



**Universidad Autónoma del Estado De México**  
**Facultad de Planeación Urbana y Regional**

**“Remoción del colorante Azul de Metileno  
empleando residuos de té verde”**

**TESIS**

**Para obtener el grado de Licenciada en Ciencias Ambientales**

**PRESENTA**

**Carolina Garduño Urbina**

**DIRECTOR DE TESIS**

**Dr. En C.A. Eduardo Campos Medina**

**Toluca, Estado de México, Marzo 2019**

## **INDICE**

Resumen.....	5
Introducción .....	6
Planteamiento del problema .....	9
Objetivo general.....	11
Objetivos específicos.....	11
Hipótesis.....	11
Justificación .....	12
Antecedentes .....	13
<b>CAPÍTULO 1 .....</b>	<b>15</b>
<b>CONTAMINACIÓN DEL AGUA .....</b>	<b>15</b>
1.1 Contaminación .....	16
1.2. Contaminación de agua.....	17
1.3 Principales contaminantes del agua .....	18
1.4 Contaminantes inorgánicos .....	19
1.5 Contaminantes orgánicos.....	21
1.6 Colorantes.....	22
1.7 Colorante Azul de Metileno.....	25
<b>CAPÍTULO 2 .....</b>	<b>27</b>
<b>MÉTODOS DE TRATAMIENTO PARA REMOVER COLORANTES .....</b>	<b>27</b>
2.1. Tratamientos físicos .....	28
2.2. Tratamientos químicos .....	29
2.3. Tratamientos biológicos.....	32
2.4. Tratamientos combinados .....	34
2.5 Tecnologías utilizadas para remover el colorante Azul de Metileno.....	35
2.5.1 Coagulación-floculación.....	36
2.5.2 Adsorción con carbón activado .....	36
2.5.3 Tecnologías de membrana .....	37
2.6 Métodos de tratamiento para remover colorantes.....	38
2.6.1 Oxidación catalítica .....	39
2.6.2 Filtración de Membrana.....	40
2.7 Adsorción .....	41
2.7.1 Adsorción física .....	42

2.7.2 Adsorción química .....	43
2.8 Acerca del adsorbente.....	44
<b>CAPÍTULO 3 .....</b>	<b>46</b>
<b>BIOSORCIÓN EN LA REMOCIÓN DE CONTAMINANTES, MODELOS TEÓRICOS Y VARIABLES QUE LA AFECTAN .....</b>	<b>46</b>
3.1.- Biosorción .....	47
3.2 Materiales empleados, para remover contaminantes.....	48
3.3 Casos de estudio para colorantes .....	51
3.4. Isoterma de adsorción .....	53
3.4.1 Modelo de Langmuir .....	53
3.4.2 Modelo de Freundlich .....	54
3.5 Factores que afectan el proceso de adsorción .....	54
3.5.1 Influencia del pH en la adsorción.....	54
3.5.2 Influencia de la temperatura en la adsorción .....	55
3.5.3 Concentración del sorbato .....	55
<b>CAPÍTULO 4 .....</b>	<b>57</b>
<b>METODOLOGÍA EXPERIMENTAL .....</b>	<b>57</b>
4.1 Métodos y materiales .....	58
4.2 Preparación de biomaterial a emplearse de manera natural y con tratamiento químico .....	58
4.2.1 Secado.....	59
4.2.2 Tamizado .....	59
4.3 Soluciones sintéticas del colorante.....	59
4.4 Fenómeno de Adsorción .....	59
4.4.1 Tiempo de contacto .....	59
4.4.2 Determinación de remoción de colorante .....	59
4.5 Estudio de las Isotermas .....	60
4.5.1 Modelo de la isoterma de Langmuir.....	60
4.5.2 Modelo de la isoterma de Freundlich .....	60
4.6. Determinación de la DQO .....	61
4.7. Normas Oficiales Mexicanas .....	61
<b>CAPÍTULO 5 .....</b>	<b>63</b>
<b>RESULTADOS .....</b>	<b>63</b>

5.1 Resultados del tratamiento del biomaterial .....	64
5.2 Espectros de remoción del colorante Azul de Metileno.....	64
5.3. Determinación del porcentaje de remoción después del contacto .....	68
5.4 Análisis de isothermas de Langmuir y Freundlich.....	72
5.6.- Resultados de la Demanda Química de Oxígeno.....	78
CONCLUSIONES.....	82
REFERENCIAS.....	83

## **Resumen**

En la actualidad uno de los principales problemas ambientales que ha generado el hombre con sus actividades cotidianas es la contaminación del agua. Dicho proceso se lleva a cabo por verter sustancias químicas tanto orgánicas como inorgánicas de proceso industriales a cuerpos acuíferos. El efecto negativo se maximiza cuando dicha agua es reutilizada para tareas de riego y algunas veces para consumo de animales. Las repercusiones obviamente son nocivas tanto para el ambiente como para los seres vivos. Por lo cual en el ámbito científico se han buscado desarrollar métodos o alternativas de solución que remuevan estos contaminantes, estas técnicas han sido muy variadas desde los llamados tratamientos químicos hasta los avanzados llamados de oxidación electroquímica.

Sin embargo, en los últimos años se han desarrollado otras alternativas que pretenden ser más amigables con el ambiente y además ser económicas. Estos son llamados proceso de biosorción empleando materiales orgánicos de desecho.

Con base en lo anterior esta investigación tuvo como principal objetivo proponer el empleo de un residuo orgánico que es empleado en cualquier lugar relacionado con las actividades antrópicas, el cual es el residuo de té.

Este material es considerado como residuo sólido y su destino final es normalmente la basura doméstica, para estudiar la remoción del colorante Azul de Metileno en solución acuosa. Ya que este compuesto es muy utilizado en diversos procesos químicos que lo utilizan como materia prima y que a su vez los residuos de este son vertidos al agua residual de dicho proceso. Y a su vez este contaminante representa una amenaza al ser humano y al medio ambiente debido a su persistencia por este motivo debe ser removido o degradado a niveles aceptables antes de ser descargados a los cuerpos de agua.

El tratamiento planteado consistió en un proceso de adsorción la cual representa como se ha mencionado previamente una alternativa prometedora. El biomaterial fue recolectado, tratado químicamente, tamizado y posteriormente puesto en pequeñas porciones en volúmenes del colorante a diferentes concentraciones. Esto con la finalidad de establecer que sucede a diferentes concentraciones del contaminante.

Posteriormente después de los tiempos de contacto se realizaron las respectivas filtraciones, se calcularon los porcentajes de remoción empleando la técnica de espectrometría de ultravioleta y se cuantificaron los valores de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) para establecer como se comportó el tratamiento en función de una variable de calidad del agua.

Finalmente, se calcularon las isotermas de adsorción de los modelos de Langmuir y Freundlich para explicar cómo se rigió la biosorción en la fase experimental. El modelo que mejor se ajustó la adsorción fue la isoterma de Freundlich con un coeficiente de correlación de  $r = 0.9908$  y para la isoterma de Langmuir la mejor adsorción obtenida fue un coeficiente de  $r = 0.9394$ .

### **Introducción**

Como se ha mencionado el proceso de contaminación del agua, se realiza por el vertido de sustancias químicas empleadas como materias primas en proceso industriales, en este caso de la investigación se pone especial interés a la contaminación por los compuestos azoicos que normalmente son llamados colorantes y que a continuación se amplían.

### **Contaminación por colorantes**

Desde las primeras civilizaciones el hombre usó materias colorantes naturales. Los pigmentos o sustancias coloreadas se extraían de plantas, animales y minerales. Estas materias eran empleadas para teñir ropas, pintar las pieles y fabricar objetos religiosos y recreativos. Se da este nombre a sustancias coloreadas, las cuales son capaces de teñir las fibras vegetales y animales. Para que un colorante sea útil, debe ser capaz de unirse fuertemente a la fibra, y por lavado no debe perder su color. Debe ser químicamente estable y soportar la acción de la luz.

Los colorantes pueden clasificarse como:

- a) Directos: Aquellos que se absorben directamente por las fibras en soluciones acuosas.
- b) Sustantivos: Tiñen directamente las fibras de algodón.

c) Mordientes: Producto que se adiciona a la fibra y se absorbe a ella.  
(Alamillo Lopez, 2013).

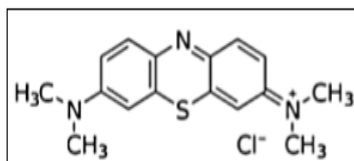
Los colorantes sintéticos son compuestos químicos xenobióticos, los cuales no se encuentran en forma natural en la biosfera, sino que han sido sintetizados por el hombre. Por la complejidad estructural que presentan las plantas de tratamiento convencionales tienen un bajo porcentaje de remoción de estos, razón por la cual son vertidos sin ser tratados (Garzon, 2018).

Los colorantes azoicos se utilizan en grandes cantidades en las industrias textil y alimentaria, y su vertido en aguas residuales de dichas industrias, incluso en bajas concentraciones, produce una intensa coloración que tiene un fuerte impacto ambiental, no sólo por su contaminación visual sino también por su toxicidad. De ahí la relevancia de su tratamiento y eliminación de las aguas previas al vertido de las industrias, buscando su decoloración y si es posible, su completa mineralización (Jimenez, 2009).

### **Contaminación colorante Azul de Metileno**

Entre las características principales del azul de metileno se mencionan las siguientes. Es un compuesto de color azul oscuro, es soluble en agua, posee propiedades redox derivadas de su capacidad para aceptar o donar iones de hidrogeno, su masa molecular es de 319.85 g/mol, su punto de fusión es a los 100 °C tiene carga positiva, por lo tanto le es difícil unirse a componentes celulares cargados negativamente, llamados componentes basófilos (CCM, 2018).

El Azul de Metileno es un colorante básico cuyo nombre científico es Cloruro de Metilionina su fórmula química es  $C_{16}H_{18}N_3SCl \cdot 3H_2O$  es un colorante heterocíclico aromático, su estructura química se muestra en la Figura 1 (Anaya, 2018).



**Figura 1. Estructura del Azul de Metileno**  
Fuente. (Anaya, 2018)

## Metodos de tratamiento

Entre los metodos de tratamiento para tratar aguas contaminadas con colorantes en diferentes procesos como quimico, biologico electroquimico y fisicoquimico se indica en la Figura 2.



**Figura 2. Tipos de tratamiento para aguas contaminadas con colorantes.**  
**Fuente. Propia del autor, 2018.**

La adsorción es una nueva opción de tratamiento ya que es una operación de separación de sustancias, que se realiza al poner en contacto un fluido con un sólido adsorbente, este es un fenómeno de superficie mediante el cual el adsorbato queda retenido en la superficie exterior y en los poros interiores del sólido (Wang & Huiting, 2007).

La adsorción ha sido anunciada como una biotecnología prometedora para la remoción de contaminantes en solución y/o recuperación de contaminantes, debido a su eficiencia, simplicidad, operación análoga a la tecnología convencional de intercambio iónico y a la disponibilidad de biomasa (Gadd, 2009).

Por lo tanto de manera general la adsorción en la aplicación tecnológica de los sistemas naturales que han existido durante miles de años, debido a la alta capacidad contaminante de la sociedad moderna en los últimos años, estos procesos se han utilizado para el beneficio de la humanidad (Valderrama & Galvis , 2006).



El proceso de adsorción involucra una fase sólida (sorbente) y una fase líquida (solvente, que es normalmente agua) que contiene las especies disueltas que van a ser sorbidas (sorbato, por ejemplo; iones metálicos). Debido a la gran afinidad del sorbente por las especies del sorbato, este último es atraído hacia el sólido y enlazado por diferentes mecanismos. Este proceso continúa hasta que se establece un equilibrio entre el sorbato disuelto y el sorbato enlazado al sólido (a una concentración final o en equilibrio). La afinidad del sorbente por el sorbato determina su distribución entre la fase sólida y líquida. La calidad del sorbente está dada por la cantidad del sorbato que puede atraer y retener en forma inmovilizada (Cruz, 2004).

### Planteamiento del problema

Más de diez mil diferentes tipos de pigmentos y colorantes sintéticos son usados en diferentes industrias como la textil, papelera, cosmética y farmacéutica, entre otras. Muchas actividades industriales liberan grandes cantidades de efluentes, contaminadas con colorantes, al ambiente. La principal fuente emisora de colorantes es la industria textil (Anjaneyulu & Sreedhara-Chary, 2005).

**Tabla 1. Concentraciones de color y cantidad de agua generada por algunas industrias.**

INDUSTRIA	CANTIDAD DE AGUA GENERADA (M <sup>3</sup> /TON)	CONCENTRACIÓN DE COLOR (UNIDADES HAZEN)
Azucarera	0.4 m <sup>3</sup> /Ton caña triturada	150-200
Cervecería	0.25 m <sup>3</sup> /Ton cerveza producida	200-300
Destilería	12 m <sup>3</sup> /Ton de alcohol producido	200-300
Curtido	28 m <sup>3</sup> /Ton de piel	400-500
Pulpa y papel	175 m <sup>3</sup> /Ton de papel	100-600
Textil	120 m <sup>3</sup> /Ton de fibra	1100-1300

**Fuente. (Anjaneyulu & Sreedhara-Chary, 2005)**

Los colorantes, aún a bajas concentraciones, son altamente visibles y, dependiendo del proceso usado y de la normatividad vigente, es posible requerir de una reducción hasta del 98% de la concentración del colorante presente en el efluente industrial.

Por esta razón, existe una fuerte demanda de tecnologías que permitan eliminar el color en estos efluentes. La degradación microbiana o enzimática podría permitir el reusó del agua tratada, ya que las enzimas solo atacan las moléculas del colorante, debido a su alta especificidad y dejan intactas los aditivos y las fibras (Kandelbauer & Guebitz, 2005).

