



**Benemérita
Universidad Autónoma de Puebla**

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

**“ADSORCIÓN DE COLORANTES TEXTILES EN AGUA
MEDIANTE CARBÓN ACTIVADO OBTENIDO DE
SERRÍN Y CÁSCARA DE LIMÓN”**

TESIS PROFESIONAL

Que para obtener el Título de:

Licenciatura en Ingeniería Ambiental

Presenta:

Ismael Macías Juárez

Directora de Tesis:

Dra. Gabriela Pérez Osorio

Puebla, Pue. Febrero 2022

**“Busquemos un futuro glorioso en el cual nuestro destino sean las estrellas”
-Dr. Alonso Calderón**

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, el Sr. Armando y la Sra. Ma. Francisca, por la confianza y su amor. Admiro sus esfuerzos y sacrificios que hicieron para apoyarme en mi formación profesional; les estaré siempre agradecido.

A mis hermanos, Ricardo y Marcos, por la motivación que me dieron para no claudicar ante momentos débiles, y por su ayuda incondicional.

A mi mejor amigo, el Ing. Miguel Angel, que me acompañó durante toda la carrera; agradezco sus palabras, sus consejos, su apoyo y por su puesto su amistad; esperando que los lazos que nos unen sean inquebrantables.

A mis amigas Eréndira, Isaura y María Luisa y a mi amigo Rafa; le agradezco a la vida porque los haya puesto en mi camino.

Agradezco a la Dra. Gabriela Pérez Osorio directora de este trabajo, por su tiempo, su dedicación, sus enseñanzas y su paciencia.

A mis profesores por sus conocimientos que me inculcaron en sus clases; con agradecimiento y admiración.

A mis compañeros de la universidad, por los gratos momentos que pasamos y compartimos tanto en clases como en eventos escolares.

¡Muchas gracias!

Dedicatoria

A la memoria de mis abuelos maternos, el Sr. Abel y la Sra. Catalina, y a la memoria de mi bisabuela, la Sra. Teresa; quienes en vida me motivaron a salir adelante. A donde quiera que estén, estoy seguro de que estarían orgullosos de mí.

¡Los quiero mucho!

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE TABLAS.....	iv
ÍNDICE DE FIGURAS.....	v
ÍNDICE DE GRÁFICAS.....	vii
SIMBOLOGÍA Y NOMENCLATURA	viii
INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVOS.....	4
OBJETIVO GENERAL	4
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
HIPÓTESIS.....	4
CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES.....	5
1.1. Colorantes	5
1.1.1. Constitución química de los colorantes.....	5
1.1.2. Cromóforos	5
1.1.3. Auxocromos	7
1.1.4. Clasificación de los colorantes.....	8
1.1.5. Colorantes básicos.....	8
1.1.6. Azul de metileno (AM)	8
1.1.7. Colorantes ácidos	9
1.1.8. Naranja de metilo (NM).....	9
1.2. Problemática ambiental por los colorantes textiles en agua	10
1.2.1. Efecto de los colorantes en agua	10
1.3. Legislación ambiental en México	11
1.3.1. Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos (CPEUM).....	11

1.3.2.	Ley de Aguas Nacionales (LAN).....	11
1.3.3.	Normatividad mexicana en materia de agua	12
1.4.	Procesos para remoción de colorantes textiles	12
1.4.1.	Tratamiento mediante procesos biológicos	13
1.4.2.	Tratamiento mediante procesos químicos	13
1.4.3.	Tratamiento mediante procesos físicos	13
1.5.	Adsorción	14
1.5.1.	Adsorción física	14
1.5.2.	Adsorción química	15
1.5.3.	Materiales adsorbentes	16
1.6.	El carbón activado	18
1.6.1.	Composición química del carbón activado	18
1.6.2.	Composición física del carbón activado	19
1.6.3.	Procedencia del carbón activado	21
1.6.4.	Aplicaciones del carbón activado.....	21
1.6.5.	Aplicaciones ambientales del carbón activado	22
CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA		23
1.1.	Materia Prima: Residuos orgánicos de cáscara de limón y serrín	23
1.2.	Obtención de los carbones activados CAL y CAS	23
1.2.1.	Material resultante: CAL y CAS.....	25
1.3.	Evaluación de la capacidad de adsorción de CAL y CAS	26
1.3.1.	Diseño experimental: pruebas de adsorción.....	26
1.3.2.	Capacidad de adsorción de CAL y CAS por espectrofotometría <i>UV-Vis</i> ..	27
1.4.	Caracterización por espectrofotometría <i>FT-IR</i> de CAL y CAS	28

1.5. Disposición final del CA (posterior a la adsorción)	28
1.5.1. Diseño experimental.....	28
1.5.2. Preparación de macetas	29
1.5.3. Ensayo en macetas	29
1.5.4. Análisis estadístico.....	30
CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	31
3.1. Capacidad de adsorción por espectrofotometría UV-VIS	31
3.1.1. Adsorción del colorante AM usando CAL y CAS.....	31
3.1.2. Adsorción del colorante NM usando CAL y CAS.....	33
3.2. Identificación de grupos funcionales	35
3.3. Efecto del CA (posterior a la adsorción) en el desarrollo de la planta de cempasúchil (<i>Tagetes erecta</i>)	41
3.3.1. Tiempo de germinación de las semillas	41
3.3.2. Plantas totales.....	42
3.3.3. Altura promedio de las plantas.....	44
3.3.4. Tiempo de floración de las plantas.....	46
CONCLUSIONES	50
REFERENCIAS	53
ANEXOS	59

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Cromóforos presentes en las estructuras químicas de los colorantes.....	6
Tabla 2.	Auxocromos presentes en las estructuras químicas de los colorantes	7
Tabla 3.	Criterios generales de la fisisorción y quimisorción	15
Tabla 4.	Tipos de adsorbentes	16
Tabla 5.	Tipos de poros presente en el CA	20
Tabla 6.	Diseño experimental de los procesos de adsorción con CAL y CAS	27
Tabla 7.	Diseño experimental de la aplicación del CA residual, en ensayo del cultivo de compasúchil (<i>Tagetes Erecta</i>).....	28
Tabla 8.	Principales bandas vibracionales obtenidas a partir de la espectrofotometría <i>FT-IR</i> de CAL en los colorantes AM y NM	37
Tabla 9.	Principales bandas vibracionales obtenidas a partir de la espectrofotometría <i>FT-IR</i> de CAS en los colorantes AM y NM	39

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Estructura química del colorante azul de metileno (Fuente: Propia)	9
Figura 2.	Estructura química del colorante naranja de metilo (Fuente: Propia).....	10
Figura 3.	Estructura hipotética del CA con grupos funcionales oxigenados en su superficie (Cortes <i>et al.</i> , 2008; Aviña, 2018).....	19
Figura 4.	Residuos orgánicos de: A) Cáscara de limón, B) serrín.....	23
Figura 5.	Activación química de las muestras: A) cáscara de limón, B) serrín.....	24
Figura 6.	Calcinación de las muestras	25
Figura 7.	Lavado del CA con agua desionizada	25
Figura 8.	Preparación de macetas	29
Figura 9.	Semillas de cempasúchil (<i>Tagetes erecta</i>)	30
Figura 10.	Espectrofotometría <i>UV-Vis</i> del colorante AM usando CAL	31
Figura 11.	Resultado de las pruebas de adsorción CAL-AM	32
Figura 12.	Espectrofotometría <i>UV-Vis</i> del colorante AM usando CAS	32
Figura 13.	Resultado de las pruebas de adsorción CAS-AM.....	33
Figura 14.	Espectrofotometría <i>UV-Vis</i> del colorante NM usando CAL	33
Figura 15.	Resultado de las pruebas de adsorción CAL-NM	34
Figura 16.	Espectrofotometría <i>UV-Vis</i> del colorante NM usando CAS	35
Figura 17.	Resultado de las pruebas de adsorción CAS-NM.....	35
Figura 18.	Espectrofotometría <i>FT-IR</i> de CAL antes y después de las pruebas de adsorción con el colorante AM.....	36
Figura 19.	Espectrofotometría <i>FT-IR</i> de CAL antes y después de las pruebas de adsorción con el colorante NM.....	37
Figura 20.	Espectrofotometría <i>FT-IR</i> de CAS antes y después de las pruebas de adsorción con el colorante AM.....	38

Figura 21.	Espectrofotometría <i>FT-IR</i> de CAS antes y después de las pruebas de adsorción con el colorante NM.....	39
Figura 22.	Germinación de las semillas de cempasúchil (<i>Tagetes erecta</i>)	41
Figura 23.	Ensayo en macetas.....	42
Figura 24.	Desarrollo de la planta de cempasúchil (<i>Tagetes erecta</i>).....	44
Figura 25.	Floración de la planta de cempasúchil (<i>Tagetes erecta</i>): A) Cabezuela, B) Aparición de pétalos, C) Flor completa.....	47

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1.	Días promedio de germinación de semillas	42
Gráfica 2.	Plantas totales existentes	43
Gráfica 3.	Altura promedio de las plantas.....	45
Gráfica 4.	Tiempo promedio de inicio de floración.....	48

SIMBOLOGÍA Y NOMENCLATURA

- AM** Azul de metileno
- AML1,2** Maceta con carbón activado residual de cáscara de limón usado en colorante azul de metileno
- AMS1,2** Maceta con carbón activado residual de serrín usado en colorante azul de metileno
- °C** Grados Celsius
- C1,2** Maceta control
- CA** Carbón activado
- CAL** Carbón activado de cáscara de limón
- CAL-AM** Carbón activado de cáscara de limón usado en colorante azul de metileno
- CAL-NM** Carbón activado de cáscara de limón usado en colorante naranja de metilo
- CAS** Carbón activado de serrín
- CAS-AM** Carbón activado de serrín usado en colorante azul de metileno
- CAS-NM** Carbón activado de serrín usado en colorante naranja de metilo
- CPEUM** Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos
- FT-IR** Espectroscopía Infrarroja con Transformada de Fourier
- g** gramos
- h** horas
- IL1,2** Maceta con carbón activado inicial de cáscara de limón
- IS1,2** Maceta con carbón activado inicial de serrín
- IUPAC** International Union of Pure and Applied Chemistry
- LAN** Ley de Aguas Nacionales
- λ** Longitud de onda
- λ_{\max}** Longitud de onda de máxima absorción
- M** Molar
- mL** mililitros
- nm** nanómetros
- NM** Naranja de metilo

- NML1,2** Maceta con carbón activado residual de cáscara de limón usado en colorante naranja de metilo
- NMS1,2** Maceta con carbón activado residual de serrín usado en colorante naranja de metilo
- ppm** Partes por millón
- R%** Porcentaje de remoción
- UV-Vis** Ultravioleta - visible

INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso vital para la vida en el planeta, la podemos encontrar en la naturaleza en los tres estados físicos: sólido, líquido y gaseoso, y puede contener ciertas impurezas de origen natural o antropogénico. Con el paso del tiempo, estas impurezas han provocado serios problemas ambientales (como problemas de estética o toxicidad en los ecosistemas) y en la salud humana (desde enfermedades entéricas hasta la aparición de cáncer). En 2015, la Organización de las Naciones Unidas (ONU) mencionó en la Agenda 2030 que “más del 80% de las aguas residuales resultantes de la actividad humana se vierte en los ríos o en el mar sin ningún tratamiento, lo que provoca su contaminación.”

El aumento de la población, la urbanización, la agricultura, la ganadería, los procesos industriales, entre otros, son ejemplos que contribuyen al deterioro de la calidad del agua. En México, el 74% de los cuerpos de agua que son monitoreados por la Comisión Nacional de Agua (CONAGUA) presentaron diferentes grados de contaminación, sólo el 26% restante muestran buena calidad. De manera general, los principales contaminantes encontrados en el agua son: materia orgánica [como remanentes de colorantes], nutrientes como fosfatos o nitratos, microorganismos como coliformes totales y fecales, así como metales pesados y derivados de hidrocarburos, estos últimos son descargados por el sector industrial (Pérez, 2019).

El principal giro industrial que contamina gravemente el agua de las cuencas fluviales es del giro textil. Miranda (2018) señala que “la industria textil es una de las principales fuentes de contaminación para el agua a nivel mundial debido al volumen y composición de sus efluentes, los cuales son caracterizados por ser típicamente calientes, alcalinos y coloreados”.

Muestra de ello, en nuestro país, se encuentra la cuenca del río Atoyac que pasa por los estados de Tlaxcala y Puebla; éste representa uno de los cuerpos de agua más contaminados a causa de los corredores industriales aledaños al río, como es el caso del Corredor Industrial Huejotzingo. Allí se encuentran empresas que maquilan mezclilla, las cuales, llevan a cabo procesos como: decoloración, deslavado, teñido e inclusive costura de prendas de mezclilla.

Estas empresas se ubican en las comunidades de San Rafael Tenanyecac, Villa Alta, San Mateo Ayecac y Santa Ana Xalmimilulco (Alonso, 2014).

Ahora bien, en las operaciones unitarias empleadas para la obtención de productos textiles se utilizan diferentes colorantes y fibras de tipo naturales o sintéticas. Al término del proceso resultan descargas de efluentes líquidos que contienen compuestos orgánicos de estructura variable, contaminantes de tipo inorgánico, como metales pesados o una combinación de ambos (Zaruma, Proal, Chaires y Salas, 2018).

No es difícil deducir que en las distintas etapas de los procesos textiles (como la maquila y lavado de telas) resultan aguas residuales que contienen colorantes de concentración variada. Ensuncho, Robles y Carriazo (2015) afirman que “los colorantes son moléculas orgánicas recalcitrantes, resistentes a la digestión aeróbica, y son estables a la luz, calor y agentes oxidantes, por consiguiente, difíciles de tratar”. Si los efluentes son vertidos en cuerpos de agua, sin tratamiento alguno, pueden provocar un desequilibrio ecológico en las cuencas hidrológicas.

Existen distintas alternativas para el tratamiento de este tipo de aguas residuales, como los procesos biológicos, físicos o químicos, o la decoloración de efluentes contaminados. Sin embargo, la aclimatación, los tiempos elevados de crecimiento microbiano, los altos costos de inversión y de operación son algunas de las limitaciones que se presentan para la aplicación de dichos procesos (Miranda, 2018). Por esta razón, es necesario explorar otras opciones tecnológicas que permitan la óptima remoción de los colorantes textiles en el agua.

Diversas investigaciones se han centrado en la búsqueda de materiales lignocelulósicos capaces de remover colorantes que no solo generan contaminación visual en el medio, sino que pueden generar toxicidad en los organismos acuáticos. Por ejemplo, en 2012, Peña, Giraldo y Moreno consideraron que “la adsorción es un método interesante para la eliminación de compuestos orgánicos y metales de medios acuosos contaminantes, debido a la alta eficiencia y el fácil manejo de los materiales adsorbentes utilizados”.

