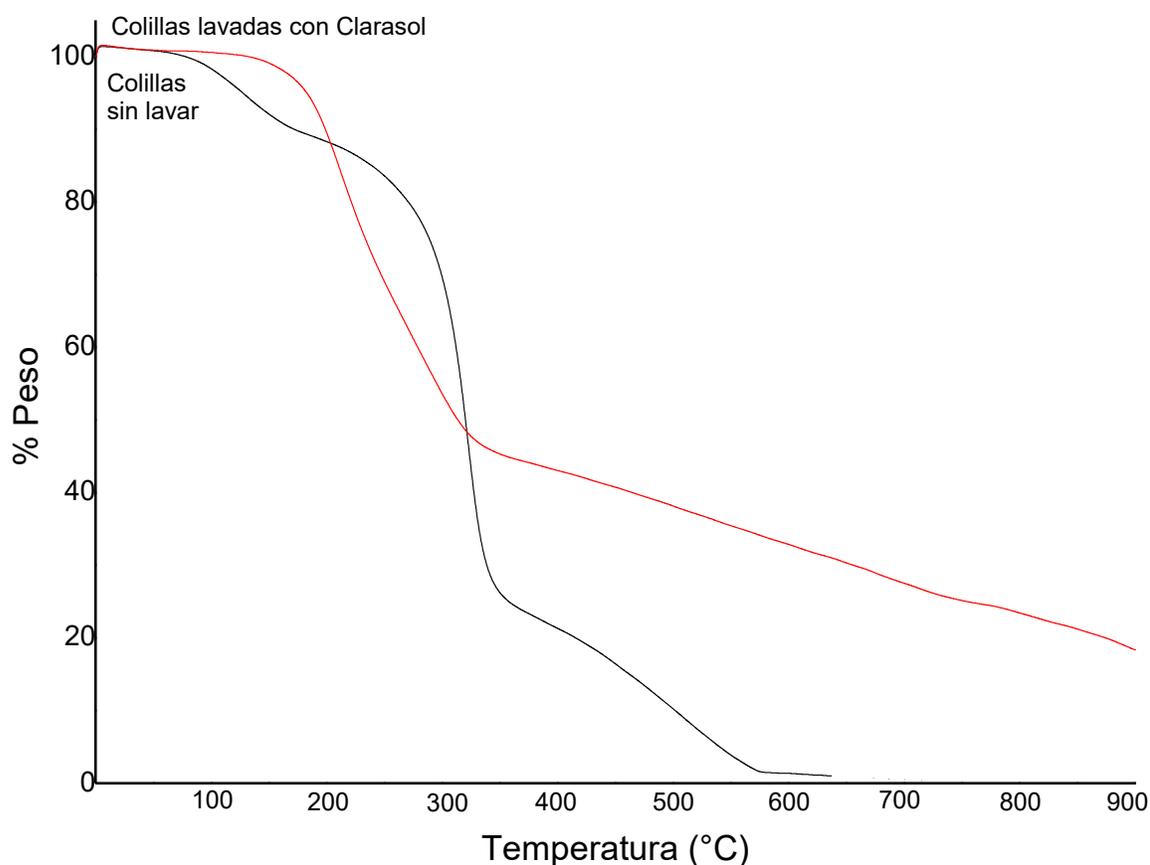


**Figura 13.** Espectros FT-IR de los carbones activados químicamente después de la adsorción del colorante BB9

#### 4.1.2 Análisis termogravimético TGA

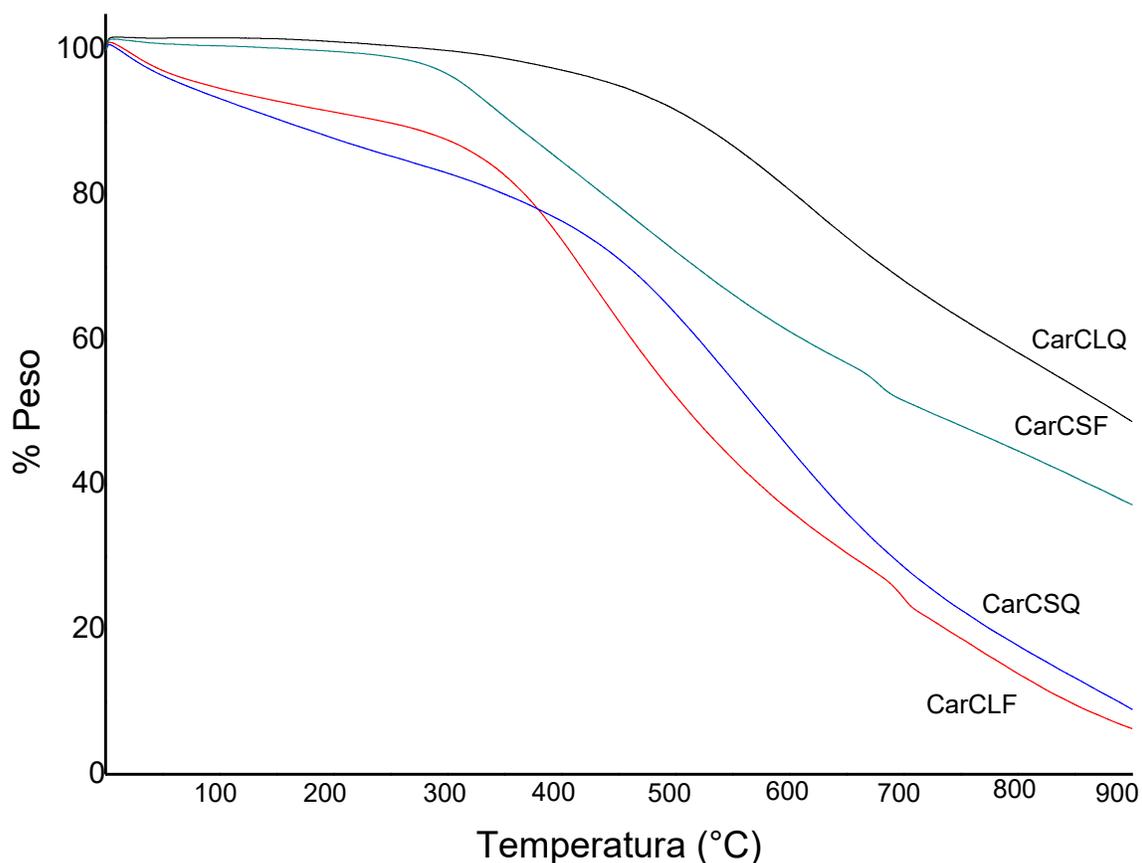
En la Figura 14 se muestran los termogramas de las colillas sin lavar y después de lavarse con Clarasol. Las colillas sin lavar muestran tres claras pérdidas en porcentaje en peso (%wt) sumando una pérdida total del 98%wt. La primera pérdida se observa en el rango de temperatura de 90 a 195 °C, la cual se atribuye a la pérdida de agua ocluida y de compuestos orgánicos de bajo peso molecular de la nicotina. Las siguientes dos pérdidas en peso corresponden a la degradación del acetato de celulosa y compuestos derivados de la nicotina de mayor peso molecular en el rango de temperatura de 195 a 580 °C, observando que el carbón