Debido a la contaminación ambiental que generan los efluentes de la industria textil, la eliminación de los colorantes en este tipo de efluentes representa un reto tecnológico en los procesos de tratamiento de aguas residuales. Existen métodos que se utilizan en el tratamiento de aguas residuales con colorantes que pueden aplicarse de manera eficiente y se encuentran disponibles comercialmente. Algunas tecnologías son altamente específicas y con costos elevados, por lo que no se aplican para una amplia variedad de colorantes y no resuelven totalmente el problema de la decoloración (Kuhad, et. al. 2004).

Algunos de los métodos efectivos que se han usado para remover colorantes son la adsorción, transformación química, incineración, ozonación y fotocátalisis, aunque estas tecnologías resultan costosas. Los sistemas biológicos aplicados a la degradación de colorantes se consideran como una alternativa menos costosa y menos agresiva con el ambiente (De Moraes, Freire, & Duran, 2000).

El Azul de Metileno es un colorante que tiene un amplio uso en la industria, como tintes para el cabello, forma parte de colorantes para papel, algodones, lanas y pieles de animales. De este colorante, se ha determinado que en materia sanitaria la exposición a elevadas concentraciones causa aumento del ritmo cardiaco, vómitos, mareos, la cianosis y la necrosis de tejido expuesto, además la mayor parte de los colorantes son mutágenos y/o cancerígenos lo que convierte a este tipo de compuestos en un problema de salud pública (Ramos & Blanco, 2017).

## **Objetivo general**

Determinar el grado de remoción de colorante Azul de Metileno de solución acuosa, empleando la biomasa recolectada de residuos de té verde.

## **Objetivos específicos**

- Preparar soluciones sintéticas de concentraciones conocidas del color azul de metileno.
- Recolectar los residuos orgánicos de té verde
- Preparar los residuos orgánicos de té verde para realizar un proceso de adsorción.
- Realizar el proceso de adsorción entre los residuos orgánicos del té verde y las soluciones sintéticas del colorante Azul de Metileno.
- Determinar cómo se lleva a cabo este proceso de adsorción analizando los modelos teóricos de adsorción.

## **Hipótesis**

Mediante el uso del biomaterial de residuos de té empleado como biomaterial en un proceso de remoción del colorante Azul de Metileno en solución acuosa, se obtendrá un promedio de 95 % de eficiencia.

## **Justificación**

Una vez que los colorantes tienen contacto con los efluentes de agua, estos comienzan a producir gran variedad de reacciones químicas y procesos físicos que provocan la degradación del medio acuático. Por ejemplo algunos colorantes al entrar en contacto con el agua se transforman en compuestos más peligrosos, como aminas aromáticas potencialmente cancerígenas (Piña, 2018).

En específico con el colorante Azul de Metileno, siendo un colorante sintético con estructuras moleculares aromáticas complejas, lo hace inerte y difícil de degradar en plantas de tratamiento, además, su degradación en el medio natural es lenta, por lo que suele acumularse e incrementar su concentración en los distintos nichos ecológicos (Bautista, 2011).

Los tratamientos de adsorción son empleados para la remoción de metales pesados, a través de la adsorción de estos y pretende mitigar sus efectos negativos. No es extraño encontrar diversas investigaciones que tengan como objetivo primordial remover colorantes ya que su presencia afecta directamente los procesos biológicos, la estabilidad de la calidad del agua y principalmente presentan riesgos para la salud humana (Villanueva, 2017).

Existen varias investigaciones las cuales hablan sobre la adsorción de colorantes textiles en diferentes tipos de presentaciones; siendo la mayoría de ellos estudios con concentraciones conocidas y los materiales empleados en estas propuestas han sido diversos, desde cascaras de melón hasta residuos de café. Por esta razón en este trabajo de investigación se plantea reutilizar los residuos de té verde que usualmente es considerado como basura orgánica.

Los colorantes se utilizan para análisis de laboratorio, investigaciones científicas, procesos en acuicultura, tratamientos médicos y por supuesto procesos industriales (Lannacone & Alvariano, 2007). De los cuales se generan residuos que se disuelven en fase acuosa. Así mismo entre las industrias que más colorantes utilizan se

encuentran la textil, papelera, plástico, alimenticia y cosmetológica (Banat & Nigam, 1996).

## **Antecedentes**

La absorción de colorantes a partir de aguas residuales es un tema de gran interés en el campo de la contaminación del agua, que es una causa grave de dilapidación ambiental (Meena, et. al. 2005).

El Azul de Metileno es el colorante soluble más común en el agua, en general se utiliza para el algodón, el teñido del cuero, el calicó, los fines medicinales, la impresión y el tanino (Gupta, Suhas, & Saini, 2004). Aunque este tinte no es significativamente tóxico para el ser humano, puede causar irritación ocular, irritación de la piel y efectos sistémicos, incluidos cambios en la sangre (Sen & Afroze, 2011) .

El Azul de Metileno puede causar vómitos, náuseas, diarrea, sudoración profusa, confusión mental y gastritis, y puede dificultar la respiración. Por lo tanto, se ha centrado una importancia en la eliminación de tales tintes de los efluentes de aguas residuales. Numerosos métodos como la ósmosis inversa, el intercambio iónico, la filtración de membrana, la coagulación convencional, la precipitación química y la adsorción son los métodos generalmente más comunes para eliminar los tintes de las aguas residuales (Dawood & Sen, 2012) (Mahmoode, et. al. 2011).

La adsorción es una técnica muy razonablemente superior debido a la simplicidad de la disponibilidad del diseño, la capacidad para tratar los tintes más concentrados de otras técnicas y el bajo costo (Mahmoode, et. al. 2011) (Sen & Afroze, 2011).

Los adsorbentes comunes utilizados son carbones activados, porque tiene una adsorción de alta capacidad para una gran cantidad de iones metálicos

orgánicos/inorgánicos. Sin embargo, el carbón activado es un costo relativamente alto que limita su tratamiento (Cui, Liu, & Wu, 2008).

Se necesitan tecnologías alternativas rentables por este motivo. Los subproductos agrícolas están disponibles en grandes cantidades o ciertos productos de desecho industriales pueden tener el potencial de ser adsorbentes de bajo costo. Los desechos agrícolas están disponibles y son renovables en grandes cantidades a bajo costo o sin costo (Sen, Afroze, & Ang, 2011).

Los desechos agrícolas están disponibles y son renovables en grandes cantidades a bajo costo o sin costo (Sciban, 2008). Muchos tipos de subproductos agrícolas, como la cáscara de naranja (Sivaraj et. al. 2001) la cáscara de la cebada (Robinson, et. al. 2002) el aserrín, (Garg, et. al. 2004) cáscara de arroz (Vadivelan & Kumar, 2005), cáscara de cereal, (Han R. , 2006) cáscara de semilla de ricino (Oladoja, et. al. 2008), ceniza volante (Janos, et. al. 2003) y el cono de pino (Sen, Afroze, & Ang, 2011) se han utilizado para eliminar el Azul de Metileno de su solución acuosa. Sin embargo, no se ha informado de ningún trabajo sistemático sobre el uso de residuos de té verde como un adsorbente eficaz para la eliminación del colorante Azul de Metileno.

# **CAPÍTULO 1**

## **CONTAMINACIÓN DEL AGUA**

## 1.1 Contaminación

De acuerdo a la LGEEPA (1988) el concepto de contaminación se refiere a la presencia en el ambiente de uno o más contaminantes o de cualquier combinación de ellos que cause desequilibrio ecológico.

El origen de la contaminación es muy variada pero se pueden citar como causantes a los desechos urbanos e industriales, los drenados de la agricultura y de la minería, la erosión, los derrames de sustancias tóxicas, los efluentes de plantas depuradoras, los subproductos de los procesos de depuración, entre otros (Jimenez & Barrera, 2000).



Imagen 1.1 Contaminación por desechos urbanos e industriales, erosión de suelo y derrame de sustancias tóxicas en cuerpos de agua.

Fuente. BID 2008

El uso de agua por parte de la industria representa el 4.3% del uso consuntivo total, el uso agrupado industrial autoabastecido presenta la dinámica de crecimiento que muestra la gráfica. Cabe destacar que en el periodo 2006-2015 se incrementó notablemente el volumen concesionado de origen subterráneo, con un crecimiento del 51.4% en ese periodo.



**Tabla 1 Evolucion del volumen de agua concesionado de industria por tipo de fuente (2016-2015) miles de hm<sup>3</sup>.**



Fuente. (CONAGUA, 2016)

## 1.2. Contaminación de agua

La contaminación del agua es una amenaza mundial. En las últimas décadas, diversas industrias, la agricultura y la sequía a largo plazo han liberado una amplia gama de contaminantes químicos al agua ambiental (Chong, et. al. 2010).

El uso de colorantes azoicos para el teñido textil ha aumentado considerablemente en los últimos años debido a su costo, efectividad y la variedad de colores disponibles (Chang, Chen, & Lin, 2004). Cuando se aplica a tejidos, reactivo los grupos en la molécula de colorante forman enlaces covalentes estables con las fibras, impartiendo un color brillante y duradero al producto final. Sin embargo, su bajo grado de fijación en la fibra, típicamente entre 50 y 90%, da como resultado la liberación de cantidades sustanciales del tinte en las aguas residuales (Jonstrup, et. al. 2011).

La depuración de las diferentes clases de colorantes no son uniformes, los que son insolubles al agua (dispersos, tina, sulfurosos, etc.) se eliminarán en una etapa primaria de coagulación-decantación, mientras los más solubles pasarán al tratamiento biológico. A pesar de no ser biodegradables (aeróbicamente), una parte de estos quedaran retenidos por un mecanismo de "bioeliminación", que consiste en la adsorción del colorante a la biomasa. Algunos tipos de colorantes son muy poco adsorbidos por la biomasa. Así, los colorantes reactivos sólo son retenidos en un 10% de media (llegando a máximos del 30%). En todo caso, una reducción importante del color después de un proceso biológico únicamente es posible si se aplican tratamientos terciarios bastante costosos (Vilaseca, et. al. 2015).



Imagen 1.2 Derrame de colorante Azul de Metileno y rosa índigo en cuerpos de agua.  
Fuente. BID, 2010.

### 1.3 Principales contaminantes del agua

Se estima que aproximadamente 28,000 tipos de colorantes se descargan anualmente en efluentes de industrias de teñido textil (Jin, et. al. 2007). Si se trata de forma inadecuada, estos efluentes pueden tener un impacto significativo en el medio ambiente. En particular, pueden causar una reducción en la penetración de la luz solar y la concentración de oxígeno disuelto en el recibiendo cuerpos de agua y efectos nocivos sobre la flora y la fauna local. Por estos motivos, la contaminación por colorantes azo se considera un problema ambiental importante (Zuorro, et. al. 2013).



Imagen 1.3 Riego de pesticidas en cultivo de avena.  
Fuente BID, 2002.

Las aguas superficiales y subterráneas han sido severamente contaminadas por metales pesados, contaminantes inorgánicos, contaminantes orgánicos, especialmente colorantes, hidrocarburos y pesticidas (Aksu, 2005). Todos estos productos químicos tienen un gran efecto perjudicial sobre la salud pública y los ecosistemas acuáticos debido a su alta toxicidad y bioacumulación (Auriol, et. al. 2006).

#### **1.4 Contaminantes inorgánicos**

Los colorantes a diferencia de los pigmentos son solubles en un medio o solvente específico, esta definición implica que se designe como "colorante" o "pigmento" a una misma sustancia dependiendo del tipo de solvente en el cual se encuentre; por lo tanto es la solubilidad, una propiedad física importante en investigaciones relacionadas con colorantes y pigmentos cuyo conocimiento contribuye en el desarrollo de tecnologías más eficientes de tratamiento (Sarate & Sarate, 2011).

Las sustancias que producen la coloración de las aguas residuales, pueden ser agrupadas en dos categorías: compuestos de origen sintético y compuestos naturales.

Los colorantes sintéticos presentan propiedades únicas como su alta solidez en medio húmedo, generación de tonos brillantes en las superficies y su relativo bajo costo de producción, además de su buena solubilidad, resistencia a la luz solar, al

contacto con el agua y al ataque de una variedad de compuestos químicos por lo cual resultan atractivas para las industrias textiles, de cueros, imprenta y pinturas (Soon & Hameed, 2011).



Imagen 1.4 Ejemplos de colorantes.  
Fuente. BID, 2002.

Las bajas concentraciones de colorantes y pigmentos en el agua, disminuyen gradualmente la penetración de la luz con efectos significativos sobre la flora acuática, generando así una reducción de la actividad fotosintética y del oxígeno disuelto en el medio (Eichlerova, Homolka, & Nerud, 2007).

El grupo de colorantes sintéticos más utilizados en el mundo, el tipo azo ( $-N=N-$ ) representa el 70% de los colorantes encontrados en las aguas residuales, la presencia de estas sustancias se atribuye a la capacidad que posee el grupo  $-N=N-$  de ser sustituido por una variedad de estructuras orgánicas e inorgánicas que le otorgan propiedades químicas específicas a cada molécula, por esta razón existen más de 3000 variedades de colorantes Azo (Sarate & Sarate, 2011).

La industria textil produce grandes cantidades de aguas residuales durante el proceso de lavado y teñido que contiene grandes cantidades de colorantes que no se fijaron en la superficie de la fibra; como resultado, se eliminan junto con la coloración de desechos textiles (Dhir, 2014).



Imagen 1.5 Desechos textiles.  
Fuente. Unicef, 2008.

### **1.5 Contaminantes orgánicos**

Los colorantes naturales (los cuales se extraen de fuentes primarias de la naturaleza) se presentan en menor proporción a los sintéticos. Generalmente son polímeros con una amplia variedad de grupos funcionales y estructuras químicas orgánicas complejas (como ciclos y grupos aromáticos) que pueden afectar también los ecosistemas acuáticos y la salud humana (Han & Subba, 2009).