Por esta razón, existe un gran número de materiales residuales o subproductos usados como precursores en la elaboración de materiales adsorbentes, muchos de ellos provenientes

de la agroindustria o de desechos de las actividades domésticas. En este sentido, Solís, Morales, Ayala y Durán (2012) emplearon “las cáscaras de diversas frutas, la fibra de coco, la corteza de plátano, la cáscara de arroz, así como también el bambú, aserrín de maderas y el bagazo de la caña de azúcar” como residuos útiles en la obtención de materiales adsorbentes como el carbón activado.

“El carbón activado es el adsorbente más versátil y comúnmente usado debido a su alta área superficial [entre 500 y 2000 m²/g] y volumen de poros, alta capacidad de adsorción, con cinética rápida, y relativamente fácil regeneración...” (Peña *et al.*, 2012). Por ello, el carbón activado puede ofrecer una opción de bajo costo en el tratamiento de aguas residuales gracias a sus propiedades adsorbentes, e inclusive poder aplicarse en remoción de contaminantes en fase gaseosa. En 2015, Ensuncho *et al.*, argumentaron que “los carbones activados provenientes de residuos agrícola presentaron eficientes propiedades adsorbentes de colorantes textiles en efluentes industriales”.

Es este sentido, es de suma importancia aprovechar y darles valor agregado a los residuos orgánicos generados para obtener un material adsorbente de amplia gama como es el carbón activado, con la finalidad de remover de las aguas residuales contaminadas por colorantes como el azul de metileno y el naranja de metilo. El uso de este tipo de residuos no solo refleja la propuesta de obtener un material adsorbente de bajo costo, sino que al mismo tiempo resuelve un problema local en materia de disposición final de residuos.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Obtener carbón activado a partir del serrín y de la cáscara de limón para la adsorción de colorantes textiles en agua, y de disponer el material adsorbente en una mezcla de suelo con sustrato para uso en la planta ornamental cempasúchil (*Tagetes erecta*), siendo una posible alternativa para su disposición final.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Preparar carbón activado a partir de residuos orgánicos: serrín y cáscara de limón (CAS y CAL, respectivamente) utilizando un método de activación química.
- Evaluar la capacidad de adsorción de los carbones activados obtenidos sobre los colorantes Azul de Metileno (AM) y Naranja de Metilo (NM) en agua.
- Analizar el carbón activado por espectrofotometría *FT-IR* antes y después de las pruebas de adsorción.
- Determinar las posibles repercusiones del carbón activado inicial y residual en el crecimiento de la planta ornamental cempasúchil (*Tagetes erecta*).

HIPÓTESIS

Los carbones activados obtenidos a partir del serrín (CAS) y de la cáscara de limón (CAL) son capaces de adsorber colorantes empleados en la industria textil y pueden disponerse en el suelo después de su uso, sin afectar el desarrollo de la planta ornamental cempasúchil (*Tagetes erecta*).

CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES

1.1. Colorantes

Se cree que los colorantes han sido utilizados desde la época de la prehistoria, obteniéndose a partir de extractos de plantas, animales o minerales. Hernández (2014) reporta el uso de los colorantes naturales en la tinción de vestiduras de las momias por parte de los egipcios, en la realización de murales en Bonampak por los mayas e inclusive en el teñido de togas de los emperadores por parte de los romanos.

No fue hasta 1856 que W. H. Perkin logró sintetizar el primer colorante artificial soluble en agua que teñía la seda en un tono púrpura, mostrando una intensidad de color superior a los colorantes de origen natural. Su hallazgo resultó de un intento fallido por sintetizar quinina (Hernández, 2014).

En la literatura se definen a los colorantes como “compuestos químicos orgánicos muy estables que poseen una afinidad química o física hacia las fibras, tienden a mantener su color a pesar del desgaste y de la exposición a la luz solar, agua o los detergentes” (Alonso, 2014). A partir de soluciones acuosas, los colorantes pueden ser aplicados a distintos productos como alimentos, fármacos, papel, acabados textiles, entre otros.

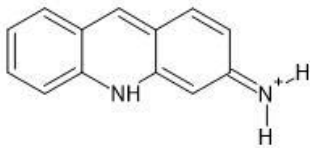
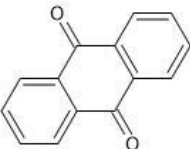
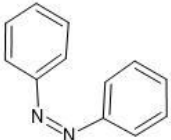
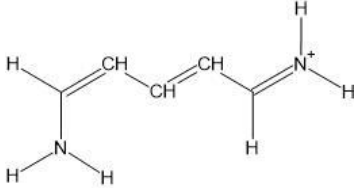
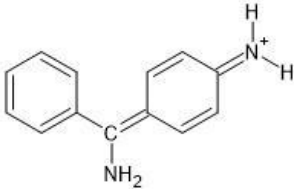
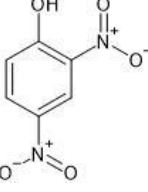
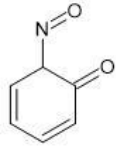
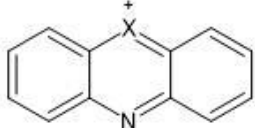
1.1.1. Constitución química de los colorantes

Partiendo de un punto de vista químico la estructura de los colorantes, en general, se pueden dividir en dos partes: cromóforo (acompañado de una estructura química no saturada) y auxocromo.

1.1.2. Cromóforos

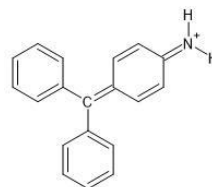
Son los grupos encargados de la absorción de la luz, por lo que es el responsable de dar color a la solución (Martínez, 2018). En la *Tabla 1* se muestran algunos ejemplos de grupos cromóforos.

Tabla 1. Cromóforos presentes en las estructuras químicas de los colorantes

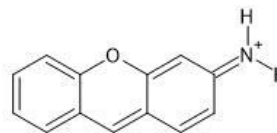
Grupo cromóforo	Estructura
Acridina	
Antraquinona	
Azo	
Cianina	
Difenilmetano	
Nitro	
Nitroso	
Quinoneimina	

Continúa...

Trifenilmetano



Xanteno



Fuente: Martínez (2018)

En 2018, Zaruma *et al.*, declararon que los colorantes “azo”, caracterizados por tener al menos un doble enlace de nitrógenos en su estructura molecular, son los más utilizados por la industria textil. En general, son poco biodegradables y pueden llegar a ser compuestos cancerígenos y mutagénicos.

1.1.3. Auxocromos

Estos grupos son sustituyentes del cromóforo, no son capaces de presentar coloración, pero ayudan al cromóforo a intensificar el color. Este grupo alteran la longitud de onda y son los responsables de la fijación del color en el proceso de teñido (Hernández, 2014; Martínez, 2018). En la *Tabla 2* se muestran algunos ejemplos de auxocromos.

Tabla 2. Auxocromos presentes en las estructuras químicas de los colorantes

Nombre	Enlace
Oxidrilo	-OH
Amina primaria	-NH ₂
Amina secundaria	-NHCH ₃
Amina terciaria	=N ⁺ (CH ₃) ₂
Ácido carboxílico	-COOH
Ácido sulfónico	-SO ₃ H

Fuente: Hernández, 2014.

1.1.4. Clasificación de los colorantes

De acuerdo con la literatura, existe más de una forma de clasificar los colorantes. Algunos autores toman en cuenta la procedencia del colorante (natural o artificial), otros los clasifican de acuerdo con el Colour Index (C.I.), a partir de su aplicación, por ejemplo, en teñidos o inclusive a partir de su estructura química, como se explicó en los apartados anteriores. “Difícilmente se puede admitir una sola clasificación que reúna todas las condiciones y características necesarias para poder estudiar los materiales colorantes, ya que depende del criterio que previamente se adopte como fundamento de la misma” (Gómez, 2020).

En 2016, Valladares, Valerio, de la Cruz, y Melgoza, tomaron en cuenta las aportaciones del Índice Internacional del Color (o Colour Index) y la forma de aplicación de los colorantes para clasificarlos de la siguiente manera: ácidos, básicos, directos, dispersos, con brillo fluorescente, para piel, mordentes, pigmentos, reactivos, azufrados y cuba.

1.1.5. Colorantes básicos

Son aquellos colorantes que presentan afinidad hacia fibras tipo lana, seda y poliacrilonitrilo. Se consideran generalmente como hidrocloruros de sales conteniendo grupos básicos como: $\text{NH}(\text{CH}_3)_2^+$, $\text{NH}_2(\text{CH}_3)^+$, $\text{N}(\text{CH}_3)_2$, NH_2 . Los cromóforos en estos colorantes se encuentran en el catión, por lo cual son llamados colorantes catiónicos (Marcano, 2018; Ahuatzin, 2019; Gómez, 2020).

1.1.6. Azul de metileno (AM)

Su nombre, según la IUPAC *3,7-bis (dimetilamino)-cloruro de fenazationio* o también nombrado *Azul básico 9*, es un colorante de naturaleza catiónica perteneciente a la familia de las fenotiazinas (*Figura 1*). Su fórmula condensada es $\text{C}_{16}\text{H}_{18}\text{N}_3\text{SCl}$, tiene un peso molecular de 319.9 g/mol y es empleado en la tinción de algodón, madera y seda (Rosas, 2012).

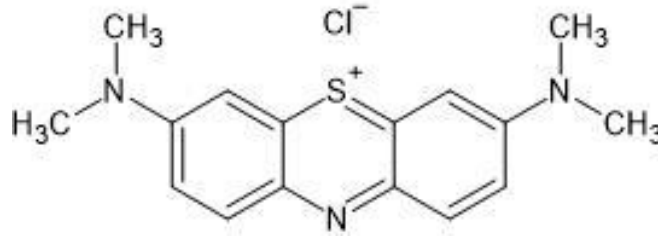


Figura 1. Estructura química del colorante azul de metileno (Fuente: Propia)

Este colorante presente en aguas residuales puede generar serios problemas a la salud pública y al medio ambiente. En 2014, Villada, Hormaza, y Casis mencionaron que, por su toxicidad, el azul de metileno puede incrementar el ritmo cardiaco, provocar alteraciones gástricas y nerviosas, así como inducir la aparición de cianosis e ictericia.

1.1.7. Colorantes ácidos

Son aquellos colorantes que presentan afinidad de fijación hacia fibras tipo seda, lana y la poliamida fijándose a partir de formación de sales. En cuanto a su estructura química, tienen carácter aniónico, conteniendo grupos ácidos como: SO_3H , CO_2H , NO_2 , OH (fenólicos), generando su solubilidad en agua. Los cromóforos en estos colorantes forman parte de la carga negativa o anión. (Marcano, 2018; Ahuatzin, 2019; Gómez, 2020).

1.1.8. Naranja de metilo (NM)

Pertenece a la familia de colorantes “*azoderivados*”, usado comúnmente como indicador de pH cambiando su color entre pH 3.1 y 4.4 (Figura 2). Su nombre, según la IUPAC es *sal sódica de ácido sulfónico de 4-dimetilaminoazobenceno*, su fórmula condensada es $\text{C}_{14}\text{H}_{14}\text{N}_3\text{NaO}_3\text{S}$ y su peso molecular es de 327.34 g/mol. (Ramírez *et al.*, 2015).

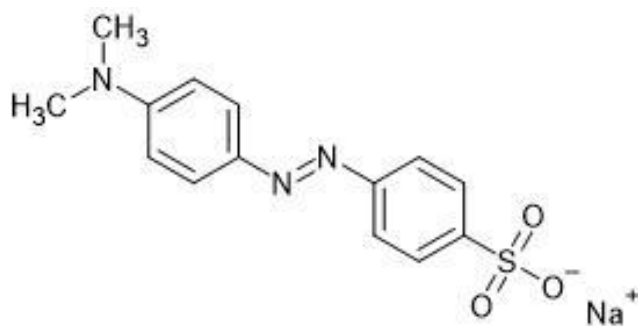


Figura 2. Estructura química del colorante naranja de metilo (Fuente: Propia)

Al igual que el azul de metileno (AM), el naranja de metilo puede provocar riesgos a la salud. Cruz (2015) menciona que es un material alergénico, que provoca erupciones al contacto con la piel o intoxicación si este se ingiere.

1.2. Problemática ambiental por los colorantes textiles en agua

“La industria textil es la principal consumidora de colorante y es una de las más grandes generadoras de efluentes contaminados... y vierte grandes cantidades de productos contaminantes” (Pedraza, 2014). Esta se caracteriza, además, por un consumo excesivo de reactivos químicos, de agua y de energía.

1.2.1. Efecto de los colorantes en agua

Brañez, Gutiérrez, Pérez, Uribe y Valle (2018) declararon que la disminución de la luminosidad en los cuerpos de agua, la alteración en la actividad fotosintética y la reducción del oxígeno disponible son algunas causas de la acumulación de los colorantes en los sistemas acuáticos, ya que se caracterizan como compuestos tóxicos de alto peso molecular.

Las consecuencias que pueden traer los efluentes industriales contaminados por colorantes son varios. Pedraza (2014) señala que la disminución de la actividad fotosintética provocada por la reducción de la penetración de la luz en el agua genera escasas fuentes de alimento para la fauna acuática; la formación de la capa superficial de colorantes en el agua aumenta la demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅) provocando la asfixia de la fauna acuática.

1.3. Legislación ambiental en México

De conformidad con lo dispuesto en las Leyes Federales, Estatales o Locales, nuestro país cuenta con una *legislación ambiental* muy amplia para cada aspecto ambiental; con la finalidad de que toda persona goce de un medio ambiente sano para su desarrollo y bienestar. Al igual que señala responsabilidades para quienes provoquen un daño o deterioro al ambiente (Art. 4° de la CPEUM, párr. V). En materia de *agua* se cuenta con la siguiente legislación:

1.3.1. Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos (CPEUM)

Dentro de la CPEUM se tiene como fundamento, en materia de agua, tres artículos de los cuales se describen a continuación.

En el artículo 4° constitucional, párrafo VI, menciona que toda persona tiene derecho al acceso, disposición y saneamiento del agua, en donde los Estados debe sentar las bases para garantizar este derecho para definir el uso equitativo y sustentable de este recurso hídrico, en colaboración con la Federación, los municipios y de la propia ciudadanía.

La CPEUM también menciona que las aguas que se encuentran dentro de los límites territoriales y que se enlistan en el artículo 27, párrafo V; son propiedad de la nación. En la fracción I, párrafo X del mismo artículo nos habla que la explotación, uso y aprovechamiento de los recursos hídricos son realizados a partir de concesiones otorgadas con base en las leyes correspondientes.

En el Título Quinto “*De los Estados de la Federación y de la Ciudad de México*” nos habla en su artículo 115, fracción III, inciso a; que los municipios tienen a su cargo la función y servicio público de agua potable, drenaje, alcantarillado, tratamiento y disposición de sus aguas residuales.