residual solo corresponde al 2% a una temperatura de 600 °C. En el termograma de las colillas tratadas con Clarasol se observa claramente una sola pérdida en peso en el rango de temperatura de 150 a 310 °C que corresponde a la descomposición aleatoria de la cadena polimérica del acetato de celulosa, posteriormente se observa una pérdida continua en peso. Sin embargo, a diferencia del acetato de celulosa sin lavar con Clarasol se observa un carbón residual del 30% en peso a 600 °C y al seguir incrementando la temperatura hasta 900°C se obtiene un carbón residual del 20%. Por lo tanto, las colillas lavadas presentan mejor estabilidad térmica.



**Figura 14.** Termogramas del acetato de celulosa de las colillas sin lavar y de las colillas lavadas con Clarasol

En la Figura 15 se muestran los termogramas de los cuatro carbones en el cual se puede observar que el CarCLQ es térmicamente estable hasta una temperatura de 500°C y a una temperatura de 900°C se obtiene el 50%wt de carbón residual. En el caso del CarCSQ la pérdida en peso de moléculas orgánicas comienza a partir de los 50°C a 440°C con una pérdida del 80%wt, a partir de esa temperatura comienza la descomposición térmica y al incrementar la temperatura a 900°C se obtiene un porcentaje del 10% de carbón residual. Por esta razón el CarCLQ presenta mejor estabilidad térmica. El CarCLF presenta una pérdida de moléculas orgánicas a temperaturas que van de 50°C a 340°C con una pérdida de peso de aproximadamente 17%. A partir de esa temperatura comienza una descomposición térmica hasta llegar a una temperatura de 900°C con un porcentaje de carbón residual de 5%. Finalmente, el CarCSF presenta estabilidad hasta los 350°C, y su descomposición térmica sigue hasta los 900°C obteniendo un carbón residual del 40%.

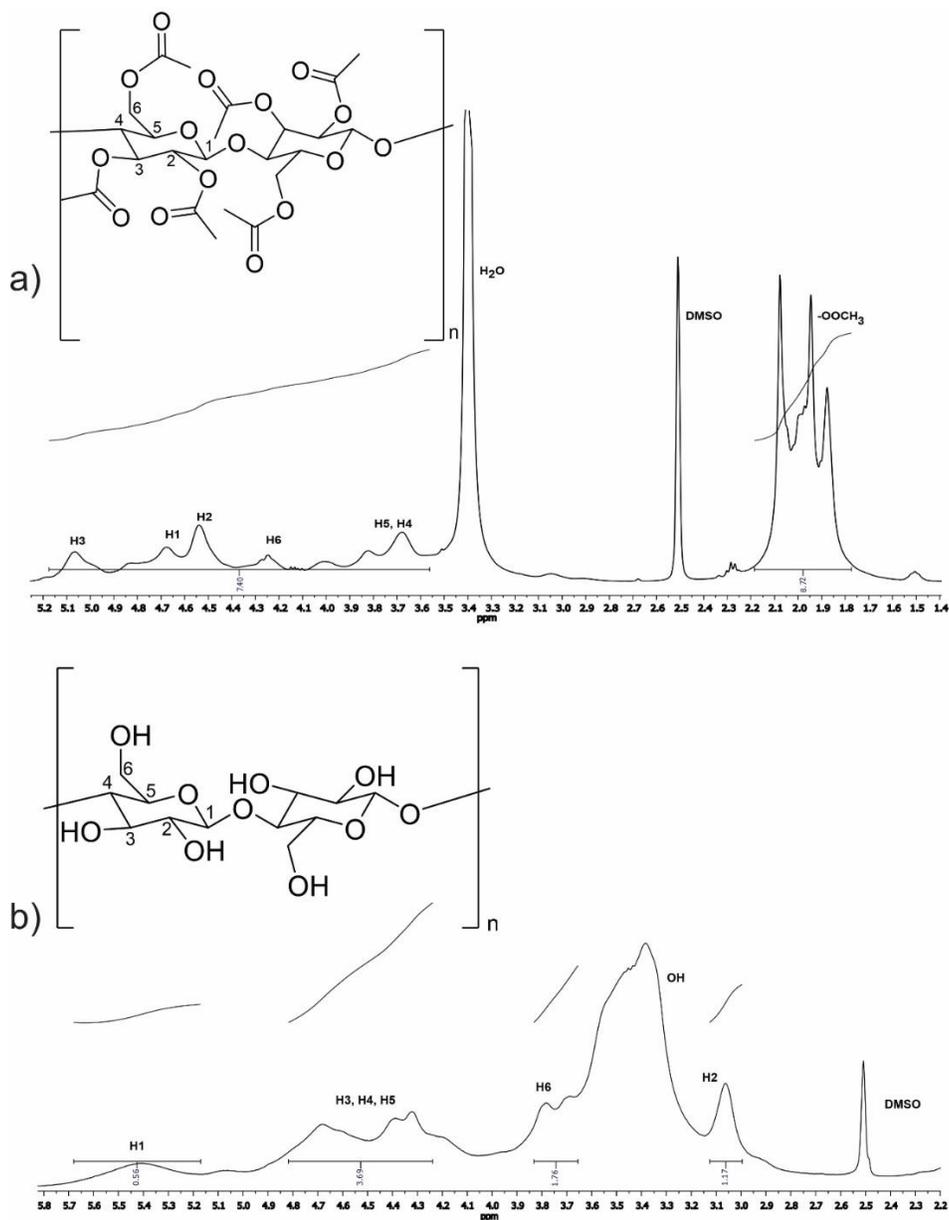


### **Figura 15. Termogramas de los cuatro carbones activados**

Si se hace la comparación entre los cuatro carbones en un rango de temperaturas de 50°C-900°C se puede observar que el carbón CarCLQ pierde 50% de su peso (50% de carbón residual) al llevarlo a los 900°C, mientras que el carbón CarCSQ reduce 90% de su peso (10% de carbón residual), por otro lado, el carbón CarCLF disminuye a 95% su peso (5% de carbón residual); finalmente el carbón CarCSF pierde 60% de su peso inicial (40% de carbón residual). Con base en estos resultados se puede apreciar que el carbón CarCLQ es el que presenta mayor estabilidad térmica debido a que posee menos materia orgánica con respecto a los otros tres carbones, porque durante su obtención se eliminaron los compuestos orgánicos provenientes de la nicotina y se trató con ácido fosfórico, generando un carbón activado con bajo porcentaje en contenido de compuestos orgánicos.