En los últimos años, la investigación ambiental ha ganado un interés creciente gracias a la aparición de una nueva clase de compuestos llamados contaminantes emergentes, estos van desde inorgánico a productos químicos orgánicos, matrices no especiadas, así como nano partículas, e incluso contaminantes microbianos (Richardson & Ternes , 2011).

Estos químicos no están actualmente incluidos en los programas de monitoreo de rutina; sin embargo, pueden ser candidatos para una futura regulación, sobre la base de resultados de investigaciones sobre toxicidad, ocurrencia en varios compartimentos ambientales y percepción pública (Richardson & Ternes , 2011). La lista de nuevos productos químicos cuya presencia en el medio ambiente representa un riesgo comprobado o potencial es considerable y contiene ampliamente resinas, plásticos y aditivos plásticos, productos farmacéuticos y para el cuidado personal (por ejemplo; desinfectantes, fragancias, filtros solares, antibióticos, drogas de abuso, hormonas naturales y sintéticas); detergentes y otros agentes de limpieza; pesticidas y biosidas (por ejemplo, herbicidas, fumigantes, conservantes de madera, agentes incrustantes); productos químicos

derivados del petróleo; y productos de tratamiento de residuos / agua potable, de vertederos e incineración (Barcelò & Petrovic, 2008).

La capacidad de los contaminantes emergentes para afectar el medio ambiente se confirma mediante la detección de compuestos farmacéuticos, compuestos organofosforados en el agua potable y en el agua subterránea utilizada como elemento público y suministro de agua potable (Kuch & Ballschmiter, 2001).



Imagen 1.6 Colorantes naturales  
Fuente BNI, 2018.

## 1.6 Colorantes

La clasificación de colorantes y pigmentos puede realizarse considerando las propiedades fisicoquímicas de los grupos funcionales. Estas propiedades de acuerdo con muchos autores, son claves en la selección de una tecnología o grupo de tecnologías aplicables para la decoloración de aguas residuales contaminadas.

Tomando como referencia el diccionario de química de la Universidad de Oxford (Oxford, 1999), es posible establecer diferencias entre los grupos de colorantes en función de la forma de aplicación del tinte o del soporte sobre el sustrato utilizado, de esta manera se presentan diferentes compuestos generadores de color como:

*Ácidos:* Utilizados para teñir fibras proteicas (lana y seda) o poliamidas y fibras sintéticas. Aplicados en las industrias de alimentos, imprenta, cuero, madera y nylon. Solubles en agua.

*Básicos:* Utilizados para teñir fibras acrílicas, en la síntesis de nylon modificado, poliéster modificado y muchos medicamentos. Solubles en agua.

*Dispersos:* Tintes insolubles que se aplican formando una dispersión muy fina en el agua. Se usan para teñir acetato de celulosa y otras fibras sintéticas (poliéster y fibras de acrílico).

*Directos:* Presentan una gran afinidad por materiales de algodón, rayón y otras fibras de celulosa, generalmente son sales de ácidos sulfónicos. Solubles en agua.

*Reactivos:* Presentan grupos de compuestos capaces de reaccionar con el sustrato formando enlaces covalentes, usados para teñir fibras de celulosa y algodón, en general.

*Baño:* Sustancias insolubles usadas para teñir algodón. Suelen presentar grupos cetónicos ( $C=O$ ). Este grupo de colorantes es oxidado por acción del aire y precipitado en forma de pigmento sobre las fibras; el índigo y la antraquinona son ejemplos de este grupo. Aplicaciones sobre algodón y fibras de celulosa.



Imagen 1.7 Desechos de la industria papelera, textil, plástica y alimentaria.  
Fuente. Unicef, 2015.

Muchas industrias como la papelera, la textil, la plástica y la alimentaria, utilizan colorantes para colorear sus productos y también consumen grandes cantidades de agua. Los tintes son componentes comunes de los efluentes descargados por diversas industrias, particularmente por la industria textil. Entre ellos, los colorantes reactivos se usan mucho en la industria textil para colorear diferentes materiales de tela, pero sus metabolitos (por ejemplo, aminas aromáticas) pueden

ser altamente tóxicos y potencialmente carcinogénicos, mutagénicos y alergénicos en organismos expuestos (Arica & Bayramoglu, 2007).

Debido a la naturaleza carcinogénica, mutagénica, tóxica y alergénica de los colorantes, su aparición en el sistema acuático es altamente peligrosa (Venturini & Tamaro, 1979). Por lo tanto, es deseable eliminar los colorantes de los efluentes industriales. Se ha investigado extensamente una gama de tecnologías de tratamiento convencionales para la eliminación de colorantes textiles (Couto, 2009).

Los colorantes azoicos representan el mayor grupo de tintes producidos por la industria (60-70%). Estos productos químicos xenobióticos se caracterizan por la presencia de uno o más grupos azo (-N=N-). Se utilizan con frecuencia en las industrias textiles y del papel debido a su bajo costo, persistencia del color y variedad de colores en comparación con los tintes naturales (Ong, Uchiyama, & Inadama, 2010).

Los efluentes que contienen colorantes azoicos pueden afectar significativamente la actividad fotosintética de la vida acuática, ya que modifican y reducen la penetración de la luz, afectando la fotosíntesis (Hernandez, et. al. 2014). También existe preocupación porque muchos de los colores están hechos de compuestos cancerígenos, como la bencidina (Golka, Kopps, & Myslak, 2004).

Los colorantes azoicos son particularmente difíciles de degradar, métodos como adsorción, neutralización, coagulación, degradación química, degradación foto catalítica, ozonización, filtración de membrana e intercambio iónico se han utilizado para su eliminación del agua residual (Saratale, et. al. 2011).

Más de 10,000 tintes con una producción anual total, más de 700,000 toneladas métricas en todo el mundo están disponibles comercialmente y 5 a 10% de los colorantes se descargan en los efluentes industriales (Yu, et. al. 2009).



La adsorción de colorantes a partir de aguas residuales es un tema de gran interés en el campo de la contaminación del agua, que es una causa grave de dilapidación ambiental. Los tintes anicónicos son menos tóxicos que los tintes básicos (Sen & Afroze, 2011).

### 1.7 Colorante Azul de Metileno

Este colorante básico en especial, cuyo nombre científico es Cloruro de Metilionina cuya fórmula científica es  $C_{16}H_{18}N_3SC \cdot 3H_2O$ , es un colorante heterocíclico aromático, su estructura química se muestra en las Figura 3 y tiene varias áreas de aplicación ya sea para usos de laboratorio, análisis, investigaciones, química fina, medicina e incluso en acuicultura (Anaya, 2018).

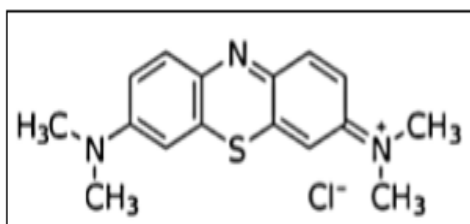


Figura 3. Estructura del Azul de Metileno  
Fuente. (Anaya, 2018)

Entre las características principales se mencionan: es un compuesto químico aromático utilizado como colorante y como fármaco, entra en los cuerpos de agua a través de efluentes de las industrias textil, papelera y farmacéutica y afecta negativamente al ecosistema y la vida acuática. La presencia de Azul de Metileno en el agua potable es un peligro para la salud ya que causa irritación en los ojos y la piel, anemia hemolítica, náuseas, vómitos y dolor abdominal. Por lo tanto, su eliminación del agua contaminada es de gran importancia (Balcha, Yadav, & Dey, 2016).

Además, es un compuesto de color azul oscuro, es soluble en agua, posee propiedades redox derivadas de su capacidad para aceptar o donar iones de hidrogeno; su masa molecular es de 31, 985 g/mol; su punto de fusión es a los 100° C tiene carga positiva, por lo tanto le es fácil unirse a componentes celulares

cargados negativamente llamados componentes basófilos (nombre derivado por su afinidad a los colorantes básicos) (CCM, 2015).

El Azul de Metileno es el colorante soluble más común en el agua, en general se utiliza para el algodón, el teñido del cuero, el calicó, los fines medicinales, la impresión y el tanino (Gupta, Suhas, & Saini, 2004). Aunque este tinte no es significativamente tóxico para el ser humano, puede causar irritación ocular, irritación de la piel y efectos sistémicos, incluidos cambios en la sangre (Sen, Afroze, & Ang, 2011). El colorante Azul de Metileno puede causar vómitos, náuseas, diarrea, sudoración profusa, confusión mental y gastritis, y puede dificultar la respiración (Sen, Afroze, & Ang, 2011).

En laboratorios el Azul de Metileno es un colorante ampliamente utilizado en la tinción de estructuras celulares, tejidos de soporte y otras estructuras orgánicas de los bacilos (UNAM, 2015). En la biología, se emplea para diferentes procesos de tinción como medio de contraste y como un indicador de vida en las células. En histología se le emplea como colorante nuclear en combinación con la eosina, para la coloración del tejido sanguíneo (De la Torre, 1975)

En acuicultura el Azul de Metileno se utiliza para tratar enfermedades en los peces ornamentales o para evitar mucosas en los estanques (Cedillo, Rosales, & Constantino, 2001) el colorante también es capaz de proveer protección contra la intoxicación por nitrilos y ocasionalmente es usado como antiséptico tipo antifúngico en infecciones por protozoos en cultivo de peces (Lannacone & Alvariano, 2007).



Imagen 1.8 Acuicultura.  
Fuente. SAGARPA, 2002.

## **CAPÍTULO 2**

# **MÉTODOS DE TRATAMIENTO PARA REMOVER COLORANTES**

Al analizar el comportamiento de las sustancias que producen la coloración de las aguas residuales, se pueden definir cuatro tipos de tecnologías para el tratamiento de los efluentes contaminados, las cuales se agrupan dentro de las categorías físicas, químicas, biológicas y combinadas.

## 2.1. Tratamientos físicos

Entre las principales tecnologías para el tratamiento físico de efluentes contaminados por la presencia de colorantes y pigmentos en el medio acuoso, se relacionan los procesos de adsorción, los sistemas de filtración y las resinas de intercambio iónico como las más importantes.

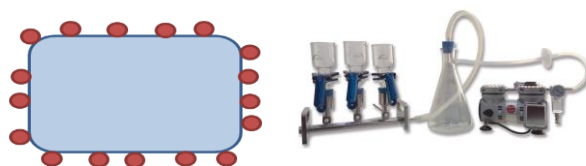


Imagen 2.1 Adsorción  
Fuente. UNAM, 2011.

Entre los materiales adsorbentes reportados en la literatura con mejores porcentajes de remoción de color, se encuentran desde residuos agroindustriales de bajo costo como palma de aceite, viruta, aserrín, bambú, algas, hojas de pino, tallos de canola entre otros, hasta minerales como lignito, magnetita, carbón activado, bentonita, etcétera. Producto de las interacciones electrostáticas entre los materiales adsorbentes y los compuestos que producen la coloración de las aguas residuales, el proceso de adsorción es afectado por las condiciones del medio (pH y temperatura), las características moleculares de los colorantes (grupos funcionales constitutivos) y el tiempo de contacto, entre otras (Cai, Cui, Wang, & Lui, 2009).

Estas interacciones electrostáticas pueden ser mejoradas mediante el pre-tratamiento de los materiales adsorbentes utilizando agentes químicos modificadores, los cuales actúan a nivel de superficie causando la protonación o desprotonación de las moléculas expuestas del material adsorbente. Existe una influencia significativa del pH sobre las cinéticas de adsorción, las condiciones acidas en general, favorecen la remoción de grupos de colorantes ácidos, directos,

reactivos y dispersos, mientras que los medios alcalinos, incrementan la remoción de colorantes básicos (Wang & Yan , 2011).

En el caso de los colorantes que en solución o en medio acuoso presentan valores de pH alcalinos, los procesos de adsorción más eficientes relacionan como adsorbente materiales de origen vegetal como viruta y hojas de pino, con porcentajes de remoción de color mayores al 90% y hasta el 98% respecto a otros materiales adsorbentes (Janoš, Coskun, & Pilařová, 2009). El carbón activado, puede llegar a remover por adsorción hasta el 96% del color generado por colorantes directos y el 70% del color asociado al tipo reactivo y disperso antes de la saturación del material adsorbente (El-Ashtoukhy, 2009).

Materiales como quitosano y fosfato de calcio, alcanzan porcentajes de remoción de colorantes reactivos del 90%, mientras que los polímeros ligados a magnetita y algunos residuos agroindustriales como los tallos de canola, presentan cinéticas de remoción significativas (>90%) sobre colorantes ácidos (Momenzadeh, et. al. 2011).

## **2.2. Tratamientos químicos**

En el grupo de procesos químicos implementados para el tratamiento de efluentes contaminados con sustancias colorantes, se presentan algunas técnicas de oxidación química como: los procesos de ozonación, fenton, ultrasonido, fotocátalisis (ultravioleta), oxidantes convencionales (peróxido de hidrogeno), procesos de coagulación/floculación y electrocoagulación, entre otras tecnologías. Entre este grupo de tecnologías, la fotocátalisis y el tratamiento fenton/UV, presentan porcentajes de remoción de color cercanos al 100% (Barrios, et. al. 2015).