1.3.2. Ley de Aguas Nacionales (LAN)

La LAN es una Ley de competencia federal, que se encarga de gestionar los recursos hídricos, con la finalidad de fomentar un aprovechamiento sustentable del agua. La LAN cuenta con un Reglamento el cual está enfocado a normar dicha Ley.

En esta Ley nos habla de que, las personas físicas o morales que requieran explotar, usar y aprovechar aguas nacionales se realizará mediante un título de concesión. De igual forma deberán cumplir con sus condicionantes (Art. 22 de la LAN, párr. II). La Ley también menciona que al tramitar el título de concesión se deberá tramitar el permiso de descarga de aguas residuales para verter de forma directa o intermitente a cuerpos receptores que sean aguas nacionales o demás bienes nacionales (Art, 21 de la LAN, frac. VIII; Art. 81 de la LAN, párr. I).

1.3.3. Normatividad mexicana en materia de agua

En México, la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) es el organismo responsable de dar seguimiento, en conjunto con la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), al marco normativo señalado por las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) que son de carácter obligatorio. La NOM-001-SEMARNAT-1996, NOM-002-SEMARNAT-1996 y NOM-003-SEMARNAT-1997 establecen los límites máximos permisibles (LMP) de contaminantes para las descargas de aguas residuales y aguas residuales tratadas para su reúso en servicios públicos. Además, también se cuentan con las Normas Mexicanas (NMX), las cuales, son de aplicación voluntaria; estas nos aportan métodos de prueba para analizar muestras de aguas residuales y determinar si los parámetros señalados por las NOM en las muestras están dentro de los LMP o en caso contrario, fuera de norma.

Uno de los inconvenientes de las NOM es su falta de actualización y, asociado a ello, la insuficiencia de los LMP y parámetros establecidos para controlar la contaminación en cuerpos de agua. Ya que, de acuerdo con la Ley Federal sobre Metrología y Normalización, las normas se deben actualizar cada 5 años.

1.4. Procesos para remoción de colorantes textiles

Las técnicas que son empleadas para la eliminación de colorantes en aguas residuales se pueden dividir en tres importantes categorías:

1.4.1. Tratamiento mediante procesos biológicos

Se utiliza *procesos aerobios* a partir de aislar cepas de bacterias para degradar algunos colorantes; en los *procesos anaerobios* diversas cepas han logrado romper el enlace *azo* de manera eficiente; y los *procesos acoplados anaerobio-aerobio*, combinan las ventajas encontradas de los dos procesos anteriores (Miranda, 2018). Sin embargo, Castellar, Angulo, Zambrano y Charris (2013) argumentan que los tratamientos biológicos tienen dificultades de eliminar colorantes de manera continua, además, requieren tiempos de decoloración-fermentación prolongados.

1.4.2. Tratamiento mediante procesos químicos

Estos tratamientos incluyen la *coagulación-floculación*, este parte de la adición de polielectrolitos o agentes floculantes inorgánicos (sales de Fe y Al) que forman flóculos con las moléculas de colorante para su eliminación por sedimentación; la *ozonación* utiliza la capacidad oxidativa del ozono (O_3) para descomponer las moléculas del colorante; y el *Reactivo de Fenton* (*combinación de H_2O_2 y sales de Fe (II)*) produce iones hidróxido y radicales hidroxilo para oxidar el colorante y formar precipitados con el ion férrico. Pero el tiempo de vida del tratamiento por *ozonación* es corta, los cuales repercute en el costo del proceso, y en el *reactivo de Fenton* suele ser eficaz en un estrecho rango de pH inferior a 3.5, además del costo elevado de los reactivos (Miranda, 2018). En 2013, Castellar *et al.*, declararon cierta desventaja de la *coagulación-floculación* como la deficiente aplicación en colorantes muy solubles.

1.4.3. Tratamiento mediante procesos físicos

Este incluye las *membranas de filtración* que permiten la separación efectiva de las moléculas de colorante tomando en cuenta el tamaño de poro de la membrana seleccionada; el *proceso electroquímico* que se basa en la hidrólisis del colorante a partir de una corriente controlada o a través de agentes secundarios generados electrolíticamente (Miranda, 2018). Pero estos tratamientos presentan algunas dificultades ya que "... la mayoría de estos son costosos y generan lodos o formación de subproductos" (Castellar *et al.*, 2013)

Sin embargo, muchas investigaciones señalan a la *adsorción* como un tratamiento físico prometedor, eficiente y de fácil implementación. Los adsorbentes inorgánicos tienen una

gran estabilidad mecánica y química, grandes áreas superficiales y resistencia a la degradación microbiana. Los adsorbentes orgánicos se obtienen a partir de fuentes renovables o de residuos industriales (Miranda, 2018). Existen diversos materiales adsorbentes empleados para remover contaminantes principalmente en agua y aire, mostrando el carbón activado mejores resultados.

En 2014, Villada *et al.*, señalaron que la propiedad de este material se atribuye a su elevado contenido de lignina, celulosa y hemicelulosa, cuyos grupos funcionales hacen posible la interacción con los contaminantes disueltos.

1.5. Adsorción

Operación unitaria en la que “moléculas en solución golpean las paredes de un sólido adsorbente y son adheridas a su superficie” (Navarrete, Quijano, Vélez, 2014). “Este fenómeno se debe a la instauración del campo de fuerzas de la superficie del adsorbente que al entrar en contacto con un fluido es capaz de establecer una asociación” (Barrera, 2015). En la adsorción intervienen dos especies: el adsorbato; la sustancia que se adsorbe (Valladares *et al.*, 2016), y el adsorbente; el material empleado para adsorber sustancias (Navarrete *et al.*, 2014; Valladares *et al.*, 2016).

Este proceso se puede llevar a cabo por fuerzas de tipo físico o químico, según la naturaleza del enlace de adsorción.

1.5.1. Adsorción física

También conocida como fisioadsorción o fisisorción, se produce a partir de interacciones débiles de largo alcance, generalmente fuerzas de van der Waals, lo que permite que partículas, moléculas o iones queden retenidos en la superficie del adsorbente (Atkins, 1998; Barrera, 2015; Valladares *et al.*, 2016). Como este tipo de adsorción no es específica, el adsorbato tiene movimiento libre sobre la superficie del adsorbente (Navarrete *et al.*, 2014; Barrera, 2015), esta característica le permite al adsorbato condensarse y formar multicapas sobre la superficie; se considera un proceso reversible.

1.5.2. Adsorción química

Conocido también como quimiadsorción o quimisorción, se produce a partir de que las moléculas o átomos del adsorbato se unen a la superficie del adsorbente formando enlaces iónicos o covalente [transferencia de electrones], dando origen a nuevos compuestos superficiales (Atkins, 1998; Navarrete *et al.*, 2014; Barrera, 2015). Como este tipo de adsorción es de tipo específico, el adsorbato forma monocapas en la superficie del adsorbente provocando que las moléculas, átomos o iones adsorbidos no puedan moverse de un sitio a otro sobre la superficie del material adsorbente (Atkins, 1998; Navarrete *et al.*, 2014). La adsorción química se considera irreversible y para remover el material adsorbido se debe calentar el adsorbente.

En 2015, Barrera resaltó que no es sencillo determinar con qué tipo de adsorción se está trabajando, ya que se reportan casos en los que se pueden presentar fisisorción y quimisorción de manera simultánea. En la *Tabla 3* se muestran los criterios generales que distinguen los dos tipos de adsorción.

Tabla 3. Criterios generales de la fisisorción y quimisorción

Fisisorción	Quimisorción
Carácter exotérmico (8-20 KJ/mol)	Carácter exotérmico (40-800 kJ/mol)
Posición del adsorbato no específica	Posición del adsorbato específica
Formación de monocapas y multicapas	Formación de monocapas
Dependencia lineal con la temperatura	Dependencia exponencial con la temperatura
Adsorción rápida y lenta	Adsorción lenta
No activada	Activada
Proceso reversible	Proceso irreversible
No hay transferencia de electrones, aunque la polarización del adsorbato puede ocurrir	Hay transferencia de electrones llevando a la formación de enlaces químicos adsorbato-superficie.

Fuente: Barrera, 2015.

1.5.3. Materiales adsorbentes

Hoy en día, se cuenta con diferentes tipos de materiales adsorbentes, ya sea naturales o sintéticos, que dependiendo de sus características fisicoquímicas determinará su aplicación en la adsorción de diversos contaminantes en el agua. Algunas de las características fundamentales que deben presentar los materiales adsorbentes son: alta porosidad, amplia área superficial y sitios específicos de adsorción. Siendo las dos primeras características quienes favorezcan la velocidad de adsorción (Valladares *et al.*, 2016).

Algunos adsorbentes como la sílice, silicato por capas, zeolitas (aluminosilicatos), asbesto, magnesita, bauxita, entre otros, destacan por sus características estructurales, composición química, porosidad y propiedades fisicoquímicas; haciéndolos buenos materiales adsorbentes. En la *Tabla 4* se describen a detalle:

Tabla 4. *Tipos de adsorbentes*

Adsorbente	Descripción
Sílice	Materiales de origen sedimentario constituidos en un 60 a 95 % de SiO ₂ amorfo. Se distinguen tres tipos de roca silícea: diatomitas, tripolies y arcillas de sílice. Se diferencian entre sí en origen y las características fisicoquímicas.
Silicatos por capas	Con respecto a las características de la estructura porosa, se pueden dividir en tres tipos: silicatos estratificados con expansión estructural de células (montmorillonita, hectorita, saponita, vermiculita), silicatos estratificados con estructura celular rígida (caolinita, glauconita, pirofilita, talco) y silicatos de capa (paligorskita y sepiolita).

Continúa...

Zeolitas	Su interés por este material no fue hasta principios de 1970 cuando se descubrieron grandes depósitos sedimentarios de zeolita natural; debido a su adsorción única, intercambio iónico, filtración y propiedades catalíticas, su facilidad de la explotación de canteras y bajo costo.
Asbesto	Esta especie se puede subdividir en dos grupos: anfibólica y crisotilo, que difiere en composición, estructura y propiedades. Los recursos mundiales de la anfibólica están limitados y no puede satisfacer las necesidades en constante aumento de la industria. La superficie externa de amianto crisotilo varía de 4 a 60 m ² /g, y depende del grado de dispersión, canales tubulares de crisotilo se llenan en una medida significativa con material amorfo o partículas minerales. (...) Las moléculas de agua, amoníaco y otras sustancias, se adsorben en el espacio no ocupado de los poros.
Bauxita	Es un material heterogéneo natural compuesto, principalmente, de uno o más minerales de óxidos de aluminio y otros componentes que incluyen óxidos de hierro, sílice, titanio, aluminosilicatos, zirconio y agua.

Fuente: Ramírez y de Jesús, 2017

En la actualidad, se busca obtener materiales adsorbentes a partir del aprovechamiento de los residuos orgánicos generados por diferentes sectores industriales (como la alimenticia o agrícola), como pueden ser cáscaras o huesos de frutas, restos vegetales, cortezas de árboles, etc. En 2016, Valladares *et al.*, declara que la utilización de residuos orgánicos para la remoción de contaminantes presentes en agua represente una alternativa de aprovechamiento con las ventajas de obtener materiales adsorbentes de bajo costo, disponibilidad, adecuada capacidad de adsorción, modificaciones químicas factibles, susceptibles a la regeneración y degradabilidad.

1.6. El carbón activado

Uno de los materiales adsorbentes más utilizados para la remoción de compuestos de tipo orgánico e inorgánicos es el CA; en la actualidad, esta es la aplicación más significativa del proceso de adsorción para el tratamiento de agua potable y residual (de Piante *et al.*, 2018).

El CA es un material carbonizado de origen vegetal o mineral. Su nombre “activado” se debe a su elevado grado de porosidad, una considerable área superficial interna y un contenido de grupos químicos superficiales, principalmente de oxígeno y nitrógeno que contribuyen a la capacidad de adsorber ciertas sustancias (Solís *et al.*, 2012).

Obregón (2016) afirma que estructuras cristalinas como el grafito, a partir de sus átomos de carbono en su superficie, son capaces de atraer compuestos causantes de la coloración, del olor o del sabor indeseable, pero lo que hace diferente al carbón activado es su amplia área superficial a partir de la activación química, lo que aumenta la cantidad de sitios activos (ácidos y básicos) en su superficie para realizar la adsorción.

Para comprender cómo este material adsorbente contribuye a la remoción de contaminantes en agua, es necesario enfocarse en la composición química y física del CA.

1.6.1. Composición química del carbón activado

Según la literatura, la composición química del CA es de aproximadamente 70-80% de carbono, 6% de oxígeno, 0.5% de hidrógeno y un 5-10% corresponde a ceniza [ésta puede estar constituida por Na, K, Ca, Mg, Si, Fe, entre otros]. A partir de su composición se

entiende que el CA es carbón prácticamente puro al igual que lo es el diamante, el grafito y diversos carbones minerales o de leña (Navarrete *et al.*, 2014; Obregón, 2016).

En 2008, Cortes, Giraldo, García, García y Moreno argumentan que los átomos de carbono que se encuentran en la superficie del CA tienen una valencia insaturada, actuando como sitio activo y dándole al carbono la capacidad de quimisorber heteroátomos como oxígeno, nitrógeno, hidrógeno o azufre. Esto propicia a la creación de varios tipos de especies químicas, las cuales serán de influencia en el proceso de adsorción. En la *Figura 3* se muestra una estructura hipotética del CA con grupos funcionales oxigenados.

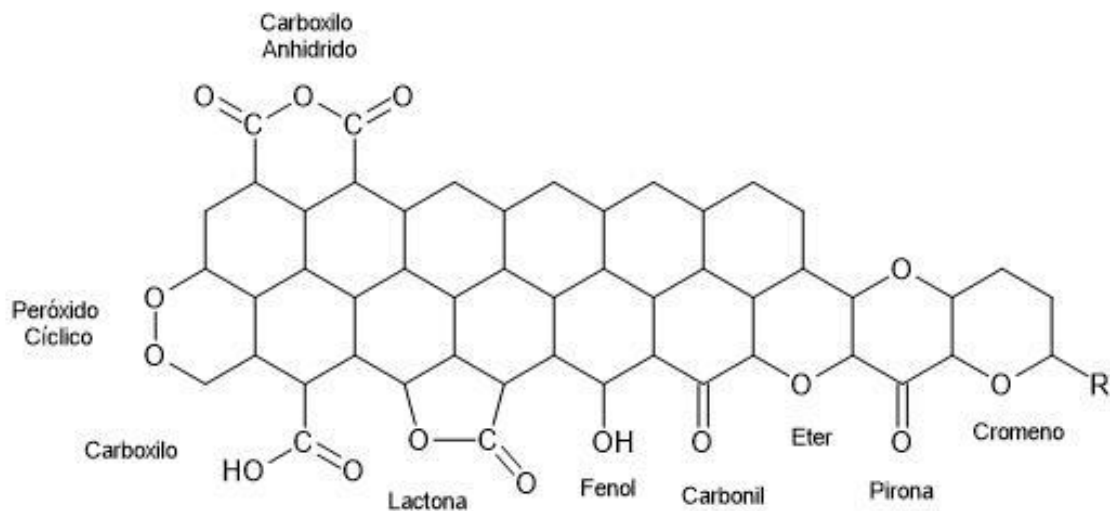


Figura 3. Estructura hipotética del CA con grupos funcionales oxigenados en su superficie (Cortes *et al.*, 2008; Aviña, 2018)

1.6.2. Composición física del carbón activado

La IUPAC clasifica a los CA a partir del tamaño de poro, dividiéndola en tres categorías: microporo, mesoporo y macroporo. En la *Tabla 5* se explica cada tipo de poro que puede presentar un CA.