#### **4.1.3 Resonancia magnética nuclear**

En la Figura 16, a) se muestra el espectro de RMN de  $^1\text{H}$  del acetato de celulosa, el cual se utilizó como materia prima para llevar a cabo una reacción de hidrólisis o desacetilación, la obtención del CarCLQ y CARCLF. Por otro lado, en la Figura 16, b) se muestra el espectro de RMN de  $^1\text{H}$  de la celulosa obtenida de la hidrólisis. Al comparar los espectros se observa que algunas señales se conservan pero la señal que corresponde a los protones de los grupos metilos del acetato desaparecen, otra diferencia que se aprecia es con respecto a la señal entre 3.2-3.6 ppm que ha sido asignada a los grupos  $-\text{OH}$ , en el espectro del acetato de celulosa, se aprecia una señal intensa pero no tan ancha, que ha sido etiquetada como  $\text{H}_2\text{O}$ , proveniente del  $\text{DMSO-}d_6$ , mientras que en el espectro que corresponde a la celulosa esta señal disminuye en intensidad pero se hace muy ancha debido a que ya no solo se debe a moléculas de  $\text{H}_2\text{O}$  que puede contener el disolvente deuterado, sino que también, es en esa región donde aparecen los protones de los grupos  $-\text{OH}$  una vez que el grupo acetato ha sido hidrolizado. La asignación de los espectros de RMN de  $^1\text{H}$  se comprobó con lo reportado previamente en la literatura<sup>80,81</sup>.

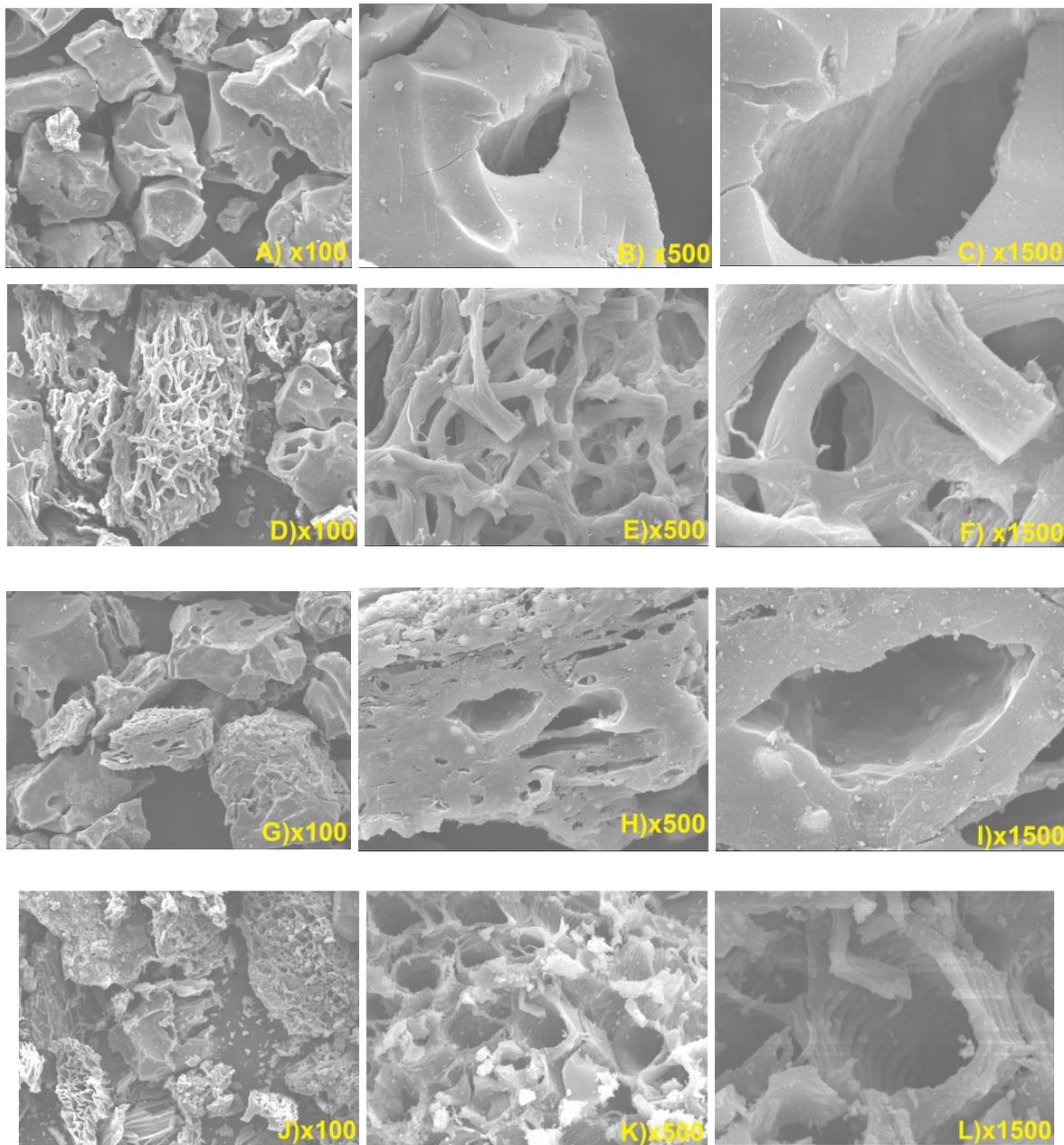


**Figura 16.** Espectros de RMN de  $^1\text{H}$  a) acetato de celulosa; b) celulosa obtenida de la hidrólisis del acetato de celulosa

#### 4.1.4 Análisis microestructural

La morfología de los carbonos se aprecia en la Figura 17. Las micrográficas SEM muestran que los carbonos químicos tanto de colillas limpias como sucias (CarCLQ, micrográficas A-C y CarCSQ, micrográficas G-I) poseen una superficie más homogénea, lo que puede deberse al tratamiento químico proporcionado. En

los carbones físicos de colillas limpias y sucias aún se pueden apreciar las formas de las fibras de acetato de celulosa (CarCLF, micrografías D-F y CarCSF, micrografías J-L).