La remoción de colorantes utilizando sistemas de ozonación puede ser favorecida por las condiciones acidas del medio y el uso de iones metálicos como hierro y manganeso, entre otras variables, no obstante, al igual que en los procesos de adsorción, existe una gran contribución de la naturaleza del colorante (acido, básico, reactivo, etc.) sobre el intervalo óptimo de operación de la tecnología. Utilizando un sistema de ozonación es posible alcanzar porcentajes de remoción entre el 98 y

100% para los diferentes tipos de colorantes, en periodos de tiempo inferiores a los 15 minutos, con concentraciones iniciales de colorantes entre 86 y 2000 mg/L. La reducción en los valores de demanda química de oxígeno (DQO) reportados para la ozonación, pueden variar en general, entre el 10 y el 48% mientras que los flujos óptimos de ozono se mantienen alrededor de los 15 litros/min o 360 mg O<sub>3</sub>/h (Arslan, 2001).

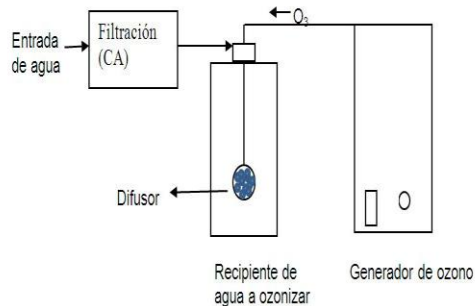


Imagen 2.2 Sistema de ozonación.  
Fuente. Laboratorio UNAM, 2012.

Otro tipo de tecnología utilizada para la remoción de color en aguas residuales, es la electrocoagulación. La tecnología utiliza valores de densidad de corriente entre 4.45 y 200 A/m<sup>2</sup> alcanzando porcentajes de remoción de color y DQO superiores al 90 y 80%, respectivamente, en tiempos de operación inferiores a 120 minutos para los diferentes tipos de colorantes evaluados (Daneshvar, Oladegaragoze, & Djafarzadeh, 2006). La cinética de remoción de color puede ser influenciada por el tipo de electrodo implementado, el cual puede ser de aluminio, hierro, grafito, acero, dióxido de titanio, plomo, platino; entre otros materiales (Kim, et. al. 2002).



Imagen 2.3 Equipo de electrocoagulación  
Fuente. Laboratorio UNAM, 2006.

La acción del tratamiento fenton/UV sobre los diferentes tipos de colorantes y pigmentos, mejora las cinéticas de remoción del carbono orgánico total (COT >70%) y de la demanda química de oxígeno, manteniendo los porcentajes de decoloración cercanos al 100%, en periodos de tiempo inferiores a los 20 minutos. Las cinéticas son optimizadas al aumentar la concentración de peróxido de hidrógeno y de hierro (II)/(III) (Chacón, Leal, & Sánchez, 2006).

Los procesos de coagulación-floculación utilizan diferentes especies químicas para remover el color y la carga contaminante presente en los efluentes. Entre los compuestos utilizados, la especie de aluminio  $Al^{13}$  presenta mayores cinéticas de remoción de color respecto a las sales comerciales de aluminio. No obstante, agentes como el sulfato de aluminio y el cloruro férrico, pueden remover entre el 53 y 100% de color de una solución de colorante de 40 a 4000 mg/L, en periodos de operación inferiores a las dos horas (Chafi, et. al. 2011).

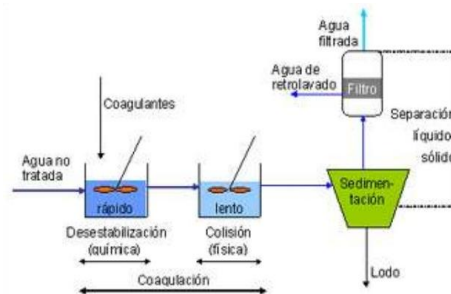


Imagen 2.4 Proceso fotocatalisis.  
Fuente. Laboratorio UNAM, 2017.

Los procesos fotocatalíticos análogos al proceso fenton/UV, utilizan como principal catalizador el dióxido de titanio ( $TiO_2$ ). A partir de él es posible mineralizar el carbón orgánico total en un 60%, mientras se remueve el color entre 90 y 100%, para periodos inferiores a los 120 minutos la fotocatalisis con  $TiO_2$  puede ser optimizada modificando este material con iones de plata ( $Ag^+$ ), entre otros. En el grupo de tecnologías más destacadas para el tratamiento químico de colorantes, el proceso fotocatalítico, alcanzó la máxima cinética de remoción de color (100%) junto con el tratamiento fenton/UV durante periodos de operación inferiores a los 90 y 20 minutos, respectivamente; obteniendo además porcentajes de remoción de Carbono Orgánico Total (COT) y Demanda Química de Oxígeno (DQO) entre el 80 y 100% (Han & Subba, 2009).

Las tecnologías de tratamientos basadas en la electrocoagulación, fueron favorecidas por la aplicación de electrodos de óxido de titanio encontrándose porcentajes de remoción de color superiores al 90%. Las condiciones ácidas (bajos valores de pH) incrementaron los porcentajes de remoción con la ozonación (Barrios, et. al. 2015).

### **2.3. Tratamientos biológicos**

La actividad metabólica de los microorganismos puede ser optimizada con la adición de sustratos o fuentes de carbono y energía secundarias, las cuales pueden acelerar la asimilación del colorante (fuente de energía objetivo). Los procesos biológicos implementados, evalúan la influencia de factores como el modo de operación del reactor (batch, feedbatch o continuo), de variables como la temperatura del medio, el pH, la concentración inicial de colorante y la concentración de microorganismos, además de la presencia de oxígeno en el sistema. Los tratamientos biológicos permiten obtener porcentajes de remoción de color y COT significativos, sin embargo se realizan a bajas velocidades lo que incrementa sustancialmente los tiempos de tratamiento. En condiciones adecuadas, los organismos pueden reducir una diversidad de sustancias químicas recalcitrantes; La diversidad biológica hace posible encontrar enzimas y microorganismos especializados en la degradación de colorantes específicos (Barrios, et. al. 2015).

Entre los procesos aplicados para el tratamiento biológico de efluentes con presencia de colorantes y pigmentos, los tratamientos anaerobios producen una remoción de color y DQO entre el 80 y 100% en periodos que oscilan entre los 2 y 58 días (Manu & Chaudhari, 2003). Los tratamientos aerobios de mayor importancia reportados en la literatura, tiene como base los sistemas de lodos activados y el uso de hongos como *Phanerochaete chrysosporium* y *Pleurotus sajorcaju*, entre otros. Bajo condiciones anaerobias es posible remover hasta el 95% de colorantes como el azul Índigo, durante 5 días de operación (Chagas & Durrant, 2001).



Los reactores de flujo ascendentes de película fija (anaerobios) acoplados por sistemas de reactores aeróbicos pueden alcanzar cinéticas de remoción de color y DQO, superiores al 98 y 95% respectivamente, durante 16 horas de operación. La secuencia de tratamiento anaerobia - aerobia a partir de consorcios microbianos, presenta rendimientos en los valores de remoción de color, DQO y DBO sobre el 60, 80 y 90%, respectivamente, con la utilización de co-sustratos como almidón, glucosa y ácido acético y, en tiempos de residencia hidráulicos de 16 horas y 8 días (Ay, Catalkaya, & Kargi, 2009)

Otros modelos de reactores ampliamente aplicados, son: los reactores tipo Wetland, los cuales pueden reducir un 70% del color de los efluentes, mientras se presentan porcentajes de remoción de DQO y COT superiores al 88%, las algas *Nostoc lincki* y *Oscillatoria rubescens*, las cuales pueden remover hasta en un 82% colorantes ácidos; y algunos microorganismos aerobios del género *Bacillus* y *Pseudomonas* con eficiencias de remoción sobre el 90% (Dave & Dave , 2009).

Los sinergismos resultantes de las interacciones microbianas (tratamientos de colorantes con la aplicación consorcios), favorecen las cinéticas de degradación del color, respecto al uso de especies individuales. Los organismos aislados de suelos contaminados con colorantes, pueden alcanzar cinéticas de remoción más altas de COT y color (superiores al 90%) dada su capacidad de adaptación. Los resultados permiten identificar una diversidad de especies de bacterias capaces de remover colorantes presentes en efluentes contaminados, dentro de los microorganismos estudiados el género *Bacillus Sp.*, presentó la máxima capacidad de remoción de colorantes (100%) en 14.5 horas de tratamiento, a diferencia de los tratamientos químicos, los procesos biológicos requieren tiempos de tratamiento prolongados para obtener rendimientos efectivos en la remoción de la DQO. La degradación de colorantes puede ser incrementada con la adición de co-sustratos como la glucosa y ácido acético (entre otros). Entre las secuencias de tratamiento biológico, la combinación de etapas anaerobias-aerobias (en su orden) fueron importantes para lograr degradar colorantes recalcitrantes (Lade, et. al. 2012).

#### **2.4. Tratamientos combinados**

Producto de la combinación de tecnologías físicas, biológicas y químicas, se logran optimizar desde las cinéticas de remoción de color, DQO y COT, hasta los tiempos de operación y/o de residencia hidráulica de los efluentes. Los procesos combinados pueden reducir desde la generación de lodos hasta favorecer el escalado de procesos a nivel industrial (Eren, 2012).

Entre las tecnologías combinadas, la secuencia ozonación-UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> puede alcanzar porcentajes de remoción de color entre 80 y 100% en periodos de 5 y 15 minutos, reduciendo el COT entre el 75 y 80% de colorantes directos (Shu, 2006).

El método coagulación-adsorción, utilizando carbón activado y alumbre y, una concentración inicial de colorantes reactivos de 100 mg/L, logra remover cerca del 100% del color presente en el medio, aplicando dosis de coagulantes entre 250 y 350 mg/L (Lee & Choi, 2006).

La aplicación del sistema ozonación-ultrasonido, presenta porcentajes de remoción de color superiores al 98% en periodos inferiores a 1 minuto en el caso de algunos colorantes directos, tras la aplicación de un flujo de ozono cercano a 3.2 g/h y una intensidad de corriente alrededor de 176 W/L. Lo cual disminuye considerablemente el volumen de los lodos producidos (Song, Ying, & He, 2007).

Entre otras tecnologías aplicadas, la combinación de la técnica de ultrasonido/peróxido de hidrógeno/grafito y ultrasonido/UV, producen reducciones del 90% en la coloración del efluente, durante periodos de 120 minutos, aplicando frecuencias de ultrasonido entre 20 y 817 kHz sobre concentraciones iniciales de colorantes de 300 mg/L (Fan, et. al. 2008).

El acoplamiento de procesos de coagulación seguidos por procesos biológicos en condiciones batch, puede alcanzar valores de remoción de color del 100% para concentraciones iniciales de colorantes en el orden de 600 mg/L y, con tiempos de residencia hidráulica de 5 horas. La secuencia de oxidación química mediante

ozono y la implementación de filtros biológicos aireados de flujo ascendente, puede alcanzar eficiencia de remoción de color y DQO, del 97 y 90% respectivamente (Lu, et. al. 2009).

Finalmente los procesos fenton-ultrasonido, en presencia de hierro, en general pueden remover en un 99% el color aparente del medio contaminado durante 10 minutos, tras la aplicación de densidades de corriente cercanas a 120 W/L y una concentración de hierro de 1 g/L (Weng, et. al. 2013).

La aplicación de tratamientos combinados disminuyó los tiempos promedios de remoción de color, DQO y de la operación en general, mientras se favoreció el incremento de la escala o de los volúmenes sobre los cuales se desarrollaron los protocolos (hasta 6 litros). La combinación de tratamientos biológicos y químicos (degradación biológica y oxidación con peróxido de hidrogeno) permitió obtener una eficiencia de remoción superior al 93%, mientras que los procesos iniciales de adsorción con carbón activado más coagulación y oxidación química, eliminaron en su totalidad el colorante en el medio. El estudio favorece como pretratamientos, los procesos de adsorción o de degradación biológica, seguidos por la oxidación química (O<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, ultravioleta, fenton, entre otros), esto hace posible reducir además, la generación de lodos maximizados en tratamientos con coagulantes, la electrocoagulación o la actividad biológica individual (Barrios, et. al. 2015).

## **2.5 Tecnologías utilizadas para remover el colorante Azul de Metileno**

Existe un número importante de técnicas específicas destinadas a la eliminación del colorante Azul de Metileno de las aguas residuales. De todas ellas, las que más ampliamente se han utilizado hasta el momento son las siguientes:

- Coagulación-floculación
- Adsorción con carbón activo
- Tecnologías de membrana
- Tratamiento con ozono

### **2.5.1 Coagulación-floculación**

Cuando los procesos de coagulación-floculación se utilizan como tratamiento terciario para eliminar el color, el coagulante debe ser sobre dosificado para alcanzar la completa eliminación del colorante. Previamente deben realizarse ensayos de laboratorio para determinar las concentraciones apropiadas de coagulante y polielectrolito, y para fijar el pH óptimo de trabajo (Carvalho, Delee, & Novais, 2002).

Por otro lado, están apareciendo nuevos polímeros floculantes capaces de obtener elevadas decoloraciones a una menor concentración. Sin embargo, esta técnica produce un residuo que requiere un tratamiento adicional para ser destruido, mientras el exceso de sales inorgánicas utilizadas como coagulante incrementa la conductividad del agua (Zahrim, Tizaoui, & Hilal, 2010).

### **2.5.2 Adsorción con carbón activado**

La adsorción con carbón activo ofrece buenos rendimientos de eliminación de colorante (cerca del 95% de decoloración), pero el carbón activo tiene un costo elevado y sólo es reutilizable un cierto número de veces. Las moléculas voluminosas de colorante quedan adsorbidas fácilmente pero su desorción es muy difícil y requiere de pirolisis, existen algunos estudios sobre la regeneración del carbón activo utilizando otras técnicas como la oxidación húmeda o la irradiación de ultrasonidos (Shende & Mahajani, 2002).