Tabla 5. *Tipos de poros presente en el CA*

Tipo	Descripción
Microporos	Se caracterizan por tener dimensiones moleculares; el área de superficie constituye aproximadamente al 95% de la superficie total del CA. Tienen un volumen de 0.15 a 0.7 cm ³ /g. La estructura microporosa puede subdividirse en ultramicroporos (radio de poros menores de 0.6 a 0.7 nm) y supermicroporos (radio de poros de 0.7 a 2 nm aproximadamente). La adsorción de estos poros ocurre a través del llenado de volumen y no se presenta condensación capilar.
Mesoporos	También son conocidos como poros transicionales, tienen un área superficial que no supera el 5% del área superficial total del CA ya que las dimensiones de los poros se encuentran en intervalos de 2 a 50 nm y su volumen varía entre 0.1 a 0.2 cm ³ /g.
Macroporos	No se consideran de importancia en los procesos de adsorción con CA. Tienen radios efectivos > 50 nm, frecuentemente en el intervalo de 500 a 2000 nm, Tienen un volumen de poro entre 0.2 a 0.4 cm ³ /g y su área de superficie en el adsorbente no excede de 0.5 m ² /g.

Fuente: Aviña, 2018

Los microporos son ideales para retener moléculas pequeñas como compuestos más volátiles que el agua; estos pueden ser olores sabores y solventes. Los macroporos son ideales en la adsorción de moléculas grandes como cloradas o las sustancias húmicas (ácido

húmico y fúlvico) generadas al descomponerse la materia orgánica. Y los mesoporos son apropiados para la adsorción de moléculas de tamaño intermedio entre las anteriormente descritas (Obregón, 2016).

1.6.3. Procedencia del carbón activado

Cualquier material con un alto contenido de carbono puede ser utilizado como precursor para la producción de CA. “La elección del precursor para la elaboración de carbón está en función de su disponibilidad, precio y pureza; sin embargo, el proceso de fabricación del CA [tipo de reactivo y condiciones de activación] y su posible aplicación también deben ser considerados” (Solís *et al.*, 2012).

Entre las materias primas más “convencionales” para la obtención de CA se encuentran los restos de madera o carbones minerales. Sin embargo, Daoud, Benturki, Girods, Donnot & Fontana (2019) señalan que se han utilizado en los últimos años una gran variedad de residuos agrícolas como semillas de zapote blanco, tallo de uva, cáscara de naranja, semillas de melón y subproductos industriales como son los lodos de aguas residuales.

1.6.4. Aplicaciones del carbón activado

Obregón (2016) menciona que, en 1794 en Inglaterra, fue la primera aplicación a nivel industrial del carbón activado como agente decolorante en la industria del azúcar, pero no fue hasta la época de la Primera Guerra Mundial el punto de partida para el desarrollo industrial del carbón activado, tanto para la adsorción de gases tóxicos hasta en la potabilización de agua.

Hoy en día, sus aplicaciones también se encuentran en la industria química para la recuperación de disolventes, desorción del aire, mascarillas de gas, desulfuración de gases industriales, tratamiento de aguas potables y catálisis; en la industria farmacéutica como vehículo excipiente en fármacos, tratamiento contra intoxicaciones y purificación de antibióticos y vitaminas; y en la industria alimenticia para decoloración de alimentos, tratamiento de bebidas alcohólicas y desorción de alimentos (Martínez de Yuso, 2012).

1.6.5. Aplicaciones ambientales del carbón activado

Las aplicaciones más relevantes del CA en el área ambiental son a partir de la adsorción de contaminantes presentes en el agua, aire y otros líquidos a purificar. Los contaminantes más destacados son:

- Contaminantes orgánicos: colorantes y compuestos coloreados, gran cantidad de compuestos aromáticos (derivados bencénicos, fenoles, compuestos aromáticos nitrados), pesticidas, diversas macromoléculas orgánicas (sustancias húmicas, etc.).
- Contaminantes inorgánicos: ácido hipocloroso y cloro, amoníaco, cloruro de mercurio (II), cianuros, dicromatos, yodo, permanganatos (Navarrete *et al.*, 2014).

CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA

1.1. Materia Prima: Residuos orgánicos de cáscara de limón y serrín

El CA se preparó a partir de cáscara de limón reducido a un tamaño de 1-1.5 cm y de serrín molida a un tamaño de 1-2 mm (*Figura 4*), ambos se secaron durante 12 h al sol. Estos residuos orgánicos tienen procedencia del municipio de San Salvador el Verde, Puebla.



*Figura 4. Residuos orgánicos de:
A) Cáscara de limón, B) serrín*

1.2. Obtención de los carbones activados CAL y CAS

Para obtener CAL y CAS se usó un proceso de activación química, empleando como agente activante una solución de ácidos fosfórico (H_3PO_4) a una concentración de 0.2 M, (Luna, González, Gordon y Martín, 2007).

Se tomaron 50 g de cáscara de limón y de serrín para agregarlos, por separado, en vasos de precipitados de 500 mL de capacidad junto con 450 mL del agente activante H_3PO_4 0.2

M para cada muestra (*Figura 5*). El material se mantuvo en agitación constante por 2 h sobre una parrilla a 70 °C y posterior a ello se dejó reposar durante 24 h a temperatura ambiente.

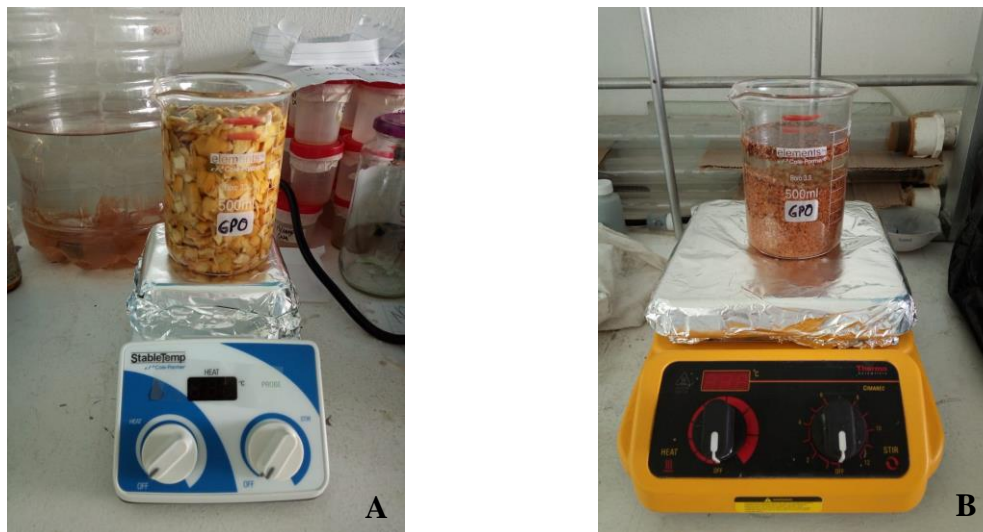


Figura 5. Activación química de las muestras: A) cáscara de limón, B) serrín

Para retirar el agente activante, ambas muestras se filtraron y posteriormente se agregaron en cápsulas de porcelana; éstas se introdujeron a una mufla para calcinar las muestras a 550 °C durante 2 h (*Figura 6*). Transcurrido el tiempo de calcinación las muestras se dejaron enfriar durante 24 h. Los procesos de secado y carbonización – activación fueron elegidos a partir de la metodología descrita por Luna *et al.*, (2007) quienes realizaron una propuesta de diseño de un horno rotatorio para la obtención de carbón activado a partir de cáscaras de coco.



Figura 6. *Calcinación de las muestras*

1.2.1. Material resultante: CAL y CAS

Se inició una serie de lavados con 300 mL de agua desionizada para remover el agente activante del material carbonizado (*Figura 7*). Entre cada lavado se realizó una agitación durante 2 h a 50 °C; posterior a ello se dejó reposar por 24 h, se filtró el agua residual y se inició un nuevo lavado. Este procedimiento se repitió hasta alcanzar un pH ~6.

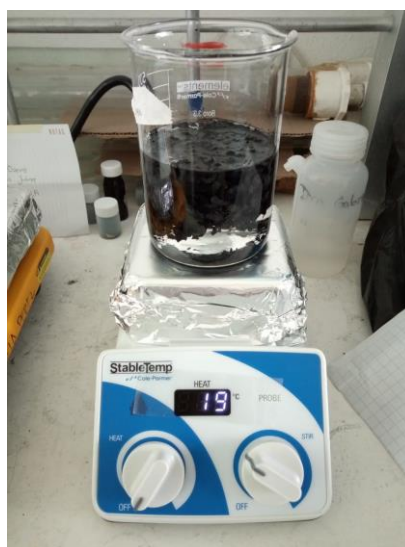


Figura 7. *Lavado del CA con agua desionizada*

Finalmente, los carbones activados CAL y CAS, se secaron en una estufa a 110 °C por 2 h y se dejaron reposar por 24 h (Castellar, *et al.*, 2013). El material se molió en un mortero y se tamizó a través de un tamiz no. 70 para coleccionar CAL y CAS en recipientes de plástico previamente etiquetados.

1.3. Evaluación de la capacidad de adsorción de CAL y CAS

1.3.1. Diseño experimental: pruebas de adsorción

Se preparó una solución con el colorante AM y otra con el colorante NM usando agua desionizada, ambas a una concentración de 50 ppm. En cuanto a las pruebas de adsorción, en el primer ciclo se agregó en un vaso de precipitados 1 g de carbón activado (CAL o CAS) en 100 mL de solución con colorante (AM o NM) dejando en agitación durante 12 h a temperatura ambiente, posterior a ello se dejó reposar por 12 h.

El CA resultante se vuelve a utilizar en el segundo ciclo manteniendo las mismas condiciones de operación que en el primer ciclo; si se aprecia una reducción significativa de color en la solución resultante se procede a realizar un nuevo ciclo utilizando el CA resultante en el último ciclo de uso.

Cabe señalar que, entre cada ciclo de uso, CAL y CAS se retiran de la solución al finalizar la prueba de adsorción y se secan en una estufa a 110 °C durante 2 h para proseguir con el siguiente ciclo.

Las pruebas de adsorción guardan relación con la metodología propuesta por Castellar *et al.*, (2013); a 1 g de CA comercial le adicionaron 100 mL de cada una de las diluciones preparadas a partir de una solución “stock” de 3000 mg/dm³ de colorante AM.

En la *Tabla 6* se observa el diseño de las pruebas de adsorción.

Tabla 6. *Diseño experimental de los procesos de adsorción con CAL y CAS*

Contenido del vaso de precipitados		
Nomenclatura	Carbón activado	Colorante
CAL-AM	Cáscara de limón	Azul de metileno
CAL-NM	Cáscara de limón	Naranja de metilo
CAS-AM	Serrín	Azul de metileno
CAS-NM	Serrín	Naranja de metilo

1.3.2. Capacidad de adsorción de CAL y CAS por espectrofotometría *UV-Vis*

La capacidad de adsorción de CAL y CAS en soluciones acuosas se evaluó a partir de la medición de la concentración de los colorantes AM y NM antes y después de las pruebas de adsorción.

Esta cuantificación se realizó por medio de un espectrofotómetro *UV-Vis* marca PerkinElmer, modelo X10-60259 comprendiendo una región de longitud de onda $\lambda = 400$ a 800 nm y utilizando celdas de cuarzo de 1 mL (Castellar, *et al.*, 2013); se tomó una alícuota de los colorantes iniciales y de las muestras finales después de cada ciclo de adsorción con CAL o CAS. El porcentaje de remoción se denota por R% y se calculó a partir de la ecuación 1 (Ec. 1) tomando en cuenta la λ_{\max} de cada colorante reportada en la literatura:

$$R\% = \left(\frac{A_i - A_f}{A_i} \right) \times 100$$

Ec. 1

Donde A_i corresponde a la absorbancia del colorante inicial y A_f corresponden a la absorbancia del sobrenadante resultante después de las pruebas de adsorción con el CA (Martínez, 2018).

1.4. Caracterización por espectrofotometría *FT-IR* de CAL y CAS

La técnica de espectrofotometría infrarroja por transformada de Fourier (*FT-IR*) ayuda a evidenciar las vibraciones características de los grupos de átomos por lo que se emplea en la identificación de grupos orgánicos. Se utilizó un espectrofotómetro de infrarrojo marca PerkinElmer, modelo Spectrum One para identificar aquellos posibles grupos funcionales presentes en los carbones activados CAL y CAS (Ensuncho *et al.*, 2015), el análisis se realizó en la región de 4000-650 cm^{-1} antes y después de las pruebas de adsorción.

1.5. Disposición final del CA (posterior a la adsorción)

Como una alternativa para la disposición final del CA residual (después de su uso como adsorbente) y poder describir las repercusiones en el crecimiento de plantas ornamentales se describe lo siguiente:

1.5.1. Diseño experimental

Se realizó un ensayo experimental por duplicado utilizando 7 macetas por cada lote; 1 maceta como *control* (testigo), 2 macetas con CA *inicial* y 4 macetas con CA *residual*.

En la *Tabla 7* se puede observar la distribución de las macetas por cada lote.