**Figura 17.** Imágenes de SEM de los carbones CarCLQ (A, B, C), CarCLF (D, E, F), CarCSQ (G, H, I), CarCSF (J, K, L).

#### 4.1.5 Pruebas de solubilidad

Con la finalidad de determinar la solubilidad del acetato de celulosa se realizaron pruebas con diferentes disolventes (Tabla 4), colocando 2 ml de los diferentes disolventes en un vial; posteriormente se adicionó un gramo de colilla de cigarro.

**Tabla 4.** Pruebas de solubilidad del acetato de celulosa

DISOLVENTE	SOLUBLE	INSOLUBLE
Hexano		X
Cloroformo		X
Diclorometano	Parcialmente soluble	
Acetato de etilo	X	
Acetona	X	
DMF	X	
DMSO	X	
Etanol		X
Metanol		X
Agua		X
Solución de NaOH 1M		X
Solución de HCl al 5%		X

Como puede observarse en la tabla anterior el acetato de celulosa es parcialmente soluble en diclorometano y soluble en DMF, DMSO, acetato de etilo y acetona, que son disolventes polares apróticos mientras que en disolventes polares próticos como el agua, metanol, etanol no es soluble.

#### 4.1.6 Punto de fusión

En la Tabla 5 se reportan las observaciones durante la determinación del punto de fusión.

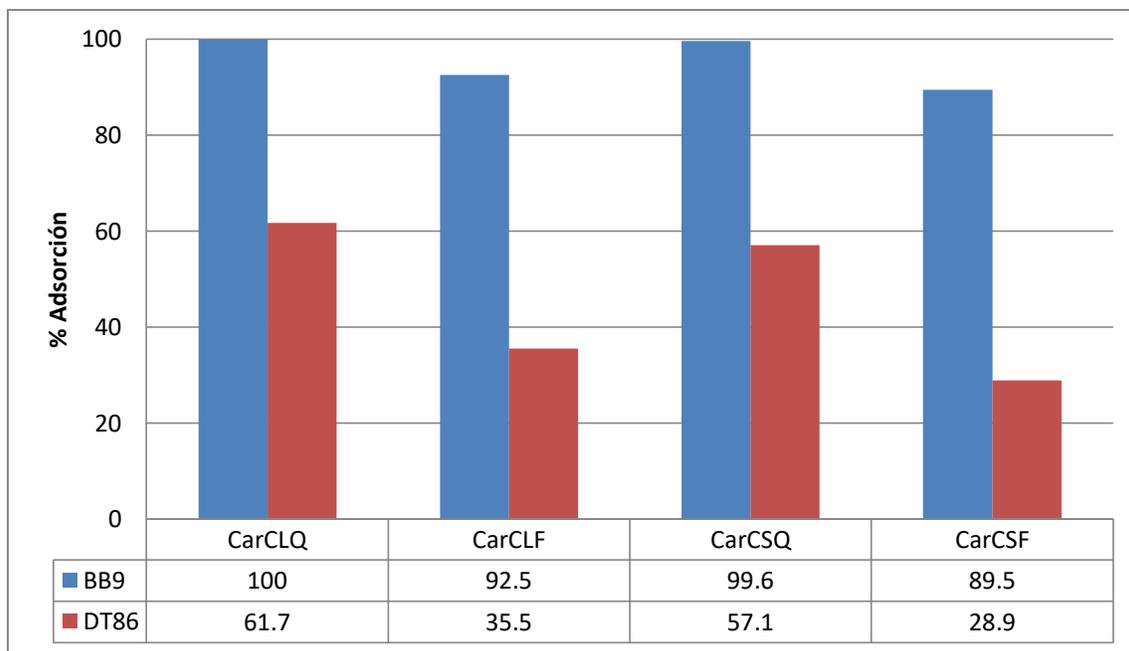
**Tabla 5. Punto de fusión del acetato de celulosa**

<b>Colillas sin lavar</b>	<b>Colillas limpias</b>
→ 170°C la muestra comienza a tomar una tonalidad café.	→ 208°C la muestra comienza a ponerse café.
→ 241°C la muestra comienza a ponerse café en su totalidad y comienza a contraerse.	→ 224°C la muestra se ha puesto color café en su totalidad.
	→ 235°C la muestra comienza a compactarse.
→ 248°C la muestra disminuyó su tamaño inicial en aproximadamente 70%.	→ 248°C se observa que el volumen que ocupaba inicialmente la muestra ha disminuido.
→ 286°C comienza a quemarse.	→ 253°C comienza a quemarse.
→ 291°C las fibras se carbonizaron completamente.	→ 291°C la muestra volvió a disminuir el volumen que ocupaba un 50% adicional al tamaño registrado en la temperatura de 248°C.

#### **4.2. Adsorción de colorantes en soluciones acuosas**

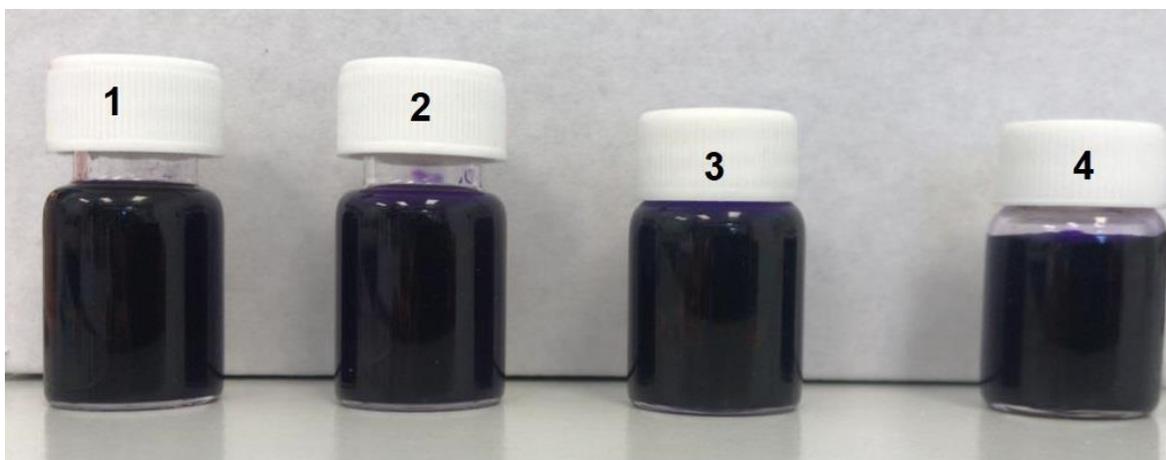
Los resultados de la adsorción de colorantes en soluciones acuosas con una concentración inicial de 300 mg/dm<sup>3</sup> se muestran en la Figura 18. Los porcentajes de adsorción fueron cercanos al 100% para el colorante catiónico BB9, esto debido al carácter ácido de la superficie de los carbones. Mientras que para el colorante aniónico DT86 los porcentajes fueron menores (29 – 62 %) debido a la repulsión entre la superficie aniónica de los carbones.