Todos estos procesos comportan un elevado consumo energético. De hecho, el uso de carbón activo únicamente es apropiado para el tratamiento de pequeños volúmenes de efluente. Una alternativa de bajo costo al uso de carbón activo comercial sería la producción de carbón activado a partir de residuos de la propia industria textil. En este sentido es el Laboratorio de Control de la Contaminación Ambiental del INTEXTER, realizó un estudio que dio lugar a la patente: "Perfeccionamiento en la obtención de carbón activado ES-491446" (Quan, y otros, 2004).

### **2.5.3 Tecnologías de membrana**

Respecto a las tecnologías de membrana, tanto la nanofiltración como la ósmosis inversa son efectivas en la retención de colorantes y otros productos textiles. Pueden separar todo tipo de colorantes solubles, incluido colorantes reactivos hidrolizados de bajo peso molecular. En general, el tratamiento por nanofiltración de baños agotados de colorantes reactivos es muy eficiente (hasta un 99% de decoloración) (Qin, Oo, & Kekre, 2007).

Sin embargo, es necesario un proceso adicional de ósmosis inversa para alcanzar una reducción significativa del contenido del analito en la solución, las principales desventajas de las tecnologías de membrana son su elevado consumo energético y la generación de un nuevo efluente fuertemente coloreado (de menor volumen pero más concentrado) que debe ser tratado por pirolisis. Los procesos de ensuciamiento y colmatación de la membrana también son inconvenientes a tener en cuenta. Para superar estos problemas y alcanzar una mejor calidad de separación, se han aplicado métodos combinados de separación (Petricin, Andersen, Sostar-Turk, & Le Marechal, 2007).

El tratamiento con ozono de efluentes de tintura se basa en el hecho que el ozono ( $O_3$ ) es uno de los oxidantes más poderosos, capaz de oxidar las moléculas de colorante, fragmentando sus enlaces y produciendo especies incoloras, debido a la formación de radicales hidroxilo ( $OH$ ) (De Faria, et. al. 2009).

El ozono se obtiene por medio de diferentes sistemas comerciales basados en la acción ionizante de un campo eléctrico en una corriente de aire seco u oxígeno. La ozonización de baños de tintura alcanza elevados niveles de decoloración en cortos tiempos de tratamiento, y en un amplio rango de pH (entre 4 y 12), generando especies incoloras y más biodegradables. Sin embargo, se requieren tiempos de tratamiento mucho mayores para eliminar la DQO adecuadamente, lo que implica unos consumos eléctricos muy elevados (Wu, Doan, & Upreti, 2008).

## **2.6 Métodos de tratamiento para remover colorantes**

Los desechos de tinte representan uno de los grupos de contaminantes más problemáticos porque pueden ser identificados fácilmente por el ojo humano y no son fácilmente biodegradables.

Recientemente, la atención se ha centrado en el desarrollo de adsorbentes de bajo costo para la aplicación de técnicas de adsorción para el tratamiento de aguas residuales. En los últimos años, se observó que las biomásas nativas y modificadas de bacterias, hongos, algas y plantas podían eliminar diferentes colorantes textiles por adsorción (Gylay, et. al. 2017).

Los estudios han demostrado que el carbón activado es buen material para la eliminación de diferentes tipos de tintes, pero su uso a veces se restringe en vista de un costo mayor. Los problemas de regeneración y la dificultad de separación de las aguas residuales después del uso son las dos principales preocupaciones del uso de estos materiales (Gupta & Suhas, 2009). Esto ha resultado en intentos de varios investigadores de buscar adsorbentes más económicos. Los materiales naturales o los residuos / subproductos de industrias o materiales preparados sintéticamente, que cuestan menos y pueden usarse como tales o después de algún tratamiento menor como adsorbentes, generalmente se denominan adsorbentes de bajo costo (Mukhlish, Khan, & Bhoumick, 2012).

El proceso de teñido textil exige una gran cantidad de agua y produce un volumen sustancial de aguas residuales. Sin tratamiento o aguas residuales parcialmente tratadas e industriales efluentes vertidos en el ecosistema plantean una grave problema para el medio ambiente. Esto es porque la mayoría tintes son compuestos sintéticos con complejo aromático y estructuras moleculares, que los hacen resistentes a luz, calor y agentes oxidantes, no biodegradable, y tóxicos para la vida, con efectos carcinógenos y mutagénicos (Noroozi, et. al. 2007).

Además, la presencia de colorantes en el agua es estéticamente desagradable. En los últimos años, muchos métodos que incluyen coagulación floculación, oxidación química, tratamientos biológicos, foto degradación, filtración de membrana y adsorción han sido empleados para tratar el tinte que contiene aguas residuales (Ong, et. al. 2011).

Varias tecnologías de reducción, incluida la adsorción (Mohammed, Kadhim, & Mohammed, 2011) degradación microbiana (Caselatto, et. al. 2011) y procesos avanzados de oxidación (Zuorro, et. al. 2013) han sido propuestos para eliminación de colorantes azoicos de efluentes textiles.

Por lo tanto, es obligatorio reducir las cantidades de colorantes al final del efluente de la tubería en las industrias textiles, ya que se han establecido regulaciones nuevas y más estrictas en muchos países.

### **2.6.1 Oxidación catalítica**

Los procesos de oxidación avanzada (POA) ( $O_3$ , radiación UV, peróxido de hidrógeno, reactivos de Fenton) son posiblemente las mejores tecnologías para eliminar los contaminantes orgánicos en el agua. Estos procesos se basan en la generación de radicales hidroxilos libres. Entre los procesos de oxidación avanzada, la oxidación en aire húmedo (WAO) ya se ha aplicado con éxito para tratar efluentes de la industria de impresión y teñido (Garcia, et. al. 2005).

Una amplia gama de productos se han tratado con eficacia debido a la capacidad de esta técnica para degradar productos con baja solubilidad que apenas se eliminan con otros tratamientos. En procesos de oxidación en aire húmedo, la generación de especies de oxígeno activo, tales como radicales hidroxilo, tiene lugar a altas temperaturas y presiones. Se sabe que este proceso tiene un gran potencial para el tratamiento de efluentes que contienen un alto contenido de materia orgánica o contaminante para los cuales la purificación biológica directa es inviable (Mishra, 1995).

Las ventajas de la oxidación en aire húmedo sobre otros procesos de oxidación avanzada, son la capacidad mencionada de tratamiento de aguas residuales con una demanda química de oxígeno (DQO) elevada y una mejor relación costo-eficiencia. Dado que la oxidación es un proceso exotérmico, el balance térmico simple muestra que los desechos con contenidos de DQO superiores a aproximadamente 20g/L se someten a oxidación húmeda auto térmica (Andreozzi, et. al. 1999).

El proceso de oxidación en aire húmedo tiene capacidades bien conocidas para descomponer compuestos biológicamente refractarios en materiales más simples y de fácil tratamiento antes de que se liberen al medio ambiente. En general, este proceso de combustión sin llama en fase acuosa tiene lugar a altas temperaturas de reacción (473-593 K) y presiones (20-200 bar) por medio de especies de oxígeno activo, tales como radicales hidroxilo (Levec & Pintar, 2007).

El rendimiento de oxidación en aire húmedo puede mejorarse por medio de un catalizador, mejorando la degradación de los contaminantes orgánicos mediante el uso de condiciones más suaves. La catálisis homogénea, en particular las sales de metales de transición solubles, se ha informado como potenciadores eficientes de la velocidad de reacción (Pintar, et. al. 2001). Sin embargo, los catalizadores heterogéneos son más adecuados debido a su fácil recuperación, regeneración y proceso de reutilización.

### **2.6.2 Filtración de Membrana**

La filtración por membrana accionada por gravedad (GDM) ha recibido una atención creciente como una tecnología novedosa para producir agua potable microbiológicamente segura a escala doméstica (Peter-Varbanets, et. al. 2010).

La tecnología por membrana accionada por gravedad utiliza membranas de microfiltración polimérica de hoja plana (MF) y ultrafiltración (UF) con tamaños de poro de unos pocos a cientos de nanómetros y presión hidrostática de la gravedad



(típicamente menos de 100 mbar) como la fuerza motriz para el funcionamiento de la membrana. Estudios previos han demostrado que los sistemas por membrana accionada por gravedad GDM basados en ultrafiltración pueden producir agua en flujos estables de 2-10L / (m<sup>2</sup>×h) durante varios meses o años sin ninguna medida de mantenimiento contra la suciedad de la membrana, como lavado de fondo o limpieza de membrana (Peter-Varbanets, et. al. 2010).

La filtración por membrana accionada por gravedad se considera una tecnología apropiada prometedora para la producción de agua potable en hogares en países de bajos ingresos debido a su bajo consumo de energía, operación de proceso simple y requisitos mínimos de mantenimiento (Peter-Varbanets, 2015). Opera en modo sin salida y, por lo tanto, la materia orgánica y las células biológicas en las aguas de alimentación se acumulan en la superficie de la membrana y forman biopelículas, lo que inevitablemente da como resultado una mayor resistencia a la penetración. Sin embargo, las materias orgánicas depositadas pueden degradarse biológicamente o desprenderse de la superficie de la membrana, lo que mantiene la resistencia a la penetración bajo ciertos niveles (Derlon, et. al. 2013).

Se sabe que las propiedades de la membrana, como el tamaño de poro, la porosidad, la rugosidad, la polaridad y la carga, afectan las conductas de bioincrustación, y a su vez, el flujo y la calidad del agua del permeado. Los estudios previos de filtración por membrana accionada por gravedad se han llevado a cabo principalmente utilizando membranas de polietersulfona con un límite molecular de 100kDa (Chomiak, et. al. 2014).

## **2.7 Adsorción**

Se ha descubierto que la adsorción es una técnica superior en comparación con otros métodos de tratamiento de aguas residuales en términos de efectividad, costo y simplicidad de diseño, facilidad de operación e insensibilidad a las sustancias tóxicas (Meshko, et. al. 2001).

La adsorción es uno de los métodos más efectivos y activados el carbono es el adsorbente más comúnmente usado. Sin embargo, a pesar de sus ventajas inherentes, como eficiencia y versatilidad, la adsorción de carbono sigue siendo un proceso costoso. Este hecho ha provocado un creciente interés en la producción de alternativas de bajo costo para los carbones activados (Gupta y Suhas, 2009).

Un adsorbente de bajo costo se define como uno que es abundante en la naturaleza, o es un subproducto o desperdicio de industria y requiere poco o ningún procesamiento. El proceso de adsorción es un fenómeno de superficie en el que los adsorbatos son atraídos a la superficie del adsorbente sólido y forman uniones a través de enlaces físicos o químicos (Foo & Hameed, 2009).

Las técnicas de adsorción se pueden utilizar con éxito para eliminar contaminantes de diversas naturalezas de las aguas residuales. Consisten en la retención de moléculas contaminantes en solución por la superficie de un adsorbente sólido (Ali & Gupta, 2007) (Ali, 2012) (Ali, 2014). La capacidad de adsorción de los materiales está influenciada por un número de factores, tales como la dosis de adsorbente y el tamaño, tiempo de contacto, la velocidad de agitación, temperatura, pH, naturaleza de adsorbente, y la fuerza iónica de la solución acuosa (Johnson, et. al. 2008).

### **2.7.1 Adsorción física**

Una de las dos formas de adsorción reconocidas es la que ocurre por fuerzas del tipo de Van Der Waals, entre un átomo o una molécula y la superficie. En este caso no existe un re-arreglo electrónico en el sistema y solo las fuerzas de atracción electrostáticas o atracciones dipolares son puestas en juego. A este tipo de interacción que ocurre sin modificación alguna de la molécula se le ha llamado adsorción física (Aguirre, 2009).

En la adsorción física las fuerzas que atraen a las moléculas a la superficie sólida del adsorbente son generalmente débiles, y el calor desprendido durante el proceso de adsorción es de 0.5 a 5 kcal/mol g el equilibrio entre la superficie sólida y el adsorbato se alcanza generalmente con rapidez, siendo fácilmente reversible, debido a que los requerimientos de energía son muy pequeños (Aguirre, 2009).

Además, la adsorción física no depende de las irregularidades en la superficie del adsorbente. Este fenómeno superficial depende en mayor medida de la extensión o área superficial con la que cuenta el material adsorbente ya que una mayor área superficial cuenta con un mayor número de sitios activos, los cuales son capaces de atraer a un mayor número de moléculas (Smith, 1986).

### **2.7.2 Adsorción química**

Casi todos los sólidos tienen la propiedad de fijar o adsorber en su superficie las moléculas, átomos o iones que se encuentran a su alrededor. En la superficie de un material podemos encontrar átomos que presentan orbitales disponibles. El número y tipo de estos orbitales depende de las características y estructura del material adsorbente. Cualquier átomo que tenga orbitales libres experimenta un conjunto de fuerzas no balanceadas. Esta situación conduce al fenómeno de energía libre superficial. Si alguna molécula con afinidad a estos orbitales libres se acerca lo suficiente, se produce un nuevo arreglo electrónico con el sistema, tal como se observa en una reacción química. El resultado es la fijación en la superficie a través de una adsorción química o quimisorción (Fuentes Moyado & Díaz Guerrero, 1988).

Algunas características de la quimisorción son:

- Hay especificidad, solo algunos sitios superficiales adsorben ciertas moléculas.
- Hay una interacción de los estados electrónicos del adsorbato y del adsorbente, lo que se traduce en la formación de un enlace químico.

- Como consecuencia de la reacción química superficial (rompiendo y formación de enlaces) se desprende una cantidad elevada de calor (Fuentes Moyado & Diaz Guerrero, 1988).