Tabla 7. *Diseño experimental de la aplicación del CA residual, en ensayo del cultivo de cempasúchil (Tagetes Erecta)*

Tratamientos	Nomenclatura		Contenido de macetas
	Maceta	Lote 1	
Control	C1	C2	Maceta con sustrato
CA inicial	IL1	IL2	Maceta con sustrato + CA inicial (CAL)
	IS1	IS2	Maceta con sustrato + CA inicial (CAS)
CA residual	AML1	AML2	Maceta con sustrato + CAL-AM residual
	AMS1	AMS2	Maceta con sustrato + CAS-AM residual
	NML1	NML2	Maceta con sustrato + CAL-NM residual
	NMS1	NMS2	Maceta con sustrato + CAS-NM residual

1.5.2. Preparación de macetas

Se utilizaron contenedores de plástico de 1 L como macetas. En las macetas correspondientes al tratamiento *CA inicial* se agregó ~1 kg de suelo con sustrato comercial Vigoro® junto con 0.2 g de carbón activado inicial (CAL o CAS); para las macetas del tratamiento *CA residual* se agregó ~1 kg de suelo con sustrato comercial Vigoro® y 0.2 g de carbón activado residual empleado en las pruebas de adsorción; y para las macetas que corresponde al tratamiento *control* solo se agregó ~1 kg de suelo con sustrato comercial Vigoro® (*Figura 8*). La irrigación se llevó a cabo todos los días con 200 mL de agua.



Figura 8. Preparación de macetas

1.5.3. Ensayo en macetas

En cada maceta se sembraron 2 semillas de cempasúchil (*Tagetes erecta*) de la marca comercial Vita® a una profundidad de 0.5 cm aproximadamente (*Figura 9*). Durante los primeros 10 días posteriores a la siembra se expusieron las macetas a la sombra, concluyendo este periodo su exposición fue al sol de manera directa.



Figura 9. Semillas de cempasúchil (*Tagetes erecta*)

Durante el experimento se monitorearon las variables de tiempo de germinación, número de semillas germinadas, altura de la planta e inicio de floración. El experimento tuvo una duración de 18 semanas. Vaca *et al.*, (2018) proponen una metodología similar al monitorear el efecto del carbón activado en el desarrollo de *Citrus limon (L.)* considerando las variables a evaluar: el porcentaje de germinación y número de brotes de las plantas.

1.5.4. Análisis estadístico

A partir de los datos obtenidos y recolectados a través de la observación, se realizó un análisis estadístico de varianza ANOVA para determinar si existen diferencias significativas en las variables del tiempo de germinación, número de semillas germinadas, altura de las plantas e inicio de floración entre los tratamientos, con un nivel de significancia del 5% ($\alpha=0.05$).

CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Por cada 50 g de materia prima (cáscara de limón o serrín) se obtuvo 8.25 g de CAL y 8.84 g de CAS. En los siguientes apartados se presentan los resultados obtenidos en las pruebas de adsorción, caracterización de CAL y CAS, y la disposición final del material carbonoso en las plantas; según los procedimientos descritos en el Capítulo 2.

3.1. Capacidad de adsorción por espectrofotometría UV-VIS

En las *Figuras 10, 12, 14 y 16*, se presentan los espectros de absorción UV-Vis obtenidos a partir de las pruebas de adsorción (Software OriginPro versión 9.0).

3.1.1. Adsorción del colorante AM usando CAL y CAS

En la *Figura 10* se muestra el espectro de absorción UV-Vis para el AM usando CAL, para AM $\lambda_{\text{max}} = 605 \text{ nm}$ (Rosas, 2012) se reporta un R% de 99.83% para el primer ciclo de adsorción y un R% de 99.88% para el segundo ciclo. En la *Figura 11* se muestra de izquierda a derecha la solución inicial del AM a 50 ppm, seguido de las muestras finales del primer, segundo y tercer ciclo de uso del CAL, respectivamente. Se observa que CAL puede ser utilizado varias veces y mantener su capacidad de adsorción sin la necesidad de ser regenerado entre uno y otro ciclo de uso.

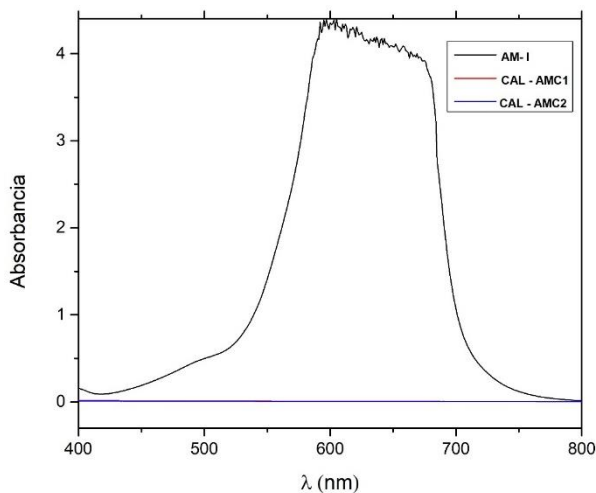


Figura 10. Espectrofotometría UV-Vis del colorante AM usando CAL



Figura 11. Resultado de las pruebas de adsorción CAL-AM

En la *Figura 12* se muestra el espectro de absorción *UV-Vis* para el AM usando CAS. Se reporta un R% de 99.73% para el primer ciclo de adsorción y un R% de 99.9% para el segundo ciclo. En la *Figura 13* se muestra de izquierda a derecha la solución inicial del AM a 50 ppm, seguido de las muestras finales del primer, segundo y tercer ciclo de uso del CAS, respectivamente. Se observa que, al igual que CAL, el CAS puede ser utilizado varias veces y mantener su capacidad de adsorción sin la necesidad de ser regenerado entre uno y otro ciclo de uso.

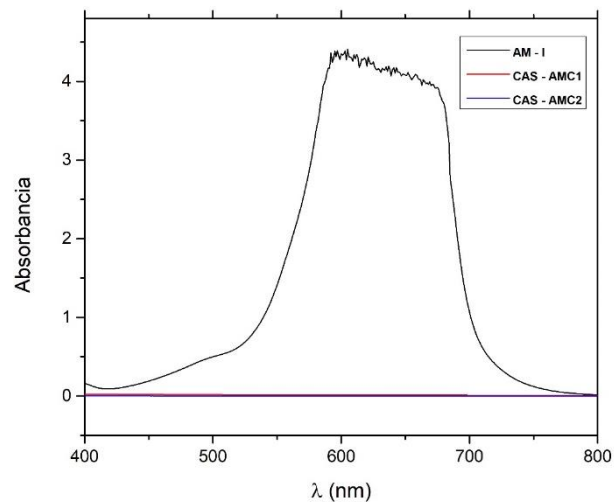


Figura 12. Espectrofotometría *UV-Vis* del colorante AM usando CAS



Figura 13. Resultado de las pruebas de adsorción CAS-AM

3.1.2. Adsorción del colorante NM usando CAL y CAS

En la *Figura 14* se muestra el espectro de absorción *UV-Vis* para el NM usando CAL, para NM $\lambda_{\max} = 466$ nm (Mandal *et al.*, 2009; Ramírez *et al.*, 2015), se reporta un R% de 94.45% para el primer ciclo de adsorción y un R% de 67.21% para el segundo ciclo. Se observa una menor disminución de color en el segundo ciclo de adsorción en comparación del primer ciclo. En la *Figura 15* se muestra de izquierda a derecha la solución inicial de NM a 50 ppm, seguido de las muestras finales del primer y segundo ciclo de uso del CAL, respectivamente. En este caso, se aprecia que el CAL presenta una menor capacidad de adsorción con el colorante NM, en comparación con el colorante AM; además se ve reducida la capacidad de adsorción en el segundo ciclo de uso.

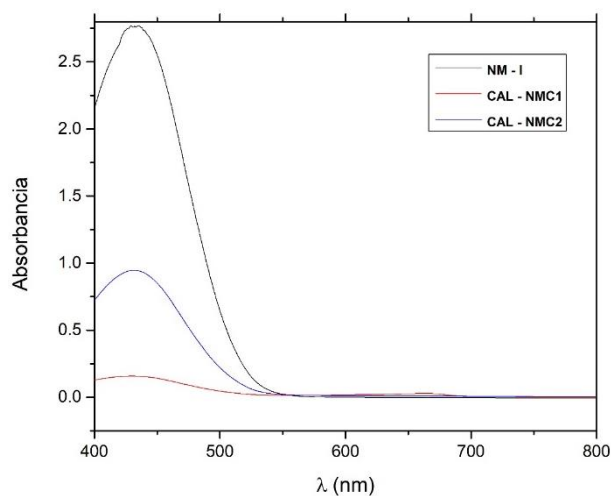


Figura 14. Espectrofotometría *UV-Vis* del colorante NM usando CAL



Figura 15. Resultado de las pruebas de adsorción CAL-NM

En la *Figura 16* se muestra el espectro de absorción *UV-Vis* para el NM usando CAS. Se reporta un R% de 45.2% para el primer ciclo de adsorción y un R% nulo para el segundo ciclo. Se observa una ligera reducción de la banda del espectro y de color en el primer ciclo, pero se aprecia una sobreposición de la banda correspondiente al segundo ciclo de adsorción con respecto al colorante NM inicial. En la *Figura 17* se muestra de izquierda a derecha la solución inicial de NM a 50 ppm, seguido de las muestras finales del primer y segundo ciclo de uso del CAS, respectivamente. En este caso, se aprecia que el CAS tiene una capacidad de adsorción poco favorable con este colorante, además esta se limita por completo en el segundo ciclo de uso.

Es posible asumir que el tamaño promedio de la molécula de NM es mayor a los diámetros promedios de poros que pudieran presentar CAL y CAS. Esto podría explicar la cinética de adsorción lenta del NM, ya que gran parte de la superficie interna del material poroso sería inaccesible. Mora (2010) obtuvo resultados similares al realizar pruebas de adsorción con Naranja Ácido 24 usando CA obtenido de madera de mezquite.

Por otro lado, también se puede asumir que, la capacidad de adsorción del colorante AM fue mayor en comparación con el colorante NM debido a la presencia de más sitios ácidos en la superficie de CAL y CAS, pues este tipo de sitios activos adsorben cationes (el AM es un colorante de naturaleza catiónica).

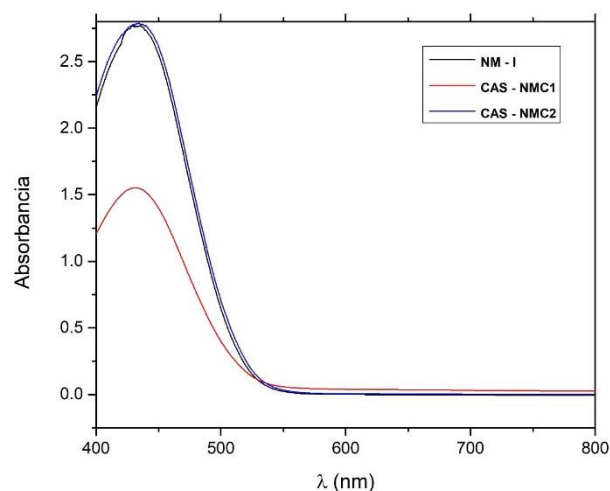


Figura 16. Espectrofotometría UV-Vis del colorante NM usando CAS



Figura 17. Resultado de las pruebas de adsorción CAS-NM

3.2. Identificación de grupos funcionales

En relación con el análisis de caracterización, de la *Figura 18* a *21* se muestran los espectros *FT-IR* de CAL y CAS usados en la adsorción de AM y NM. En estos se pueden apreciar bandas situadas entre 3750 y 3500 cm^{-1} que pueden relacionarse a vibraciones de grupos hidroxilos (de Piante *et al.*, 2018), el pico observado alrededor de 2880 cm^{-1} se pueden atribuir a vibraciones de estiramiento de $-\text{CH}_2-$ (Ensuncho *et al.*, 2015), alrededor de 2300 cm^{-1} se aprecia una banda que puede relacionarse a la tensión asimétrica de la molécula de CO_2 (Peña *et al.*, 2012), entre 1580 y 1570 cm^{-1} se observa una banda que puede corresponder a las vibraciones del enlace $\text{C}=\text{C}$ de los anillos aromáticos resultado de la

carbonización (Rosas 2012; Ensuncho *et al.*, 2015), las bandas obtenidas entre 1215 y 1200 cm^{-1} se puede relacionar con las vibraciones de los enlaces P=O, P-O-C, P-OOH (Martínez de Yuso, 2012) la presencia de estos enlaces se puede deber la uso del H_3PO_4 como agente activante. En el caso de la *Figura 20 y 21* se muestra una señal adicional entre 1715 y 1710 cm^{-1} que puede ser atribuida a vibraciones del enlace C=O al ácido carboxílico, cetonas, aldehídos o lactonas (Martínez de Yuso, 2012; Peña *et al.*, 2012; Rosas, 2012).

En las *Tablas 8 y 9* se muestra un resumen de las principales bandas identificadas a partir de la espectrofotometría *FT-IR*.

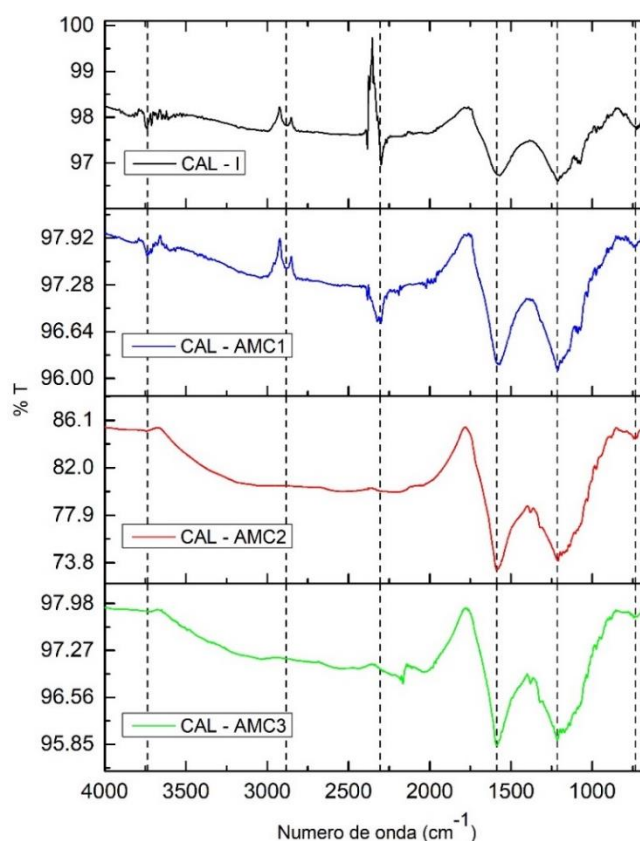


Figura 18. Espectrofotometría *FT-IR* de CAL antes y después de las pruebas de adsorción con el colorante AM