Para ambos colorantes se observó una mejor adsorción con los carbones CarCLQ y CarCSQ los cuales fueron obtenidos mediante activación química. Pero para los carbones CarCLF y CarCSF en los que la materia prima no fue activada químicamente se observa una menor capacidad de adsorción.

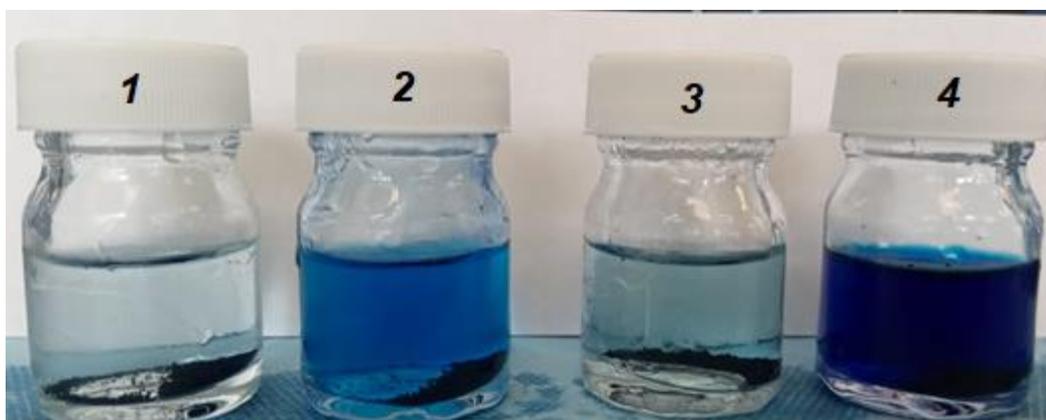


**Figura 18.** Adsorción de colorantes textiles con una concentración inicial de  $300 \text{ mg/dm}^3$

En las Figuras 19 y 20 se presentan imágenes del proceso de adsorción de los carbones activados con el colorante BB9, en la Figura 19 se muestra el experimento a los 10 minutos de contacto entre la solución de colorante con los carbones activados y en la Figura 20 el aspecto después de 48 horas de contacto, observando una considerable disminución del color en la solución, concluyendo que fue un procedimiento exitoso y que los carbones sintetizados en el presente trabajo mostraron gran potencial para la eliminación de colorantes presentes en soluciones acuosas, especialmente los activados con  $\text{H}_3\text{PO}_4$ .



**Figura 19.** Adsorción del colorante BB9 pasados 10 minutos de adicionar los carbones (1.CarCLQ, 2.CarLF, 3.CarCSQ, 4.CarCSF)



**Figura 20.** Adsorción del colorante BB9 pasadas 48 horas de adicionar los carbones (1.CarCLQ, 2.CarLF, 3.CarCSQ, 4.CarCSF)

#### 4.2.1 Superficie específica de BET

En la Tabla 6, se muestran los parámetros texturales de los carbones activados. El carbón CarCSQ presentó la mayor superficie específica ( $S_{BET}$ ) de  $1082 \text{ m}^2/\text{g}$  y un alto volumen de poros de  $0.807 \text{ cm}^3/\text{g}$ , por el contrario el carbón CarCSF tuvo una  $S_{BET}$  de  $115 \text{ m}^2/\text{g}$  y un volumen de poro de  $0.100 \text{ cm}^3/\text{g}$ . Aunque ambos carbones tuvieron la misma materia prima (colillas sucias) se observa que el uso del  $\text{H}_3\text{PO}_4$

en la activación de CarCSQ mejoró considerablemente sus propiedades, siendo este el carbón que presentó las mejores capacidades adsorptivas de los cuatro.

Al comparar los carbones obtenidos a partir de las colillas limpias, se observa que el carbón CarCLQ presentó una  $S_{BET}$  de 768  $m^2/g$  y un volumen total de poro de 0.496  $cm^3/g$ , mientras que el carbón CarCLF tiene una  $S_{BET}$  de 226  $m^2/g$  con un volumen de poro de 0.198  $cm^3/g$ , lo que indica que la limpieza de las colillas favoreció el desarrollo de la porosidad durante la activación física. Por lo que los carbones sintetizados por el método químico presentan mejores propiedades, del mismo modo que la limpieza previa no contribuye a la mejora de dichas propiedades.

Los cuatro carbones son mesoporos, oscilando sus diámetros promedio de poro entre 2.6 y 3.5 nm, aunque también presentan pequeños porcentajes (11 – 24%) de microporos.

**Tabla 6.** *Parámetros texturales de los carbones activados preparados a partir de colillas de cigarro.*

	$S_{BET}$ $m^2/g$	$V_{TP}$ $cm^3/g$	$V_{\mu P}$ $cm^3/g$	$V_{mesoP}$ $cm^3/g$	$\frac{V_{mesoP}}{V_{TP}}$ %	$D_{AP}$ nm
CarCLF	226	0.198	0.047	0.151	76.2	3.51
CarCSF	115	0.100	0.018	0.082	82.3	3.49
CarCLQ	768	0.496	0.080	0.417	84.0	2.59
CarCSQ	1082	0.807	0.092	0.715	88.5	2.98

## Conclusiones

El tabaquismo es un problema de salud mundial, que no sólo contamina el aire y enferma a los consumidores directos y a los fumadores pasivos, además las colillas de cigarro al ser desechadas incorrectamente contaminan significativamente el agua y el suelo. Con la recolección y tratamiento de las mismas, el acetato de celulosa de las colillas de cigarro, después de sencillos lavados con un reactivo económico y de fácil manejo, el hipoclorito de sodio, queda espectroscópicamente puro y puede reusarse, evitando una mayor contaminación del ambiente. Además, el acetato de celulosa limpio o aún sin limpieza previa puede utilizarse en la obtención de carbones activados química y físicamente, para utilizarlo como adsorbente de colorantes. Los estudios realizados mostraron que el carbón activado químicamente utilizando colillas sucias como materia prima, desarrolló una alta superficie específica ( $1082 \text{ m}^2/\text{g}$ ) y presentó la mayor capacidad de adsorción del colorante catiónico azul de metileno (BB9), siendo también capaz de retener en su superficie moléculas del colorante aniónico turquesa sirius (DT86), el cual es ampliamente utilizado en la industria textil para el teñido de algodón.