## 2.8 Acerca del adsorbente

El té verde es originario de Asia y es mundialmente conocido por sus propiedades medicinales y antioxidantes. En las últimas décadas del siglo pasado, el té verde retomó una importancia por sus propiedades curativas y analgésicas. De acuerdo a su composición química, las hojas de té verde contienen mucha fibra (carbohidratos insolubles en agua) y polifenoles (catequina, epicatequina, galocatequina, epilgalocatequinas-3-galato y otros), como se muestra en la figura 4. Estos grupos funcionales presentes en las hojas de té verde son de vital importancia para la adsorción, ya que la presencia de fibras en su estructura promueve la absorción de agua y por lo tanto aumenta la superficie específica para hacer más accesibles los centros de adsorción (por ejemplo; polifenoles) para los contaminantes.

En la actualidad no hay resultados reportados en la retención de los contaminantes con té verde, excepto un estudio con cromo 8, con resultados de la adsorción casi despreciables (Bellatin, et. al. 2014).

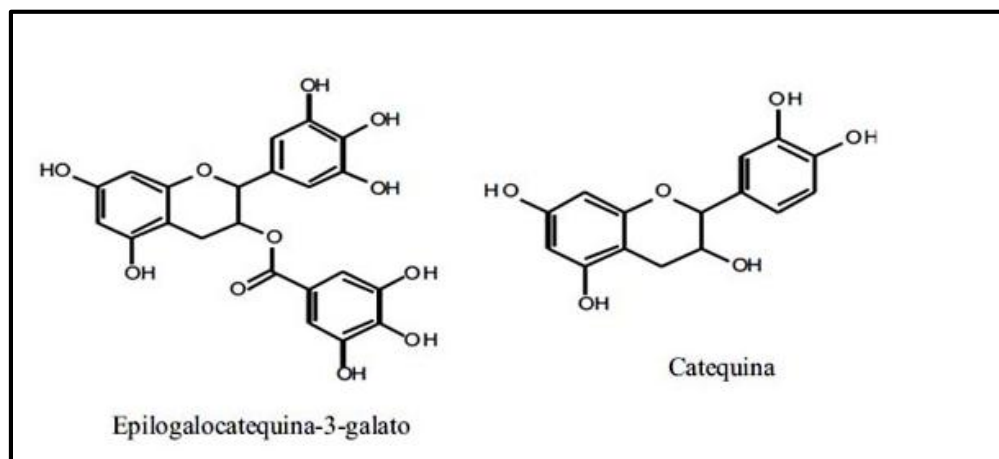


Figura 4. Estructura de algunos fenoles presentes en las hojas de té verde.  
Fuente. (Bellatin, et. al. 2014).

Después del agua, el té es la bebida más consumida en el mundo, como lo atestigua el más de 3, 000,000 de toneladas de hojas de té son producidas cada año (Wan, Li, & Zhang, 2008).

Aunque está disponible en diferentes variedades, como el té verde o té negro, todas las bebidas de té se obtienen de la misma base hojas de té (*Camellia sinensis L.*). Una vez que la bebida ha sido elaborada, las hojas de té usadas se convierten en un desperdicio que debe ser a disposición de. Por lo tanto, al igual que otros residuos de biomasa, las hojas de té usadas, representan uno de los muchos materiales de desecho destinados para el vertedero, así como un recurso no utilizado (Arvanitoyannis & Varzakas , 2008).

## **CAPÍTULO 3**

# **BIOSORCIÓN EN LA REMOCIÓN DE CONTAMINANTES, MODELOS TEÓRICOS Y VARIABLES QUE LA AFECTAN**

### **3.1.- Biosorción**

El término biosorción, se utiliza para referirse a la captación de metales que lleva a cabo una biomasa completa (viva o muerta) a través de mecanismos fisicoquímicos como la adsorción o el intercambio iónico. Cuando se utiliza biomasa viva, los mecanismos metabólicos de captación también pueden contribuir en el proceso (Holan & Volesky, 1995).

El proceso de biosorción involucra una fase sólida (sorbente) y una fase líquida (solvente, que es normalmente el agua) que contiene las especies disueltas que van a ser sorbidas (sorbato, por ejemplo; iones metálicos). Debido a la gran afinidad del sorbente por las especies del sorbato, este último es atraído hacia el sólido y enlazado por diferentes mecanismos. Este proceso continúa hasta que se establece un equilibrio entre el sorbato disuelto y el sorbato enlazado al sólido (a una concentración final o en el equilibrio). La afinidad del sorbente por el sorbato determina su distribución entre las fases sólida y líquida. La calidad del sorbente está dada por la cantidad del sorbato que puede atraer y retener en forma inmovilizada (Kuyucak & Volesky, 1986).

En la última década, el potencial para la biosorción de contaminantes por biomasa ha quedado bien establecido. Por razones económicas, resultan de particular interés los tipos de biomasa abundante, como los desechos generados por fermentaciones industriales de gran escala o de ciertas algas que enlazan metales y se encuentran en grandes cantidades en el mar. Algunos de estos tipos de biomasa que absorben metales en cantidades elevadas, sirven como base para los procesos de biosorción de contaminantes, previendo su uso particularmente como medios muy competitivos para la destoxificación de efluentes industriales contaminados (Greene, et. al. 1986).

### **3.2 Materiales empleados, para remover contaminantes.**

El tratamiento consiste en la remoción de contaminantes o iones metálicos en soluciones acuosas a través de un biosorbente que es un biomaterial, que están de forma inerte y que posee ciertas características para poder eliminar casi en su totalidad dichos contaminantes por diferentes mecanismos que incluyen a la quimisorción (intercambio iónico, complejación, coordinación y quelación, microprecipitación), la adsorción física y/o la micro precipitación (Volenskki, 2001).

En términos generales implica la retención pasiva (no hay consumo de energía metabólica) de los metales pesados presentes en soluciones acuosas mediante el uso de materiales biológicos no vivos o no activos metabólicamente, a los que se les denomina “biosorbentes” (Volesky, 2003).

Canizares-Villanueva (2000) y Martin Lara (2008) mencionan que algunas de las ventajas que se tiene al utilizar la biosorción es la disponibilidad de los biomateriales, los procesos no están gobernados por limitaciones biológicas de toxicidad o inactivación térmica, es rápida y eficiente en la eliminación de metales que después pueden ser liberados fácilmente y recuperados por medio de soluciones ácidas. Sin embargo, como cualquier técnica, tiene sus desventajas entre las cuales se encuentra; la rápida saturación del biosorbente, el secuestro por adsorción es sensible al pH, el estado de valencia del metal no puede ser alterado biológicamente (Cañizares-Villanueva, 2000) y (Martín Lara, 2008).

Debido a la diversificación de la técnica de biosorción, existen una gran cantidad de biosorbentes que son factibles en la remoción de metales, en la Tabla 2 se muestran algunos ejemplos de los cuales existen estudios en donde se determina su efectividad. Lara (2008) hace una clasificación de los biomateriales con respecto sus características fisicoquímicas (Martín Lara, 2008), que a continuación se señalan:



- *Cortezas y materiales ricos en taninos*: La corteza de árbol es un residuo de madera que resulta efectiva como adsorbente debido a su alto contenido en taninos. El principal constituyente de los taninos es el ácido gálico y los componentes con grupos polihidroxi-polifenol son las especies activas en el proceso de adsorción. Sin embargo uno de los problemas que presentan este tipo de biosorbentes es que dan color al agua por la presencia de fenoles solubles.
- *Lignina*: Es un residuo de la industria papelera, y su capacidad de adsorción se debe a los fenoles y otros grupos funcionales presentes en su superficie. El intercambio iónico es uno de los mecanismos más importantes de la biosorción por lignina.
- *Quitosán*: Es el producto desacetilado de la quitina, la cual se encuentra formando parte del exoesqueleto de los crustáceos, es un polisacárido y constituye el segundo polímero natural más abundante después de la celulosa. Su gran capacidad de remoción de metales es atribuida a su alto carácter hidrofílico.
- *Turba (carbón)*: material complejo con materia orgánica en descomposición que contiene lignina y celulosa principalmente, contiene grupos funcionales polares, como alcoholes, aldehídos, ácidos, hidróxidos fenólicos y ésteres lo que lo convierten en un adsorbente efectivo.
- *Algas*: Debido a las propiedades de intercambio iónico asociadas a su contenido en polisacáridos. Las algas constituyen una importante fuente de biosorbentes. Las algas tienen una alta afinidad de unión con metales pesados, sus paredes celulares tienen diferentes grupos funcionales (tales como carboxilo, fosfato hidroxilo, o amina) que puede unirse a iones metálicos y, dependiendo del pH, estos grupos son bien protonados o desprotonados (Saeed & Iqbal, 2005) (Murphy, Hughes, & McLoughlin, 2009).

- *Hongos y Levaduras*: Presentan una alta eficiencia en la remoción de metales en soluciones acuosas, ya que algunos grupos funcionales de sus células actúan como sitios activos para captar iones metálicos. Muchas especies de hongos, como *Aspergillus niger* (Liu, 2006) *Mucor rouxi* (Yan & Viraraghavan, 2006) *Phanerochaete chrysosporium* (Iqbal & Edyvean, 2004) *Phomopsis sp.* (Saiano, et. al. 2005) *Polyporus versicolor* (Satiroglu, et. al. 2002) y *Trametes versicolor* (Jarosz-Wilkolazka, et. al. 2002) han sido probados y la capacidades de biosorción de metal para la mayoría de estos hongos es muy atractivo.

**Tabla 2.** Diferentes trabajos realizados con biomasa

BIOMATERIAL	METAL	CAPACIDAD DE BIOSORCIÓN	AUTOR
Azadirachta indica	Zn	33.49 mgg <sup>-1</sup>	(King, et. al. 2008)
Pinus brutia Ten (corteza de pino)	Pb(II)	76.8 mgg <sup>-1</sup>	(Gundogdu, et. al. 2009)
Eriobotrya japonica (corteza de níspero)	Ni(II)	27.548 mgg <sup>-1</sup>	(Salem & Awwad, 2011)
Ligninas kraft y organosolv	Cu y Cd	80.6 mmolg <sup>-1</sup> y 28.7 mmolg <sup>-1</sup>	(Harmita, Karthikeyan , & Pan, 2009)
Caparazón del cangrejo	Hg	80% a partir de 500 mgL <sup>-1</sup> en 60 min.	(Rae , Stuart , & Shuguang, 2009)
Caparazón del cangrejo Turba con algas tratadas	Zn(II)	Entre 105.6 y 67.6 mgg <sup>-1</sup>	(Shuguang, Stuart , & Cochrane, 2007)
Caparazón del cangrejo Turba con algas tratadas	_____	Remoción de metales a un pH de 3.0	(Lourie & Gjengedal, 2011)
Turba	Fosfato	8.91 mgg <sup>-1</sup>	(Xiong & Mahmood, 2010)

BIOMATERIAL	METAL	CAPACIDAD DE BIOSORCIÓN	AUTOR
Saccharomyces cerevisiae (levadura pastelera)	Cd	_____	(Vasudevan, Padmavathy, & Dhingra, 2003)

Fuente: Propia del autor, 2018.

La efectividad de los biomateriales no solo depende de sus características fisicoquímicas sino también de las variables como el tiempo de equilibrio, temperatura, pH, fuerza iónica, pretratamiento del biosorbente y la presencia de otros iones de metales (Naja, 2010).

El tiempo de equilibrio es el instante a partir del cual se satura el biosorbente, por lo que no aumenta la cantidad de colorante eliminado. La mayoría de los investigadores indican que el proceso es rápido, ya que entre 15 y 30 minutos ya se ha retirado un porcentaje considerable del colorante. El efecto de la temperatura presenta diferentes comportamientos dependiendo del biosorbente y el colorante.

### 3.3 Casos de estudio para colorantes

Para este trabajo se analizaron algunas investigaciones científicas que efectuaron remociones de colorantes orgánicos disueltos en fase acuosa, para lo cual emplearon biomateriales y entre estas tenemos:

- Los *tallos de girasol* mostraron la eliminación de tintes orgánicos y colorantes de los efluentes textiles. Los tallos de girasol adsorbieron dos tintes básicos (Azul de Metileno y rojo básico 9) y dos tintes directos (rojo Congo y azul directo 71) en soluciones acuosas. El potencial de adsorción de dos colorantes básicos en tallos de girasol fue muy alto en comparación con dos tintes directos. La adsorción máxima de Azul de Metileno y rojo básico 9 fue de 205 y 317 mg/g<sup>-1</sup>, respectivamente (Sun & Xu , 1997).
- Los *desechos de café* (residuos de café no tratados) de las industrias también demostraron ser buenos adsorbentes de bajo costo para la

eliminación de colorantes (reactivos y básicos) a partir de soluciones acuosas de un solo componente (Kyzas , Lazaridis , & Mitropoulos, 2012).

- *Caparazón de almendra (Prunus amygdalus)* mostró capacidad de adsorbente de bajo costo para la eliminación de naranja de metilo a partir de medios acuosos (F, 2013).
- El *orujo de manzana, la cáscara de arroz y la paja de trigo* también mostraron capacidad para eliminar los colorantes de la solución acuosa (Robinson, Chandran, & Nigam, 2002).
- La *hoja del árbol de Phoenix*, fruta de la pasión amarilla (*Passiflora edulis*), un polvo se probó como adsorbente para la eliminación de un colorante catiónico y Azul de Metileno, a partir de soluciones acuosas (Han, et. al. 2007).
- La cantidad máxima del colorante Azul de Metileno adsorbida por *maracuyá* fue de  $44.70 \text{ mg/g}^{-1}$ . El carbón activado preparado a partir de subproductos agrícolas también mostró potencial para eliminar colorantes de soluciones acuosas (A, 2008).
- La *cáscara de naranja y cáscara de plátano* mostró capacidad para eliminar el Azul de Metileno del agua residual (Velmurugan, Rathina, & Dhinakaran, 2011).
- Las *hojas de té* usadas, un desecho sólido, mostraron potencial para la eliminación de dos colorantes azoicos, Reactive Green 19 (RG19) y Reactive Violet 5 (RV5), de aguas contaminadas (Zuorro, et. al. 2013).
- Los *carbonos activados* preparados a partir de desechos agrícolas como el casco de maní, cáscaras de guisantes, paja de trigo y bagazo han mostrado potencial para eliminar los tintes de las aguas residuales (A, 2009).