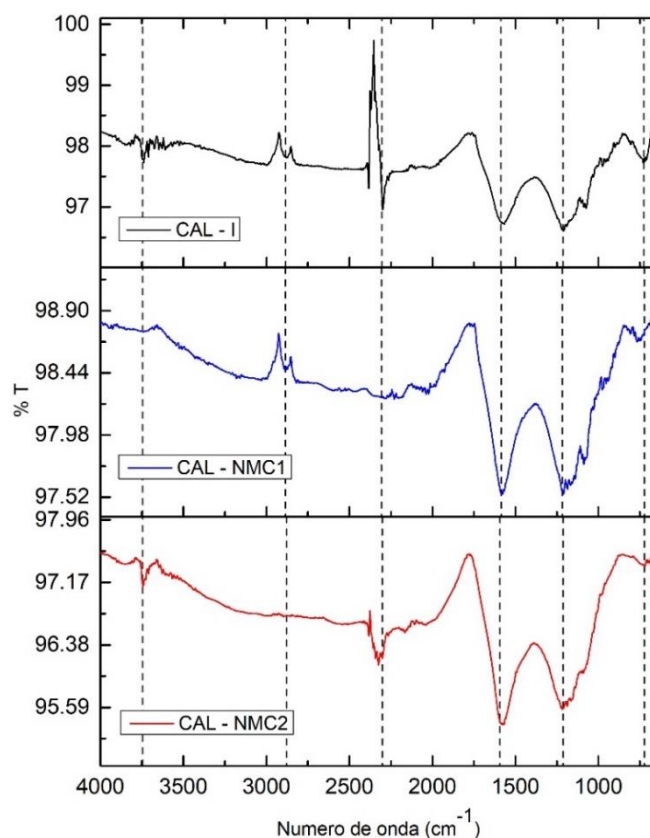


Figura 19. Espectrofotometría FT-IR de CAL antes y después de las pruebas de adsorción con el colorante NM

Tabla 8. Principales bandas vibracionales obtenidas a partir de la espectrofotometría FT-IR de CAL en los colorantes AM y NM

Grupo funcional	λ (cm ⁻¹)
Grupo hidroxilo (-OH)	3750 – 3500
-CH ₂ -	2880
Tensión asimétrica CO ₂	2300
C=C (anillos aromáticos)	1580 – 1570
P=O, P-O-C, P-OOH	1215 – 1200

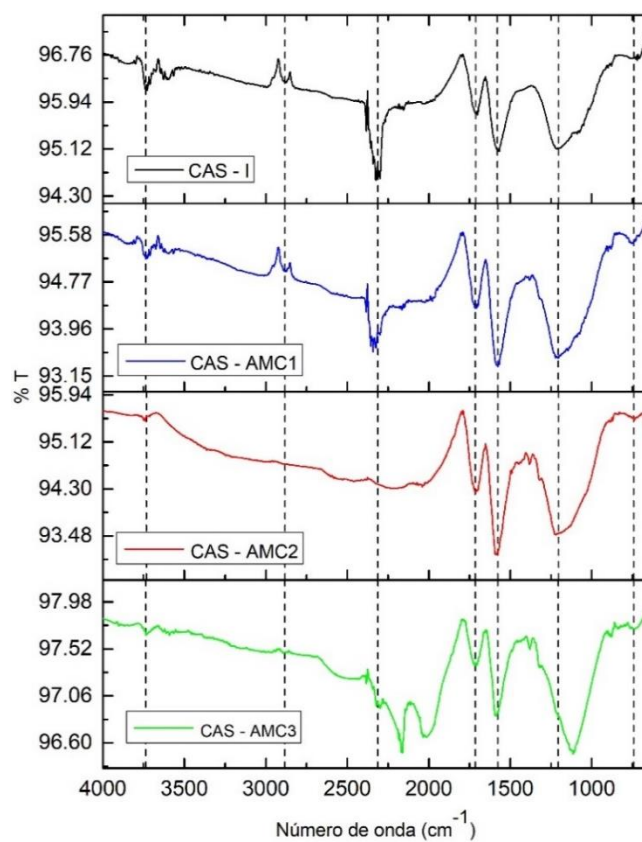


Figura 20. Espectrofotometría FT-IR de CAS antes y después de las pruebas de adsorción con el colorante AM

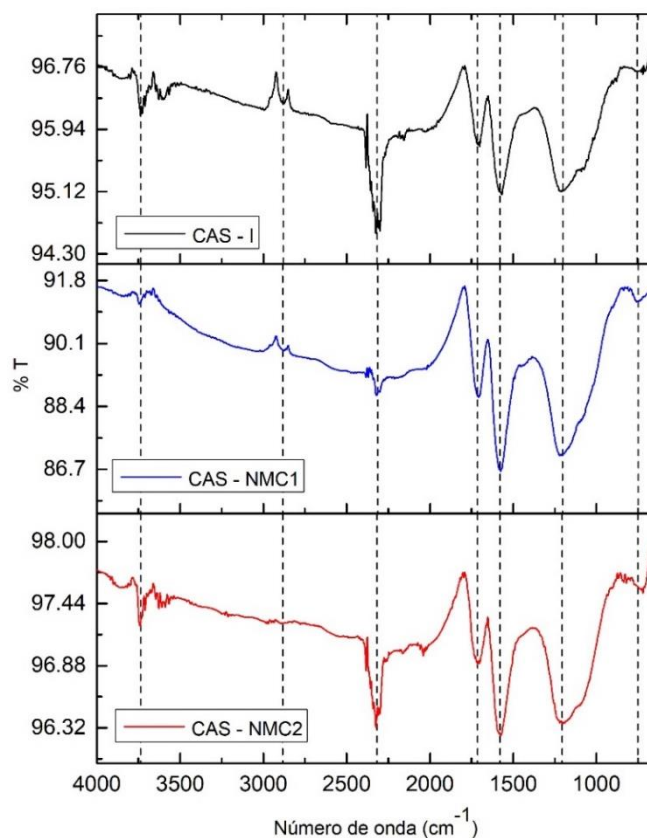


Figura 21. Espectrofotometría FT-IR de CAS antes y después de las pruebas de adsorción con el colorante NM

Tabla 9. Principales bandas vibracionales obtenidas a partir de la espectrofotometría FT-IR de CAS en los colorantes AM y NM

Grupo funcional	λ (cm ⁻¹)
Grupo hidroxilo (-OH)	3750 – 3500
-CH ₂ -	2880
Tensión asimétrica CO ₂	2300
C=O (ácidos carboxílicos, cetonas, aldehídos, lactonas)	1715 – 1710
C=C (anillos aromáticos)	1580 – 1570
P=O, P-O-C, P-OOH	1215 – 1200

Como se describió en la sección anterior, el CAL y el CAS tienen una mayor capacidad de adsorción sobre el colorante AM en comparación con el NM, asumiendo la presencia de más sitios ácidos en la superficie de ambos materiales carbonosos. Con respecto a la caracterización por espectrofotometría *FT-IR*, se muestran bandas alrededor de 3750 – 3500 cm^{-1} y 1715 – 1710 cm^{-1} correspondientes (según la literatura) a los grupos hidroxilos, cetonas o lactonas; quienes son los grupos funcionales responsables de la formación de sitios ácidos en la superficie de un material carbonoso. Esto podría ayudar a explicar la capacidad de adsorción de CAL y CAS sobre un colorante básico (como el AM) en comparación con un colorante ácido (como el NM).

Rosas (2012) menciona que el AM presenta señales por arriba de 1500 cm^{-1} relacionándolo con la presencia del grupo aromático, la banda a 1485 cm^{-1} puede relacionarse tanto al movimiento del enlace C=C como a la presencia del ion amonio; de igual forma, puede presentar bandas entre 857-801 cm^{-1} pudiendo asociarse al movimiento del enlace N-H y al enlace C-H de los anillos aromáticos. En los espectros *FT-IR* de CAL y CAS obtenidos después de las pruebas de adsorción con el AM no se observan señales de la banda descritas. No obstante, se aprecia un estiramiento de las bandas alrededor de 1500 cm^{-1} después de las pruebas de adsorción, esto puede relacionarse a la presencia de anillos aromáticos del AM en la superficie de CAL y CAS.

De acuerdo con Cruz (2015), el NM presenta bandas alrededor de 1420 cm^{-1} que corresponde al enlace azoico del colorante, entre 1050-1030 cm^{-1} y 1200-1140 cm^{-1} (Mora, 2010) corresponde a bandas del grupo sulfonato y las bandas asociadas a los anillos aromáticos se encuentran 1500 y 980 cm^{-1} . En los espectros *FT-IR* de CAL y CAS obtenidos después de las pruebas de adsorción con el NM no se observa señal de la banda correspondiente al enlace azoico. Sin embargo, se observa un estiramiento de las bandas alrededor de 1500 cm^{-1} y 1200 cm^{-1} por lo que se puede asociar, respectivamente, a la presencia de los anillos aromáticos y del grupo sulfonato del NM en la superficie de CAL y CAS.

3.3. Efecto del CA (posterior a la adsorción) en el desarrollo de la planta de cempasúchil (*Tagetes erecta*)

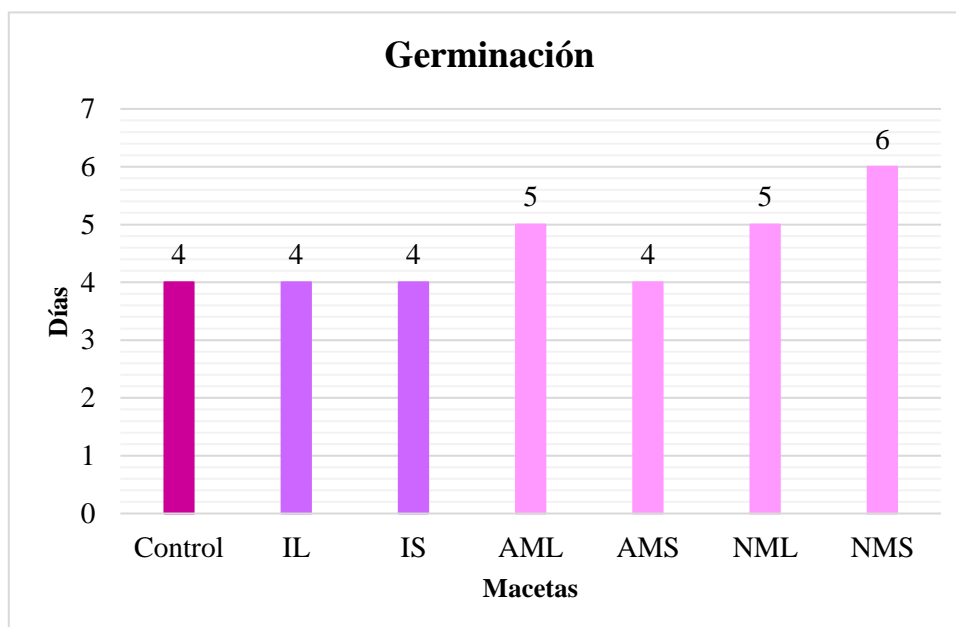
3.3.1. Tiempo de germinación de las semillas

La siembra de las semillas de cempasúchil (*Tagetes erecta*) se llevó a cabo en la segunda semana del mes de abril de 2021, el número de días hasta el inicio de la germinación fue determinadas mediante el conteo y la observación a partir de la primera semilla germinada (*Figura 22*).



Figura 22. Germinación de las semillas de cempasúchil (*Tagetes erecta*)

Se aprecia una diferencia en la prolongación de los días promedio de germinación en las macetas AML, NML y NMS (*Gráfica 1*). Estas tuvieron un promedio de 5 y 6 días de germinación respecto al control con 4 días; esto podría entenderse que el CA residual contenido en las macetas mencionadas influye en la prolongación del tiempo de germinación de las semillas, pero estadísticamente hablando esto no representó una diferencia significativa. Para las macetas IL e IS mostraron un promedio de 4 días de germinación con respecto al control con el mismo resultado, por lo que se puede asumir que el CA inicial no mostró influencia en la germinación de las semillas.



Gráfica 1. Días promedio de germinación de semillas

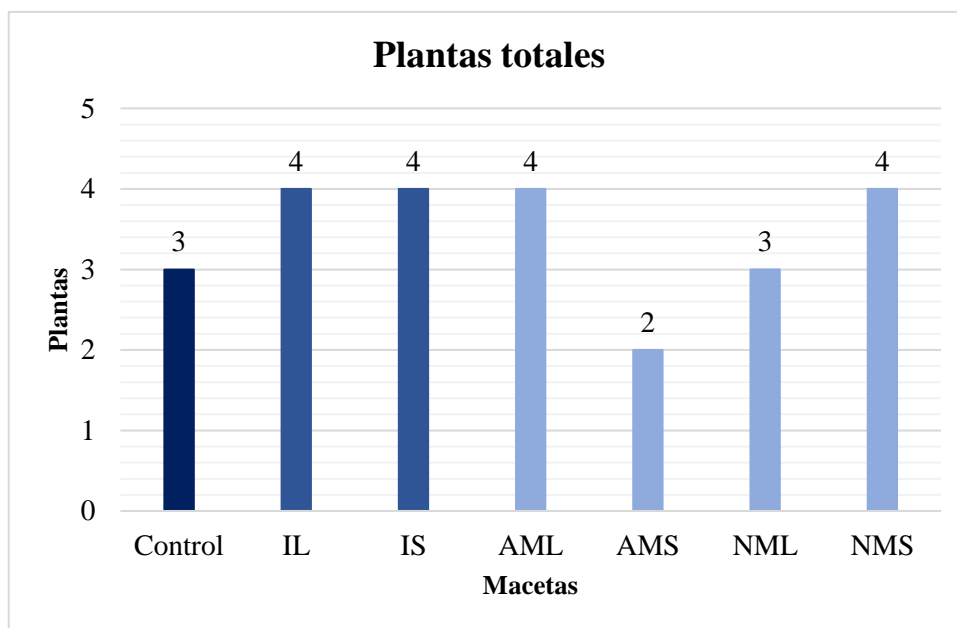
3.3.2. Plantas totales

En la *Figura 23* se muestra el ensayo en macetas previo a la germinación de las semillas. Como se mencionó en el apartado anterior, la germinación de las semillas inició a los 4 días de su siembra, obteniendo un total de plantas existentes por cada 4 semillas sembradas.



Figura 23. Ensayo en macetas

Como se observa en la *Gráfica 2* el número total de plantas existentes por maceta no representa una diferencia significativa con la presencia de CA inicial o CA residual. Sin embargo, se presentó un mayor número de plantas de compasúchil (*Tagetes erecta*) en los tratamientos que contienen CA inicial (IL e IS) y en los tratamientos que contienen CA residual (AML y NMS) en comparación con el control.



Gráfica 2. Plantas totales existentes

La influencia del CA inicial y residual no es clara en esta variable de la prueba experimental, a pesar de esto, no hay que pasar por alto el hecho de que el control de calidad de las semillas puede ser crucial en la obtención de una mayor cantidad de plantas totales y así obtener resultados más certeros. Para el ensayo experimental no se realizó una selección o un control de calidad de las semillas de compasúchil.