## Bibliografía

1. Guevara Lizano, A. **(2010)**. Sistema para el adecuado desecho de colillas de cigarro (Tesis de Bachillerato Universitario). *Instituto Tecnológico de Costa Rica*
2. Sánchez Muñoz, M. P. **(2015)**. ¿Le apuestan los sistemas de manejo de residuos sólidos en el mundo al Desarrollo Sostenible? *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 1, 445-450.
3. Rotter Zimbrón, C. A., & Ballesteros Villegas, M. A. **(2014)**. Análisis de la contaminación del aire en los municipios de Toluca, Metepec, San Mateo Atenco y Zinacantepec a través de la metodología de simulación bajo el método de Montecarlo, 2000 - 2020 (Tesis de Licenciatura). *Universidad Autónoma del Estado de México*
4. Fernández Muerza, A. **(2019)**. Tabaco: así daña al medio ambiente. *Consumer*. <https://www.consumer.es/medio-ambiente/tabaco-asi-dana-al-medio-ambiente.html>
5. National Geographic. **(2018)**. Cómo afecta el consumo de tabaco al ambiente. *National Geographic en Español*. <https://www.ngenespanol.com/naturaleza/como-dana-el-tabaco-al-medio-ambiente/>
6. Manrique Pinzón, J. S., Eslava Moyano, I. D., & Pascual Chaparro, J. **(2017)**. Uso integral de colillas de cigarrillo con fines ambientales y comerciales. Proyecto piloto en la facultad del medio ambiente de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. *Boletín Semillas Ambientales*, 11(1), 72-79.
7. Cabrera Verdezoto, R. P., Morán Morán, J. J., Mora Velasquez, B. J., Molina

- Triviño, H. M., Moncayo Carreño, O. F., Díaz Ocampo, E., Meza Bone, G. A., & Cabrera Verdesoto, C. A. **(2016)**. Evaluación de dos insecticidas naturales y un químico en el control de plagas en el cultivo de frejol en el litoral ecuatoriano. *Idesia (Arica)*, 34(5), 27-35.
8. De Yuso Ariza, A. M. **(2012)**. Desarrollo de carbones activados a partir de residuos lignocelulósicos para la adsorción y recuperación de tolueno y n-hexano (Tesis de Doctorado). *Universidad San Jorge*
9. Fombuena, M. y Valentín, A. **(2010)**. Manual del carbón activo. *Aguapedia*. U. Sevilla 1-89.
10. Franca, A. S., Oliveira, L. S., Nunes, A. A., & Alves, C. C. O. **(2010)**. Microwave assisted thermal treatment of defective coffee beans press cake for the production of adsorbents. *Bioresource Technology*, 101(3), 1068-1074.
11. Uddin, M. T., Islam, M. A., Mahmud, S., & Rukanuzzaman, M. **(2009)**. Adsorptive removal of methylene blue by tea waste. *Journal of Hazardous Materials*, 164(1), 53-60.
12. Canales, G. **(2018)**. Recuperación de Cadmio de baterías mediante microcápsulas de acetato de celulosa Cyanex 923 (Tesis de Licenciatura). *Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo*.
13. ALPER, J. & NELSON, G. L., **(1989)**. Polymeric Materials Chemistry for the Future. *American Chemical Society*, Washington, p. 39.
14. Fred W., B. **(2008)**. Ciencia de los polímeros (Spanish Edition). *Ed. Reverte*.
15. García Díez, S. **(2009)**. Referencias históricas y evolución de los plásticos. *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 10(1), 71-80.

16. Velasco, M. U., & Mehrenberg, P. Y. **(1980)**. Los Polímeros. *Ed. Limusa*.
17. Seymour, R. B. **(1996)**. Introducción a la Química de Los Polímeros. *Ed. Reverte*.
18. Angulo, S. **(1994)**. Caracterización fisicoquímica de polímeros (1.a ed.). *Ed. Noriega*.
19. Cortes Hernández, M. **(2006)**. Síntesis y caracterización de polímeros vía radicales libres usando xantatos (Tesis de Licenciatura). *Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo*.
20. Bahadur, P., & Sastry, N. V. **(2002)**. Principles of Polymer Science. *Ed. Penguin Random House*.
21. Wade L.G. **(1993)**. "Química Orgánica" (Cap. 26, 2ª Edición), *Ed. Prentice-Hall Hispanoamericana S.A., México*
22. Ciolacu, Diana & Ciolacu, Florin & Popa, Valentin. **(2011)**. Amorphous cellulose - Structure and characterization. *Cellulose Chemistry and Technology*. 45. 13-21.
23. Anisah, Z., Sultana, N., & Abdul Kadir, M. R. **(2014)**. Fabrication and Characterization of Cellulose Acetate Nanofibers. *Advanced Materials Research*, 1030-1032, 78-81.
24. Puls, J., Wilson, S. A., & Höltter, D. **(2010)**. Degradation of Cellulose Acetate-Based Materials: A Review. *Journal of Polymers and the Environment*, 19(1), 152-165.