### 3.4. Isotherma de adsorción

En este punto se desglosan los modelos teóricos de las isothermas de adsorción que se analizaron para determinar como el colorante Azul de Metileno se adsorbe sobre el biomaterial. Los tipos de isoterma son:

#### 3.4.1 Modelo de Langmuir

Este tipo de modelo se ha aplicado favorablemente en los procesos de sorción de diversos contaminantes y es el más utilizado para describir la adsorción de soluto en soluciones acuosas, formando una monocapa del soluto en la superficie del sorbente. En donde se muestra la isoterma correspondiente, la cual muestra que la adsorción del colorante sobre el biomaterial se presenta en forma de monocapa. Lo anterior se corrobora por la relación encontrada en el coeficiente  $r^2$  de la ecuación de la recta que relaciona  $C_e$  (concentración del colorante después del tiempo de contacto) y  $q_e$  (cantidad de colorante adsorbido en un gramo del biomaterial).

La ecuación [1] muestra la isoterma de Langmuir

$$q_e = \frac{Q_o b C_e}{1 + b C_e} \quad [1]$$

Donde:

$q_e$  = Cantidad de soluto adsorbido por peso unitario de adsorbente ( $\text{mgg}^{-1}$ )

$Q_o$  = Cantidad de moles soluto adsorbido que forma una monocapa por peso unitario de adsorbente ( $\text{mgg}^{-1}$ )

$b$  = Constate empirica ( $\text{L mg}^{-1}$ )

$C_e$  = Concentración en equilibrio ( $\text{mgL}^{-1}$ )

### 3.4.2 Modelo de Freundlich

Este modelo empírico, representa el proceso de adsorción ideal de formación de multicapas en superficies heterogéneas; considerando que los sitios de adsorción son ocupados primero por enlaces fuertes y que la fuerza del enlace decrece al incrementar la ocupación de sitios de adsorción.

El modelo de isoterma Freundlich se utiliza para describir proceso de adsorción heterogéneo, es decir, adsorción que se lleva a cabo en una superficie heterogénea a través de un multicapa mecanismo de adsorción.

La ecuación [2] muestra el modelo de Freundlich:

$$\mathbf{Log\ Q_e = Log\ K_f + 1/n\ Log\ C_e} \quad [2]$$

Donde:

$q_e$  = Cantidad de soluto adsorbido por peso unitario de adsorbente ( $\text{mgg}^{-1}$ )

$K_f$  = Constante de Freundlich ( $\text{mgg}^{-1}$ )

$1/n$  = Coeficiente de Freundlich

$C_e$  = Concentración en equilibrio ( $\text{mgL}^{-1}$ )

### 3.5 Factores que afectan el proceso de adsorción

En el proceso de adsorción existen variables que tienen un efecto directo en el desarrollo del fenómeno, a continuación se muestran las siguientes:

#### 3.5.1 Influencia del pH en la adsorción

El valor del pH de la fase acuosa es el factor más importante tanto en la adsorción de cationes como aniones, siendo el efecto distinto en ambos casos. Así, mientras que la adsorción de cationes suele estar favorecida para valores de pH superiores a 4.5, la adsorción de aniones prefiere un valor bajo de pH, entre 1.5 y 4 (Schiewer & Volensky, 1995) (Kratochvil, 1998) (Baes & Mesmer, 1976).

El estado químico del sitio activo (aquel sitio de interacción entre el catión metálico y la superficie polar cargada del adsorbente) podría cambiar el valor del pH, cuando el grupo de unión del metal es débilmente ácido o básico, la disponibilidad del sitio libre depende del pH (Morel , 1983) (Morrison, 1987).

### **3.5.2 Influencia de la temperatura en la adsorción**

Es bien conocido que “la temperatura es uno de los factores que más influyen en los procesos de adsorción” (Kuyack & Volensky, 1989). Un aumento hasta 40° C provoca solo una pequeña mejora en la retención, mientras que a una temperatura de 60° C o superior se produce un cambio en la textura del adsorbente y una pérdida en la capacidad de adsorción debido al deterioro del material (Villanueva, 2017).

### **3.5.3 Concentración del sorbato**

Todo material que se emplea en el proceso de adsorción presenta varias características, las cuales a su vez ayudan a justificar que es lo que está sucediendo en este fenómeno, a continuación se mencionan las siguientes:

#### a) Área superficial y estructura porosa

Que es el área superficial a mayor área, mayor número de sitios activos disponibles y una mayor adsorción, esto es válido para áreas de hasta 1500 m<sup>2</sup>/g (McGuire & Suffet, 1978).

#### b) Granulometría

La reducción del tamaño de partícula aumenta la velocidad de adsorción (Najm, et. al. 1990).

#### c) Composición química

Dependiendo de los grupos funcionales en la superficie del adsorbente será la selectividad de la adsorción (Bourbigot, Dodin, & Lheritier, 1981).

#### d) Características en la adsorción de moléculas orgánicas:

- La adsorción de moléculas orgánicas es más fuerte al aumentar su peso molecular, mientras el tamaño de la molécula no rebase al tamaño del poro.
- Las moléculas orgánicas no polares se adsorben con mayor fuerza que las polares
- Las moléculas orgánicas ramificadas se adsorben con mayor fuerza que las lineales.
- La mayoría de las moléculas orgánicas que tienen ligados átomos de cloro, bromo o yodo, se adsorben con mayor fuerza (McGuire & Suffet, 1978).

e) Dureza

Si la partícula no resiste la abrasión durante el retro lavado y la regeneración, se pierde una cantidad importante de sitios activos del sistema (Bourbigot, Dodin, & Lheritier, 1981).



# **CAPÍTULO 4**

## **METODOLOGÍA EXPERIMENTAL**

## 4.1 Métodos y materiales

En este apartado se describen las etapas de las actividades que desarrollaron en la investigación, y de manera resumida se presenta a continuación la siguiente Figura 5

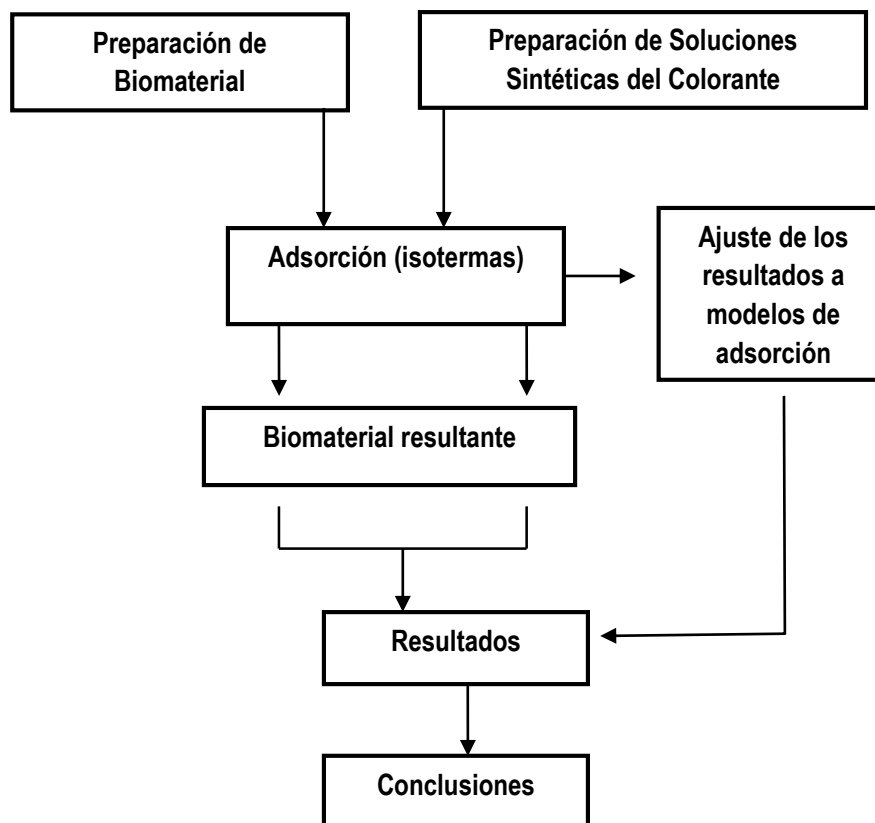


Figura 5. Diagrama de las etapas de la investigación  
Fuente. Elaboración propia

A continuación, se muestra del desglose de las diferentes etapas por las cuales se efectuó la investigación.

## 4.2 Preparación de biomaterial a emplearse de manera natural y con tratamiento químico

En cuanto a este punto a continuación se enumeran las siguientes actividades:

#### **4.2.1 Secado**

En este tratamiento se utilizaron residuos orgánicos de té verde, los cuales se secaron por 7 días a los rayos del sol, posteriormente se terminaron de deshidratar a 70 °C por 5 horas en una estufa del laboratorio.

#### **4.2.2 Tamizado**

Una vez seca la biomasa se hizo pasar por una por una malla de 40 mesh a fin de tener un tamaño de partícula homogéneo.

#### **4.3 Soluciones sintéticas del colorante**

Se pesaron 0.5 gr del colorante y se transfirieron a un matraz aforado de 1 L con la finalidad de preparar una solución madre de 500 mgL<sup>-1</sup>. Posteriormente de la solución madre mediante diluciones, se prepararon soluciones de 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60 y 70 mgL<sup>-1</sup> del mismo elemento.

Con estas soluciones se preparó la curva patrón con la cual se trabajó en cuanto a la determinación de la cantidad de colorante removido de las soluciones que se puso en contacto con el biomaterial.

#### **4.4 Fenómeno de Adsorción**

En este punto se desglosa el tiempo de contacto:

##### **4.4.1 Tiempo de contacto**

De cada una de estas soluciones del colorante se tomaron 10 mL de muestra y se pusieron en contacto con la biomasa del té verde (100 mg) en tubos de ensayo. Mediante agitación mecánica por medio de un rotor se llevó a cabo la adsorción, los tiempos de contacto fueron de 5, 10, 15, 20, 25, 30, minutos, este proceso se realizó por triplicado.

##### **4.4.2 Determinación de remoción de colorante**

Una vez llevada a cabo la adsorción, para cada una de las soluciones se procedió a la separación del biomaterial, mediante filtración. La solución resultante contenía el colorante no adsorbido por el biomaterial, a estas soluciones se les determino la cantidad de colorante disuelto. Esto se realizó midiendo la absorbancia de las muestras resultantes en un equipo de espectrofotometría de ultravioleta. Dicha absorbancia fue transformada a concentración mediante la correspondiente

ecuación de la recta que el mismo equipo genero de soluciones patrones del colorante a diferentes concentraciones.

#### 4.5 Estudio de las Isotermas

El estudio de los modelos teóricos de la adsorción, que en este caso es una biosorción, ayudan a entender el comportamiento del analito (colorante) con respecto a la superficie del material. Es decir, la interpretación de como el colorante se adhiere a la pared de las superficies de las moléculas del té. Con el modelo de Langmuir el argumento teórico señala que el contaminante se adsorbe sobre el biomaterial formando una monocapa en una superficie homogénea. Por el contrario con el modelo de Freundlich la argumentación señala que el analito se adsorbe formando una monocapa pero con la diferencia de una superficie heterogénea.

Con estas interpretaciones y con los datos que se obtuvieron, se calcularon las respectivas isotermas teóricas de los autores mencionados después del fenómeno de adsorción. Las fórmulas de cada uno de los modelos con base en son las siguientes:

##### 4.5.1 Modelo de la isoterma de Langmuir

$$q_e = \frac{Q_o b C_e}{1 + b C_e}$$

Donde:

$q_e$  = Cantidad de soluto adsorbido por peso unitario de adsorbente ( $\text{mgg}^{-1}$ )

$Q_o$  = Cantidad de moles soluto adsorbido que forma una monocapa por peso unitario de adsorbente ( $\text{mgg}^{-1}$ )

$b$  = Constante empirica ( $\text{L mg}^{-1}$ )

$C_e$  = Concentración en equilibrio ( $\text{mgL}^{-1}$ )

##### 4.5.2 Modelo de la isoterma de Freundlich

$$\text{Log } q_e = \text{Log } K_f + \frac{1}{n \text{Log } C_e}$$

Dónde:

$q_e$  = Cantidad de soluto adsorbido por peso unitario de adsorbente ( $\text{mgg}^{-1}$ )

$K_f$  = Constante de Freundlich ( $\text{mgg}^{-1}$ )

$1/n$  = Coeficiente de Freundlich

$C_e$  = Concentración en equilibrio ( $\text{mgL}^{-1}$ )

#### **4.6. Determinación de la DQO**

De las soluciones que se filtraron de los tiempos de contacto se recolectaron y se determinó la variable de la Demanda Química de Oxígeno. Esto con la finalidad de valorar el grado de disminución del colorante en el agua que fue tratada por el proceso de biosorción.

#### **4.7. Normas Oficiales Mexicanas**

Debido a la transversalidad del sector hídrico, existen diversas normas aplicables al tema de agua. Cabe destacar que, conforme a la Ley Federal sobre Metrología y Normalización, las Normas Oficiales Mexicanas (NOM), son regulaciones técnicas de observancia obligatoria, en tanto que las Normas Mexicanas (NMX) son de aplicación voluntaria.

Actualmente, México no cuenta con alguna normatividad específica que se encargue de regular la cantidad de color en los efluentes provenientes de industria, principalmente, en la industria textil. Sin embargo, existe una preocupación por eliminar el color de las aguas residuales (Alamillo Lopez, 2011).