Ante esto, en 2020, Godínez argumentó que la longevidad de las semillas es de suma importancia para discriminar si una semilla se encuentra en buen estado (semilla viva) y poder utilizarla para siembra; no se reportan estudios específicos de longevidad en las semillas de compasúchil, pero vale la pena señalar que esto puede ser un factor que limite esta variable de estudio.

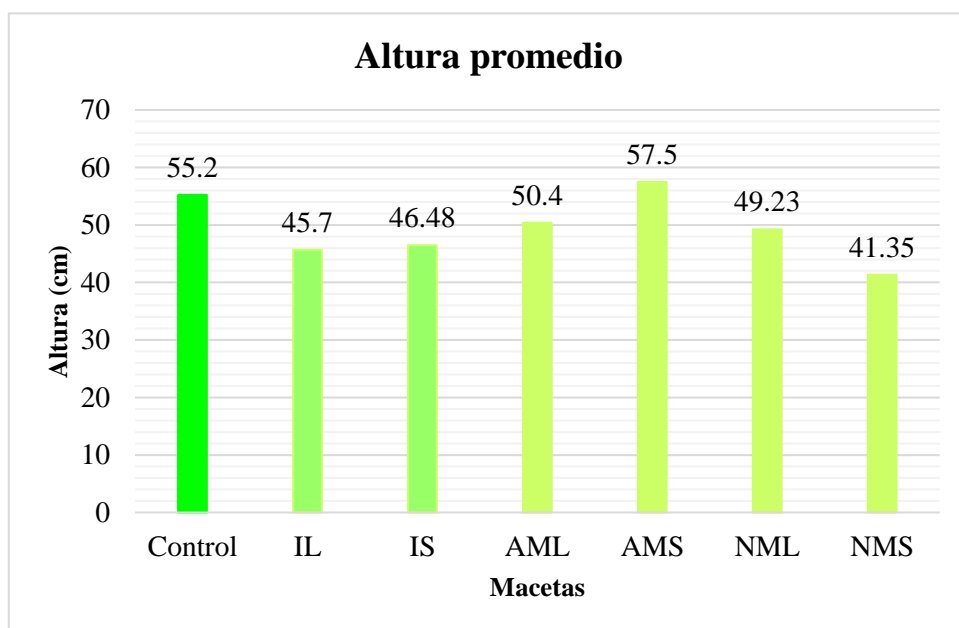
3.3.3. Altura promedio de las plantas

En cuanto al crecimiento de las plantas, no se mostraron diferencia en el desarrollo del tallo o las hojas respecto al control (*Figura 24*). La toma de altura se llevó a cabo cada 5 días iniciando en la tercera semana de la prueba experimental.



Figura 24. Desarrollo de la planta de cempasúchil (*Tagetes erecta*)

Con respecto a la altura promedio de las plantas, se reportaron diferencias sin ser significativas como se logra apreciar en la *Gráfica 3*. La maceta AMS que contiene CA residual mostró una altura promedio en sus plantas de 57.5 cm con respecto al control con una altura de 55.2 cm. En cuanto a las macetas IL e IS que contienen CA inicial arrojaron alturas promedio inferiores con respecto a la maceta control, 45.7 cm y 46.48 cm, respectivamente.



Gráfica 3. *Altura promedio de las plantas*

Pedrosa, (2009); Rodríguez, González, Alvarado y Telles (2007), explicaron que el uso de CA en medio de cultivo para la germinación *in vitro* de plantas puede actuar como inhibidor de crecimiento tras la adsorción de hormonas vegetales y vitaminas, así como de compuestos orgánicos e inorgánicos contenidos en el medio de cultivo o liberados por la misma planta.

Dicho lo anterior, se puede asumir que la cantidad de CA inicial añadida a las macetas IL e IS pudo actuar como un inhibidor de crecimiento al adsorber nutrientes presentes en el sustrato o de fitohormonas producidas por la planta. Esto último tiene sentido ya que la presencia de las fitohormonas en plantas pueden encontrarse en sus hojas, yemas en activo crecimiento, material adulto a nivel de fruto y sobre todo en raíces (Ramírez, 2019) siendo estas las responsables de procesos como elongación de raíces y hojas, crecimiento de la planta, floración, germinación, entre otros (Alcántara, Acero, Alcántara y Sánchez, 2019; Ramírez, 2019).

Vale la pena resaltar que la densidad de siembra, aunado con la exposición de la luz solar, puede influir en el desarrollo de la altura de las plantas. Vaca *et al.*, (2018) reportaron que el

desarrollo de las hojas en las plantas puede verse favorecido debido a la densidad de siembra (1 planta sembrada por contenedor), lo cual provee suficiente área de desarrollo de la planta, favoreciendo el aprovechamiento de la luz solar.

Como se describió en el diseño experimental, se sembraron dos semillas de cempasúchil (*Tagetes erecta*) por cada maceta, por lo que el espacio al interior de la maceta se ve reducida, y el aprovechamiento de la luz solar no sería de forma homogénea. Esto puede asumirse como un factor influyente en el desarrollo de la altura de las plantas.

3.3.4. Tiempo de floración de las plantas

El inicio de la floración de las plantas se contempló desde la aparición de la primera cabezuela (*Figura 25*). Esta etapa comenzó a presentarse en la semana 13 de la prueba experimental, no se mostraron variaciones en el color de los pétalos de cada flor en las diferentes macetas.



A

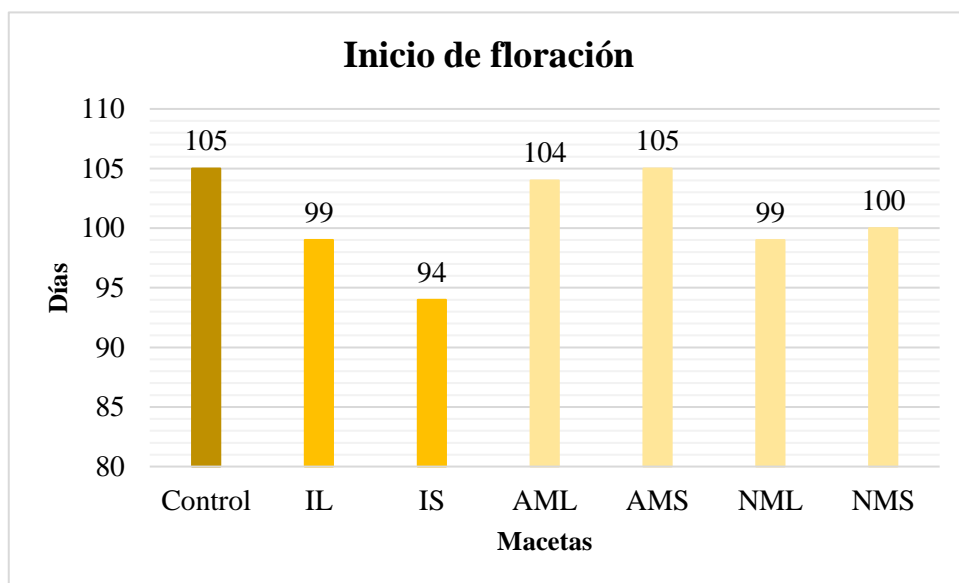


B



Figura 25. *Floración de la planta de cempasúchil (Tagetes erecta): A) Cabezuela, B) Aparición de pétalos, C) Flor completa*

Se aprecian diferencias en el número de días promedio (posterior a la fecha de siembra) en que les tomó a las plantas iniciar su etapa de floración, los resultados obtenidos no representan una diferencia significativa para las macetas con CA inicial y residual. Las plantas contenidas en la maceta IS (maceta con CA inicial) reportaron su inicio de floración a las 94 días posteriores a su fecha de siembra, en comparación con la maceta control que reportó 105 días; seguida de las macetas IL, NML y NMS que reportaron 99 y 100 días.



Gráfica 4. Tiempo promedio de inicio de floración

En el apartado anterior, se asumió que los reportes de alturas bajas de las plantas correspondientes a las macetas IL e IS tuvo que ver con que el CA inicial actuó como inhibidor de crecimiento al adsorber fitohormonas liberadas por la misma planta. Sin embargo, al reducirse el crecimiento de la planta se logra mejorar la floración de la misma al reducir la competencia entre crecimiento vegetativo y reproducción (Fichet, 2017). Esto podría explicar cómo IL e IS lograron iniciar su etapa de floración en un menor tiempo comparados con la maceta control.

Por otra parte, Vaca *et al.*, (2018) explican que los componentes orgánicos e inorgánicos, fitohormonas o sustancias inhibitorias previamente adsorbidas por el CA pueden ser liberados durante el desarrollo de la planta, proporcionando una fuente de enriquecimiento a largo plazo a las plantas y favoreciendo su desarrollo del mismo.

Desde el punto de vista de la calidad de suelo, algunos otros beneficios que podrían asociarse al agregar CA inicial en macetas son: retención de agua, nutrientes y mejoramiento textural del suelo (Herrera *et al.*, 2018).

A la fecha no se reportan estudios que propongan la disposición final del carbón activado residual en plantas de ornato; a pesar de que en cada variable (germinación, plantas totales, altura promedio y floración) se registraron diferencias en las macetas AML, AMS, NML y NMS con respecto al control estas no representaron diferencias significativas, por lo que se puede asumir que la cantidad de CA residual agregado en las macetas no es suficiente para que pueda influir de manera negativa en el desarrollo y crecimiento de las plantas de cempasúchil (*Tagetes erecta*).

CONCLUSIONES

En el presente trabajo de investigación se logró remover la concentración del colorante AM de la solución (50 ppm) en los tres ciclos de las pruebas de adsorción usando la misma muestra inicial de CAL y CAS en cada uno de los ciclos posteriores. Los resultados obtenidos nos pueden ayudar a estimar la vida útil de nuestros materiales porosos para así adaptarlo a un sistema de tratamiento de aguas residuales. En este sentido, la capacidad de adsorción del colorante AM se puede deber a una mayor presencia de sitios ácidos sobre la superficie de CAL y CAS.

Se puede asumir que CAL y CAS no presentan tamaño de poros adecuado para lograr remover la concentración del colorante NM (50 ppm), pues se podría interpretar que el tamaño promedio de la molécula del colorante mencionado es mayor en comparación con la porosidad de estos materiales adsorbentes; desaprovechando gran parte de la superficie interna de CAL y CAS. Dicho lo anterior, se puede recomendar el aumentar del diámetro promedio de poros a partir de incrementar el tiempo de contacto de los residuos orgánicos con el agente activante, aumentar la concentración del agente activante o incrementar el tiempo de carbonización de las cáscaras de limón y serrín; de tal forma que las moléculas de los colorantes tengan mejor acceso al área superficial interna de CAL y CAS, y aunado a eso, observar cinéticas de adsorción inicial más altas.

En el análisis a partir de espectrofotometría *FT-IR* se aprecian los estiramientos de las bandas alrededor de 1200 cm^{-1} y 1500 cm^{-1} después de usar CAL y CAS en las pruebas de adsorción, esto puede indicar que los adsorbatos (AM y NM) se adsorben en la superficie de los adsorbentes (CAL y CAS). Los picos alrededor de $3750 - 3500\text{ cm}^{-1}$ y $1715 - 1710\text{ cm}^{-1}$ en los espectros *FT-IR* se pueden relacionar con vibraciones de grupos funcionales responsables de la formación de sitios ácidos en la superficie de CAL y CAS.

Los resultados obtenidos sugieren que CAL y CAS pueden reflejar competitividad para la adsorción de colorantes en soluciones acuosas, ya que la obtención de estos materiales carbonosos se da a temperaturas bajas y también al observar buenos resultados de adsorción a temperatura ambiente.

Al utilizar residuos orgánicos como materia prima para la obtención de CA, no solo refleja la propuesta de un adsorbente de bajo costo, sino que al mismo tiempo resuelve un problema local en materia de disposición final de residuos orgánicos generados. Dicho lo anterior, el uso de cáscaras de limón y de serrín (residuos generados en el municipio de San Salvador el Verde, Puebla) reflejan una opción viable para la obtención de CA, ya que cumplen con la finalidad de aprovechamiento y revaloración de estos residuos orgánicos para reducir el impacto negativo al ambiente.

Se recomienda realizar: pruebas de análisis elemental, análisis termogravimétrico (TGA), fisisorción de nitrógeno, punto de carga cero, microscopia electrónica de barrido, determinaciones con titulaciones potenciométricas y pruebas de desorción para complementar el trabajo de investigación y poder determinar: porcentaje de carbón presente en la materia prima, condiciones de operación más eficientes para preparación del carbón activado, entender la interacción del adsorbente en la solución con colorante, cuantificar el área superficial y el tamaño de poro de los materiales adsorbentes así como remover los colorantes de CAL y CAS para determinar si estos materiales adsorbentes pueden ser reutilizados en nuevas pruebas de adsorción.

En cuanto a la influencia del CA inicial y residual en el crecimiento, la germinación y el desarrollo de las semillas de cempasúchil (*Tagetes erecta*), las diferencias no son tan evidentes; el CA inicial mostró indicios de influencia en las variables de “altura promedio” y “inicio de floración”. No se mostró una influencia significativa en la variable de “días promedio de germinación” y en cuanto a la variable “plantas totales” se recomienda, a partir de una muestra representativa, realizar una prueba de germinación de las semillas de cempasúchil (*Tagetes erecta*), para determinar si las semillas a utilizar se encuentran en buen estado (semillas vivas o de buena calidad), todo esto previo al análisis de la disposición final del CA residual en plantas, al igual que darles un pretratamiento a las semillas antes de su siembra, por ejemplo, lavados con agua destilada.

Se sugiere tomar en cuenta la caracterización del suelo que se usa en el ensayo experimental en plantas para determinar: la disponibilidad y la capacidad de retención de

nutrientes, la capacidad de retención de agua para las plantas, la velocidad de entrada del agua, aireación, entre otros.

Se recomienda realizar nuevos estudios para clarificar los posibles efectos que podría provocar el CA inicial o residual en las diferentes etapas de desarrollo de las plantas. Algunas otras variables por considerar para el ensayo experimental son: el diámetro del tallo (mm), el número de hojas por planta, la longitud de las hojas (cm), la longitud de raíz (cm), la masa de raíz (g), la masa de la parte aérea de la planta (g) y la masa seca de parte aérea de la planta (g). Bajo este esquema se puede establecer la propuesta de un protocolo de disposición final de CA usado en adsorción de colorantes textiles en solución acuosa o de otros contaminantes adsorbidos.