25. S. Nair, S., & Mathew, A. P. **(2017)**. Porous composite membranes based on cellulose acetate and cellulose nanocrystals via electrospinning and electrospraying. *Carbohydrate Polymers*, 175, 149-157.
26. Trivedi M.K., Nayak G., Patil S., Tallapragada R.M., Mishra R. **(2015)**. Impact of Biofield Treatment on Chemical and Thermal Properties of Cellulose and Cellulose Acetate. *J Bioengineer & Biomedical Sci* 5: 162.
27. Benavides Martínez, T. R. **(2015)**. Síntesis y caracterización de membranas de acetato de celulosa, obtenidas a partir de desechos agroindustriales (Tesis de licenciatura). *Universidad de El Salvador*.
28. Simon, J., Müller, H. P., Koch, R., & Müller, V. **(1998)**. Thermoplastic and biodegradable polymers of cellulose. *Polymer Degradation and Stability*, 59(1-3), 107-115.
29. Barud, H. S., de Araújo Júnior, A. M., Santos, D. B., de Assunção, R. M. N., Meireles, C. S., Cerqueira, D. A., Rodrigues Filho, G., Ribeiro, C. A., Messaddeq, Y., & Ribeiro, S. J. L. **(2008)**. Thermal behavior of cellulose acetate produced from homogeneous acetylation of bacterial cellulose. *Thermochimica Acta*, 471(1-2), 61-69.
30. Park, H.-M., Liang, X., Mohanty, A. K., Misra, M., & Drzal, L. T. **(2004)**. Effect of Compatibilizer on Nanostructure of the Biodegradable Cellulose Acetate/Organoclay Nanocomposites. *Macromolecules*, 37(24), 9076-9082.
31. Phuong, V. T., Verstiche, S., Cinelli, P., Anguillesi, I., Coltelli, M.-B., & Lazzeri, A. **(2014)**. Cellulose Acetate Blends - Effect of Plasticizers on Properties and Biodegradability. *Journal of Renewable Materials*, 2(1), 35-41.
32. Fischer, S., Thümmel, K., Volkert, B., Hettrich, K., Schmidt, I., & Fischer, K.

- (2008)**. Properties and Applications of Cellulose Acetate. *Macromolecular Symposia*, 262(1), 89-96.
33. Abe, K., Iwamoto, S., & Yano, H. **(2007)**. Obtaining Cellulose Nanofibers with a Uniform Width of 15 nm from Wood. *Biomacromolecules*, 8(10), 3276-3278.
34. Monzonis Marco, J. C. **(2011)**. Estudio para la minimización del residuo de colillas de tabaco y su posible reutilización (Tesis de Licenciatura). *Universidad Politécnica de Valencia*.
35. Wan Daud, W. R., & Djuned, F. M. **(2015)**. Cellulose acetate from oil palm empty fruit bunch via a one step heterogeneous acetylation. *Carbohydrate Polymers*, 132, 252-260.
36. Barthel, S., & Heinze, T. **(2006)**. Acylation and carbanilation of cellulose in ionic liquids. *Green Chem.*, 8(3), 301-306.
37. Littlejohn, D., Pethrick, R. A., Quye, A., & Ballany, J. M. **(2013)**. Investigation of the degradation of cellulose acetate museum artefacts. *Polymer Degradation and Stability*, 98(1), 416-424.
38. CAO, Y., ZHANG, J., HE, J., LI, H., & ZHANG, Y. **(2010)**. Homogeneous Acetylation of Cellulose at Relatively High Concentrations in an Ionic Liquid. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 18(3), 515-522.
39. Cheng, H. N., Dowd, M. K., Selling, G. W., & Biswas, A. **(2010)**. Synthesis of cellulose acetate from cotton byproducts. *Carbohydrate Polymers*, 80(2), 449-452.
40. Yamashita, Y., & Endo, T. (2004). Deterioration behavior of cellulose acetate films in acidic or basic aqueous solutions. *Journal of Applied Polymer Science*,

91(5), 3354-3361.

41. Grunert, M., & Winter, W. T. **(2002)**. Nanocomposites of cellulose acetate butyrate reinforced with cellulose nanocrystals. *Journal of Polymers and the Environmen.*, 10(1-2), 27-30.
42. Buchanan, C. M., Gardner, R. M., & Komarek, R. J. **(1993)**. Aerobic biodegradation of cellulose acetate. *Journal of Applied Polymer Science*, 47(10), 1709-1719.
43. Kim, B. K., Oh, Y. S., Lee, Y. M., Yoon, L. K., & Lee, S. **(2000)**. Modified polyacrylonitrile blends with cellulose acetate: blend properties. *Polymer*, 41(1), 385-390.
44. Lucena, M. C. C., V. de Alencar, A. E., Mazzeto, S. E., & Soares, S. A. **(2003)**. The effect of additives on the thermal degradation of cellulose acetate. *Polymer Degradation and Stability*, 80(1), 149-155.
45. Hon, N.-S. **(1977)**. Photodegradation of cellulose acetate fibers. *Journal of Polymer Science: Polymer Chemistry Edition*, 15(3), 725-744.
46. Li, B., Cui, X., Zhao, L., Wang, L., Xie, G., & Deng, N. **(2017)**. Pressure and Gas Flow Distribution Inside the Filter of a Non-Filter Ventilated Lit Cigarette During Puffing. *Beiträge zur Tabakforschung International/Contributions to Tobacco Research*, 27(6), 113-124.
47. Dwyer, R. W., & Abel, S. G. **(1986)**. The Efficiencies of Cellulose Acetate Filters. *Beiträge zur Tabakforschung International/Contributions to Tobacco Research*, 13(5), 243-253.
48. Hengstberger, M., & Stark, M. **(2009)**. Fibre and Particle Release from

Cigarette Filters. *Beiträge zur Tabakforschung International/Contributions to Tobacco Research*, 23(6), 338-358.

49. Pauly, J. L., Allaart, H. A., Rodriguez, M. I., & Streck, R. J. (1996). Fibers released from cigarette filters: An additional health risk to the smoker? *Pneumologie*, 50(11), 798.
50. Pauly, John L., Lee, H. J., Hurley, E. L., Cummings, K. M., Lesses, J. D., & Streck, R. J. (1998). Glass fiber contamination of cigarette filters: An additional health risk to the smoker? *Cancer Epidemiology Biomarkers and Prevention*, 7(11), 967–979.
51. Robertson, R. M., Thomas, W. C., Suthar, J. N., & Brown, D. M. (2012). Accelerated degradation of cellulose acetate cigarette filters using controlled-release acid catalysis. *Green Chemistry*, 14(8), 2266.
52. Novotny, T., Lum, K., Smith, E., Wang, V., & Barnes, R. (2009). Cigarettes Butts and the Case for an Environmental Policy on Hazardous Cigarette Waste. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 6(5), 1691-1705.
53. Sentry, O. (2017). Las colillas de cigarrillo son tóxicas para los peces, según los investigadores. *Ocean Sentry*. <https://www.oceansentry.org/es/las-colillas-de-cigarrillo-son-toxicas-para-los-peces-segun-los-investigadores/>
54. Kadir, A. A., & Sarani, N. A. (2015). Cigarette Butts Pollution and Environmental Impact – A Review. *Applied Mechanics and Materials*, 773-774, 1106-1110.

55. Z. Yang, J.G. Nepomuceno, B. Taylor, Flavored Carbon Useful as Filtering Material of Smoking Article, U.S. Patent Publication WO 03/071886, Int. filing date **(2009)**.
56. M.C Ribas, M.A Adebayo, L.D.T. Prola, E. Lima, R. Cataluña, L. A Feris, M.J Puchana-Rosero, F.M Machado, F.A Pavan, T. Calvete, **(2014)**. "Comparison of a homemade cocoa shell activated carbón with commercial activated carbon for the removal of reactive violet 5 dye from aqueous solutions," *Chemical Engineering Journal*, 248, 315-326,
57. Marsh, H., & Reinoso, F. R. **(2006)**. Activated Carbon (English Edition) (1st ed.). *Ed. Elsevier Science*.
58. Terrazas Bandala, L. P. **(2008)**. Preparación e implementación de membranas compuestas de tri-acetato de celulosa y partículas de carbón activado para la remoción de arsénico en agua. (Tesis de Doctorado). *Centro de Investigación en Materiales Avanzados S. C.*
59. Domingo-García, M., López-Garzón, F. J., & Pérez-Mendoza, M. **(2000)**. Effect of Some Oxidation Treatments on the Textural Characteristics and Surface Chemical Nature of an Activated Carbon. *Journal of Colloid and Interface Science*, 222(2), 233-240.
60. Altmann, J., Rehfeld, D., Träder, K., Sperlich, A., & Jekel, M. **(2016)**. Combination of granular activated carbon adsorption and deep-bed filtration as a single advanced wastewater treatment step for organic micropollutant and phosphorus removal. *Water Research*, 92, 131-139.
61. Altmann, J., Ruhl, A. S., Zietzschmann, F., & Jekel, M. **(2014)**. Direct comparison of ozonation and adsorption onto powdered activated carbon for

micropollutant removal in advanced wastewater treatment. *Water Research*, 55, 185-193.

62. Hoseinzadeh Hesas, R., Wan Daud, W. M. A., Sahu, J. N., & Arami-Niya, A. **(2013)**. The effects of a microwave heating method on the production of activated carbon from agricultural waste: A review. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 100, 1-11.
63. Lee, M. C., Snoeyink, V. L., & Crittenden, J. C. **(1981)**. Activated Carbon Adsorption of Humic Substances. *Journal American Water Works Association*, 73(8), 440–446.
64. Devnarain, P. B., Arnold, D. R., & Davis, S. B. **(2002)**. Production of Activated Carbon from South African Sugarcane Bagasse. *Congress of the South African Sugar Technologist Association*. 477–489.
65. LORENCGRABOWSKA, E., & GRYGLEWICZ, G. **(2007)**. Adsorption characteristics of Congo Red on coal-based mesoporous activated carbon. *Dyes and Pigments*, 74(1), 34-40.
66. Soleimani, M., & Kaghazchi, T. **(2007)**. Agricultural Waste Conversion to Activated Carbon by Chemical Activation with Phosphoric Acid. *Chemical Engineering & Technology*, 30(5), 649-654.
67. Tamon, H., & Okazaki, M. **(1996)**. Influence of acidic surface oxides of activated carbon on gas adsorption characteristics. *Carbon*, 34(6), 741-746.
68. Bansal, R. C., & Goyal, M. **(2005)**. Activated Carbon Adsorption (Illustrated ed.). *CRC Press*.

69. Martínez, M. L., Torres, M. M., Guzmán, C. A., & Maestri, D. M. **(2006)**. Preparation and characteristics of activated carbon from olive stones and walnut shells. *Industrial Crops and Products*, 23(1), 23-28.
70. Budinova, T., Ekinçi, E., Yardim, F., Grimm, A., Björnbom, E., Minkova, V., & Goranova, M. **(2006)**. Characterization and application of activated carbon produced by  $H_3PO_4$  and water vapor activation. *Fuel Processing Technology*, 87(10), 899-905.
71. Girgis, B. S., Yunis, S. S., & Soliman, A. M. **(2002)**. Characteristics of activated carbon from peanut hulls in relation to conditions of preparation. *Materials Letters*, 57(1), 164-172.
72. Yang, T., & Lua, A. C. **(2003)**. Characteristics of activated carbons prepared from pistachio-nut shells by physical activation. *Journal of Colloid and Interface Science*, 267(2), 408-417.
73. Şahin, Ö., & Saka, C. **(2013)**. Preparation and characterization of activated carbon from acorn shell by physical activation with  $H_2O-CO_2$  in two-step pretreatment. *Bioresource Technology*, 136, 163-168.
74. Chaparro, Cithia V.; Cabanzo, Rafael; Mejia-Ospino, E. **(2013)**. Estudio De La Adsorción De Azul De Metileno Sobre Oxido De Grafeno. *Revista Colombiana de Materiales*, 33(5), 131–139.
75. Li, Y., Du, Q., Liu, T., Peng, X., Wang, J., Sun, J., Wang, Y., Wu, S., Wang, Z., Xia, Y., & Xia, L. **(2013)**. Comparative study of methylene blue dye adsorption onto activated carbon, graphene oxide, and carbon nanotubes. *Chemical Engineering Research and Design*, 91(2), 361-368.

76. Carl Roth. **(2018)**. Ficha de datos de seguridad: Azul de metileno. <https://www.carlroth.com/medias/SDB-A514-ES>
77. Yenisoy-Karakaş, S., Aygün, A., Güneş, M., & Tahtasakal, E. **(2004)**. Physical and chemical characteristics of polymer-based spherical activated carbon and its ability to adsorb organics. *Carbon*, 42(3), 477-484.
78. Ochica Larrota, A. F. **(2015)**. Obtención de nanofibras de celulosa cationica a partir del bagazo de la caña de azúcar y teñidas con colorante reactivo anionico para la aplicación textil (Tesis de Licenciatura). *Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia*.
79. Romero Hernández, V. **(2017)**. Materiales poliméricos provenientes de residuos vegetales, usados en síntesis de adsorbentes para remoción de iones metálicos y colorantes presentes en aguas residuales (Tesis de Maestría). *Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo*.
80. Jiang, F., Dallas, J. L., Ahn, B. K., & Hsieh, Y.-L. **(2014)**. 1D and 2D NMR of nanocellulose in aqueous colloidal suspensions. *Carbohydrate Polymers*, 110, 360-366.
81. Kono, H., Hashimoto, H., & Shimizu, Y. **(2015)**. NMR characterization of cellulose acetate: Chemical shift assignments, substituent effects, and chemical shift additivity. *Carbohydrate Polymers*, 118, 91-100.