REFERENCIAS

- Ahuatzin, O. E. (2019). *Toxicidad del agua contaminada por colorantes textiles y pentaclorofenol al ser tratados con enterobacterias*. (Tesis de maestría). Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, México.
- Alcántara, J. S., Acero, J., Alcántara, J. D., & Sánchez, R. M. (2019). *Principales reguladores hormonales y sus interacciones en el crecimiento vegetal*. NOVA, 17(32), 109-129.
- Alonso, A. I. A. (2014). *Remoción de fenol, 2-clorofenol y colorantes textiles utilizando un concentrado de peroxidasas de chayote (Sechium edule SW)*. (Tesis de doctorado). Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, México.
- Atkins, P. W. (1998). *Química Física*. Reino Unido: Omega, Sexta Edición.
- Aviña, I. (2018). *Estudio de la remoción de compuestos que inhiben la producción de biohidrógeno por medio de materiales a base de carbono*. (Tesis de maestría). Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A. C. San Luis Potosí.
- Barrera, R. A. (2015). *Estudio cromatográfico de la adsorción de CO₂ y CH₄ en clinoptilolita y carbón de cáscara de nuez modificados con calcio*. (Tesis de licenciatura). Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, México.
- Brañez, M., Gutiérrez, R., Pérez, R. Uribe, C. & Valle, P. (2018). *Contaminación de los ambientes acuáticos generados por la industria textil*. Escuela universitaria de posgrados UNFV, Lima, Perú, 23(26), 129-144.
- Castellar, G., Angulo, E., Zambrano, A., & Charris, D. (2013). *Equilibrio de adsorción del colorante azul de metileno sobre carbón activado*. Rev. U.D.C.A. Act. & Div. Cient., 16(1), 263-271.
- Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos. Publicada la última reforma en el Diario Oficial de la Federación el 11 de marzo de 2021. Recuperado el 15 de

marzo de 2021 a partir de
http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/1_110321.pdf

- Cortes, J. C., Giraldo, L., García, A. A., García, C. y Moreno, J. C. (2008). *Oxidación de un carbón activado comercial y caracterización del contenido de grupos ácidos superficiales*. Revista colombiana de química, 37(1), 55-65.
- Cruz, G. (2015). *Comportamiento de Naranja de Metilo y Naranja 10 (Orange G) en presencia de compuestos tipo hidrotalcita de Mg/Al y Mg/Fe²⁺*. (Tesis de licenciatura) Universidad Nacional Autónoma de México, CDMX, México.
- Daoud, M., Benturki, O., Girods, P., Donnot, A., & Fontana, S. (2019). *Adsorption ability of activated carbons from Phoenix dactylifera rachis and Ziziphus jujube stones for the removal of commercial dye and the treatment of dyestuff wastewater*. Microchemical Journal, 148(2019), 493-502.
- De Piante, C., Húmpola, P., Odetti, H., Fonseca, R., Moreno, J. C., & Giraldo L. (2018). *Preparación, caracterización y estudios texturales de carbones activados obtenidos a partir de yerba mate y su utilización para la remoción de fenol y Cr (III) en solución acuosa*. Afinidad LXXV, 582, 106-111.
- Ensuncho, A. E., Robles, J. R. & Carriazo, J. G. (2015). *Adsorción del colorante amarillo anaranjado en solución acuosa utilizando carbones activados obtenidos a partir de desechos agrícolas*. Rev. Soc. Quím. Perú, 81(2), 135-147.
- Fichet, L.T. (2017). *Biosíntesis de las Fitohormonas y Modo de Acción de los Reguladores de Crecimiento*. Serie Nutrición Vegetal Núm. 92. Artículos Técnicos de INTAGRI. México. 6 p.
- Godínez, H. (2020). *¿Cuántos años viven las semillas? La longevidad ecológica y potencial*. Elementos 120, 31-35. Recuperado el 04 de abril de 2021 a partir de <https://elementos.buap.mx/post.php?id=636>

- Gómez, E. (2020). *Eliminación de colorantes textiles utilizando carbones activados preparados a partir de semilla de chirimoya*. (Tesis de licenciatura). Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, México.
- Hernández, M. E. (2014). *Elaboración de un catálogo de tonos estandarizados teñidos por procesos discontinuos, con colorantes para algodón 100%, para el Laboratorio de Acabados Textiles del colegio de Ingeniería Textil*. (Tesis de licenciatura). Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, México.
- Herrera, E. L., Feijoo, C. Y., Alfaro, R., Solís, J. L., Gómez, M. M., Keiski, R. L., & Cruz, G.J. F. (2018). *Producción de biocarbón a partir de biomasa residual y su uso en la germinación y crecimiento en vivero de Capparis scabrada (Sapote)*. *Scientia Agropecuaria*, 9(4), 569-577.
- Ley de Aguas Nacionales. Publicada la última reforma en el Diario Oficial de la Federación el 06 de enero de 2020. Recuperada el 15 de marzo de 2021 a partir de http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/16_060120.pdf
- Luna, D., González, A., Gordon, M., & Martín, N. (2007). *Obtención de carbón activado a partir de la cáscara de coco*. *ContactoS*, 64, 39-48.
- Mandal, S., Tichit, D., Lerner, D. A., Marcotte, N. (2009). *Azoic Dye Hosted in Layered Double Hydroxide: Physicochemical Characterization of the Intercalated Materials*. *Langmuir Article*, 25(18), 10980-10986.
- Marcano, D. (2018). *Introducción a la Química de los colorantes*. *Colección Divulgación Científica y Tecnológica*. Academia de Ciencias Físicas, Matemáticas y Naturales, Caracas, Venezuela. 254 p.
- Martínez, L. A. (2018). *Evaluación de cal hidratada comercial para la adsorción del colorante índigo carmín*. (Tesis de licenciatura). Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, México.

- Martínez de Yuso, A. (2012). *Desarrollo de carbones activados a partir de residuos lignocelulósicos para la adsorción y recuperación de tolueno y n-hexano*. (Tesis de doctorado). Universidad de San Jorge, Villanueva de gallego, España.
- Miranda, E. V. (2018). *Tratamiento de aguas residuales provenientes de la industria textil utilizando peroxidasas del frijol de soya*. (Tesis de doctorado). Universidad Nacional Autónoma de México, CDMX, México.
- Mora, M. A. (2010). *Remoción de colorantes de disoluciones acuosas por adsorción mediante el uso de adsorbentes producidos a partir de leña de mezquite*. (Tesis de maestría). Universidad Autónoma de Nuevo León, Monterrey.
- Navarrete, D. F., Quijano, N. R., & Vélez, C. D. (2014). *Elaboración de carbón activado a partir de materiales no convencionales, para ser usado como medio filtrante*. (Tesis de licenciatura). Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, Ecuador.
- Obregón, J. P. (2016). *Comparación de los distintos tratamientos para la obtención de carbón activado a nivel laboratorio a partir del endocarpio del coco (Cocos nucifera), con base en el índice de yodo*. (Tesis de licenciatura). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.
- Organización de las Naciones Unidas, ONU. (2015). *Objetivos de desarrollo sostenible: 17 objetivos para transformar nuestro mundo*. Recuperado el 14 de marzo de 2021 a partir de https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/wp-content/uploads/sites/3/2016/10/6_Spanish_Why_it_Matters.pdf
- Pedraza, M. S. (2014). *Biodegradación de compuestos "azo" en condiciones reductoras por bacterias aisladas de lixiviados, aguas residuales y lodos activados*. (Tesis de maestría). Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, México.
- Pedroza, J. A. (2009). *Efecto del carbón activado, ácido indolacético (AIA) y bencil amino purina (BAP) en el desarrollo de protocormos de Epidendrum elongatum*

- Jacq* bajo condiciones *in vitro* bajo condiciones *in vitro*. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 11(1), 17-32.
- Peña, K. J., Giraldo, L. & Moreno, J. C. (2012). *Preparación de carbón activado a partir de cáscara de naranja por activación química, caracterización física y química*. *Revista Colombiana de Química*, 41(2), 311-323.
- Perez, G. (2019). *Calidad del agua del río Atoyac en el valle de Puebla y el riesgo en la salud de la población Emilio Portes Gil, municipio de Ocoyucan, Puebla*. (Tesis de doctorado). Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, México.
- Ramírez, I. G, & de Jesús, E. (2017). *Adsorbentes y Materiales Utilizados para Filtración y Reducción de Contaminantes en Aguas Potables*. *Revista Ciencia, Innovación y Tecnología (RCIYT)*, (3), 51-61.
- Ramírez, L. A., Jacobo, A., & Martínez, J. M. (2015). *Adsorción del naranja de metilo en solución acuosa sobre hidróxidos dobles laminares*. *Acta Universitaria*, 25(4), 25-34.
- Ramírez, L. (2019). *Evaluación de extractos vegetales con efecto en el desarrollo de plántulas de lechuga (Lactuca sativa L)*. (Tesis de licenciatura). Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Saltillo Coahuila.
- Rodríguez, L., González, R., Alvarado K., & Telles, E. (2007). *Germinación asimbiótica in vitro de semillas de orquídeas silvestres*. *Biotecnología Vegetal*, 7(3), 139-142.
- Rosas, J. M. (2012). *Aplicación de residuos agrícolas para el tratamiento de agua contaminada con colorantes*. (Tesis de maestría). Universidad Autónoma de Nuevo León, Monterrey, México.
- Solís, J. A., Morales, M., Ayala, R. C. & Durán, M. C. (2012). *Obtención de carbón activado a partir de residuos agroindustriales y su evaluación en la remoción de color del jugo de caña*. *Tecnología, ciencia y educación*, 27(1), 36-48.

- Vaca, I., Marulanda, M., Verdesoto, J., Núñez, A., Acurio, R. D., & Chiluisa-Utreras, V. (2018). *Efecto del carbón activado en la germinación y brotación in vitro de Citrus limon (L.) y su dinámica de crecimiento*. Revista Bionatura, 3(3), 657-664. DOI: 10.21931/RB/2018.03.03.5
- Valladares, M. G., Valerio, C., de la Cruz, P. & Melgoza R. M. (2016). *Adsorbentes no-convencionales, alternativas sustentables para el tratamiento de aguas residuales*. Revista Ingenierías Universidad de Medellín, 16(31), 55-73. DOI: 10.22395/riium.v16n31a3
- Villada, Y. A., Hormaza, A., & Casis, N. (2014). *Uso de la cáscara de arroz para la remoción de azul de metileno en columnas de lecho empacado*. Tecno Lógicas, 17(3), 43-54.
- Zaruma, P. E., Proal, J. B., Chaires, I. & Salas, H. I. (2018). *Los colorantes textiles industriales y tratamientos óptimos de sus efluentes de agua residual: una breve revisión*. Revista de la Facultad de Ciencias Químicas, ISSN: 1390-1869(19), 38-47.

ANEXOS

- Los resultados de este trabajo de investigación se han presentado en los tres eventos (nacionales e internacionales):

V Congreso Nacional de Tecnología y Ciencias Ambientales en modalidad virtual; realizado en Cd. Obregón Sonora del 20 al 23 de octubre de 2020.



El Departamento de Ciencias del Agua y Medio Ambiente del Instituto Tecnológico de Sonora, a través de sus Programas Educativos de Ingeniero en Ciencias Ambientales e Ingeniero Químico, en conjunto con los Cuerpos Académicos de Ciencias Ambientales y Tratamiento de Aguas



OTORGA LA PRESENTE
CONSTANCIA

A:
G. Pérez-Osorio, I. Macías-Juárez, J.E. Moisés Gutiérrez-Arias y J.C. Mendoza-Hernández

Por su presentación titulada:
Adsorción de colorantes textiles en agua mediante carbón activado (CA) obtenido de serrín y cáscara de limón en el V Congreso Nacional de Tecnología y Ciencias Ambientales en Modalidad Virtual

Cd. Obregón Sonora, 20, 21, 22 y 23 de octubre de 2020


Dra. Nidia Josefina Ríos Vázquez
Presidenta del Comité Científico del V Congreso Nacional de Tecnología y Ciencias Ambientales


Mtro. David Heberto Encinas Yepis
Coordinador General del V Congreso Nacional de Tecnología y Ciencias Ambientales

FOLIO VCNTCA-PO-003

III Congreso Internacional de Ríos y Humedales “La sostenibilidad tejida a través del agua” en modalidad virtual; realizado en Barranquilla, Colombia del 25 al 29 de octubre de 2021.

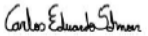


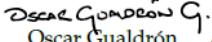
**III Congreso Internacional
de Ríos y Humedales**
La Sostenibilidad Tejida a través del Agua

Organizadores




Se certifica que Ismael Macías Juárez participó en calidad de **Presentación de póster** en el III Congreso Internacional de Ríos y Humedales, desarrollado de manera virtual del 25 al 29 de octubre de 2021.


Carlos Schnorr
Decano Departamento de CNYE
Universidad de la Costa


Oscar Gualdrón
Subdirector SDI
Instituto Humboldt


Ana C. Santos-R
Coordinadora
REDECOHH


John J. Ramirez
Profesor Asociado
Mississippi State University

1er. Foro de Adsorción en México; realizado en Monterrey, N.L., por la Asociación Mexicana de Adsorción el 10 de diciembre de 2021.



Asociación Mexicana de Adsorción

Otorga el presente reconocimiento a:

**G. Pérez Osorio, I. Macías Juárez,
J.E.M. Gutiérrez Arias, A. Sampieri Croda,
J. Arriola Morales**

Por su participación con el trabajo titulado:

**“Aplicación de Carbón Activado Proveniente de Residuos Orgánicos
para el Tratamiento de Aguas Contaminadas con Colorantes”**

Primer Foro de Adsorción en México

10 de diciembre 2021

Dra. Nancy Dávila Guzmán
Presidenta

Dr. Jacob J. Salazar Rábago
Secretario General



BUAP



UANL



Anton Paar



Anyover
INSTRUMENTACIÓN DINÁMICA



UASLP
Universidad Autónoma
de San Luis Potosí



**Universidad
Autónoma
de Coahuila**

- De igual forma, los resultados del trabajo de investigación se publicaron en la revista Brazilian Journal of Animal and Environmental Research (BJAER), <https://brazilianjournals.com/ojs/index.php/BJAER/article/view/39117/29578>



Brazilian Journal of Animal and Environmental Research

DECLARAÇÃO DE PUBLICAÇÃO

Declaramos, para os devidos fins, que o artigo “Adsorción de colorantes textiles en agua mediante carbón activado obtenido de serrín y cáscara de limón” de Gabriela Pérez Osonio, Ismael Macias Juárez, José Eligio Moisés Gutiérrez Arias, Álvaro Sampieri Croda, Janette Arriola Morales, foi publicado no Brazilian Journal of Animal and Environment Research, ISSN 2595-573, v.4, n.4, p. 5703-5714, out./dez. 2021.

A revista é on-line, e os artigos podem ser encontrados ao acessar o link: <https://www.brazilianjournals.com/index.php/BJAER/issue/view/147>.

DOI: <https://doi.org/10.34188/bjaerv4n4-067>

Por ser a expressão da verdade, firmamos a presente declaração.

São José dos Pinhais, 10 de Novembro de 2021.



Prof. Dra. Dariane Cristina Catapan
Editora-Chefe