La regulación de colorantes artificiales para la elaboración de productos de consumo humano, es un tema que le compete a la Secretaría de Salud (SSA). Entre las Normas Oficiales Mexicanas en las que ha regulado el uso y consumo de colorante se mencionan las siguientes; NOM-036-SSA1-1993, NOM-086-SSA1-1994, NOM-120-SSA1-1994, NOM-131-SSA1-1995, NOM-147-SSA1-1996, NOM-185-SSA1-2002, NOM-213-SSA1-2002, NOM-038-SSA1-1993 estableciendo las especificaciones de identidad y pureza de los colorantes orgánicos sintéticos para su aplicación en alimentos productos de perfumería y belleza.

La NOM-127-SSA1-1994, habla de “Salud ambiental, agua para uso y consumo humano, límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización” y expone que el límite permisible de color en el agua es de 20 unidades de color verdadero en la escala de platino- cobalto (SSA, 1994).

En el 2002, la Secretaria de Salud dio a conocer la NOM-201-SSA1-2002 “Productos y servicios de agua y hielo para consumo humano, envasados y a granel. Especificaciones sanitarias” donde se explica que estos productos no pueden más de 15 unidades de color verdadero en la escala de platino cobalto (SSA, 2002).

# **CAPÍTULO 5**

## **RESULTADOS**

### 5.1 Resultados del tratamiento del biomaterial

Después del secado del biomaterial, se hizo pasar por una malla de 40 mesh, para homogenizar el tamaño de partícula posteriormente se lavó en repetidas ocasiones el biomaterial con alcohol etílico al 100%.

### 5.2 Espectros de remoción del colorante Azul de Metileno

Para realizar esta actividad se colocaron las muestras de las soluciones de todos los tiempos de tratamiento en tubos de ensayo y agregaron a cada tubo 100 mg de la biomasa, se pusieron en contacto con las soluciones sintéticas del colorante Azul de Metileno, se procedió al respectivo proceso de adsorción. Finalizado lo anterior se realizaron las filtraciones para recuperar las biomásas manipuladas, las soluciones restantes fueron llevadas al equipo de espectrofotometría de Ultravioleta para determinar el porcentaje de remoción.

Esto se muestra en las siguientes figuras.

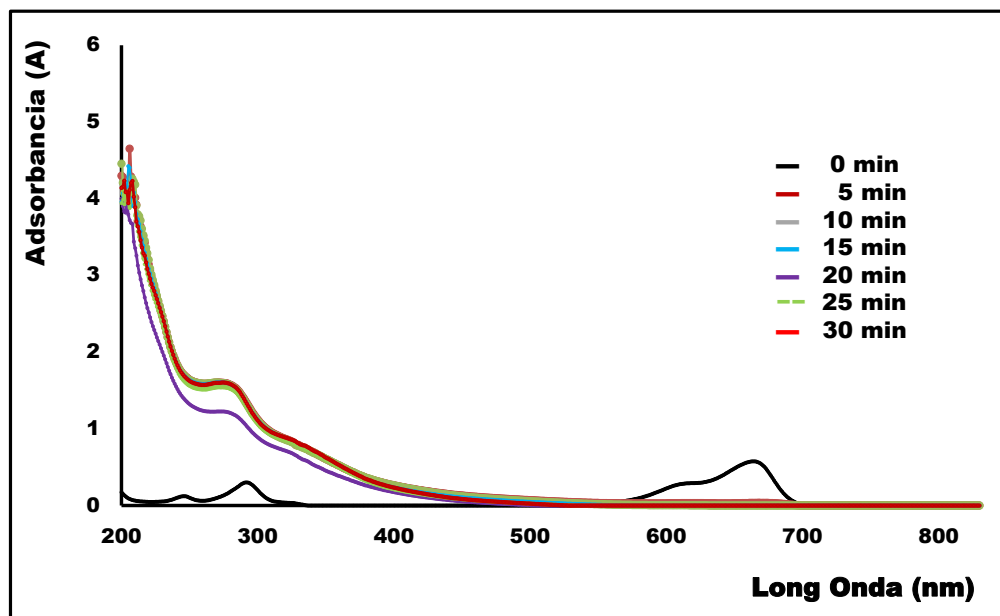
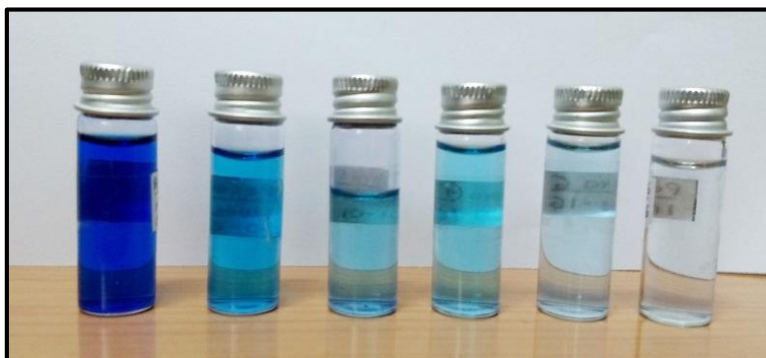


Figura 6. Espectro de remoción del colorante Azul de Metileno a  $5 \text{ mgL}^{-1}$   
Fuente. Elaboración propia del autor, 2018.

En la Figura 6 se puede apreciar en color negro del colorante ( $5 \text{ mL}^{-1}$ ) sin proceso de adsorción. En el rango de 600 y 700 nm se aprecia un pico el cual corresponde al colorante. Las posteriores ondas de color corresponden al tiempo de tratamiento



se puede apreciar que el pico señalado (660 y 700 nm) ha desaparecido, esto indica que parte del colorante ha sido adsorbido. Sin embargo se puede apreciar también que el rango de 400 a 200 nm se tiene otras especies químicas diferentes al colorante. Esto debido a que el residuo de té verde fue tratado con alcohol propiciando la liberación de otras sustancias químicas que contenía el residuo de té verde. Y que a simple vista no se pudieron apreciar ya que son incoloras. Cabe resaltar que todas las soluciones del colorante al inicio son de color azul y conforme se llevó a cabo el proceso de contacto en función de los tiempos de contacto la coloración disminuía. Esto se muestra en la Figuras 7 y 8 que corresponden a las concentraciones de 30 y 50 mgL<sup>-1</sup>.



**Figura 7. Frascos con colorante de 30 mgL<sup>-1</sup>, en el tiempo cero y con tiempos de tratamiento.**



**Figura 8. Frascos con colorante de 50 mgL<sup>-1</sup>, en el tiempo cero y con tiempos de tratamiento.**

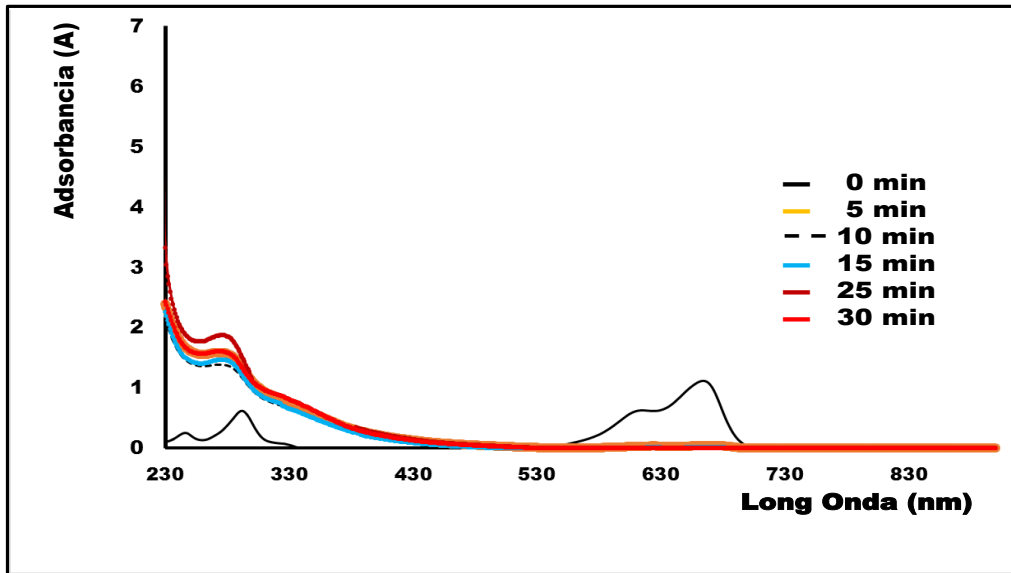


Figura 9. Espectro de remoción del colorante Azul de Metileno a  $10 \text{ mgL}^{-1}$   
Fuente. Elaboración propia del autor, 2018.

En la Figura 9 se puede apreciar el pico característico del Azul de Metileno a (660-700 nm) sin tratamiento de remoción que corresponde a los 0 minutos. Los colores de las demás ondas que corresponden a los minutos de 5 a 30 minutos de tratamiento y muestran claramente la remoción del colorante. Esto se corrobora ya que en todas estas ondas no aparece el pico correspondiente del colorante Azul de Metileno.

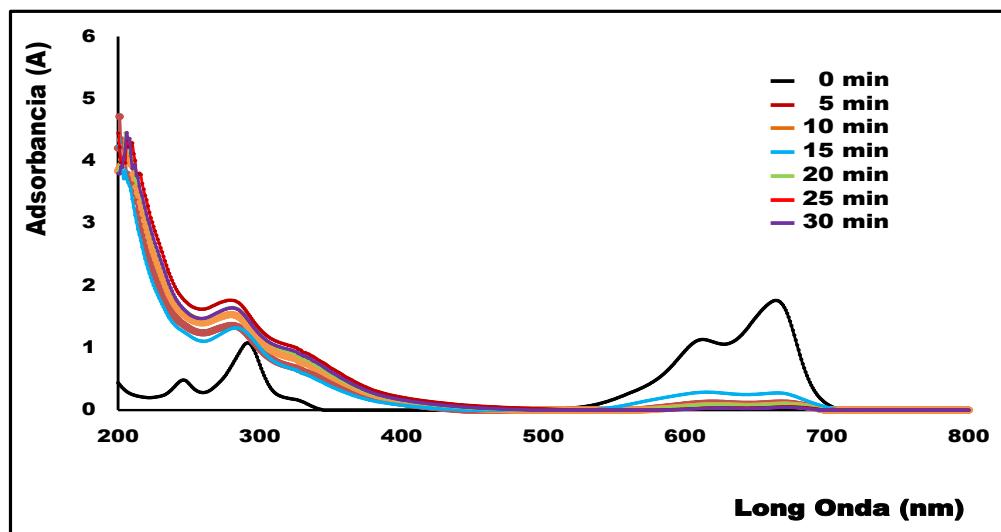


Figura 10. Espectro de remoción del colorante Azul de Metileno a  $20 \text{ mgL}^{-1}$   
Fuente. Elaboración propia del autor, 2018.

En la Figura 10 se puede apreciar claramente que conforme aumenta la concentración del colorante la remoción va disminuyendo, esto se establece con el comportamiento de las ondas de los diferentes tiempos de tratamiento. En las Figuras 6 y 9 los picos del colorante son nulos, pero en esta Figura 10 se pueden detectar que en el intervalo de longitud de onda seleccionado los picos de las ondas son tenues. Con esto se determina que el biomaterial empieza a decrecer en su porcentaje de remoción.

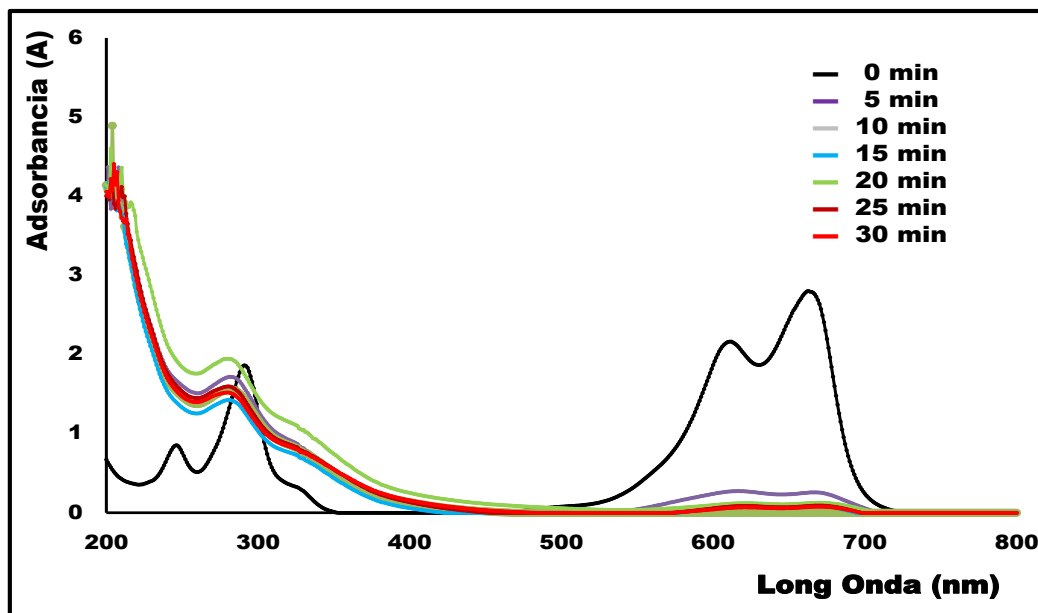


Figura 11. Espectro de remoción del colorante Azul de Metileno a  $30 \text{ mgL}^{-1}$   
Fuente. Elaboración propia del autor, 2018.

En la Figura 11 se puede apreciar nuevamente el comportamiento del proceso de remoción, que es que al aumentar la concentración del colorante el porcentaje de remoción sufre una disminución en eficiencia. Este mismo comportamiento se observó en las soluciones de  $40$  y  $50 \text{ mgL}^{-1}$ , que corresponden a las Figuras 12 y 13.

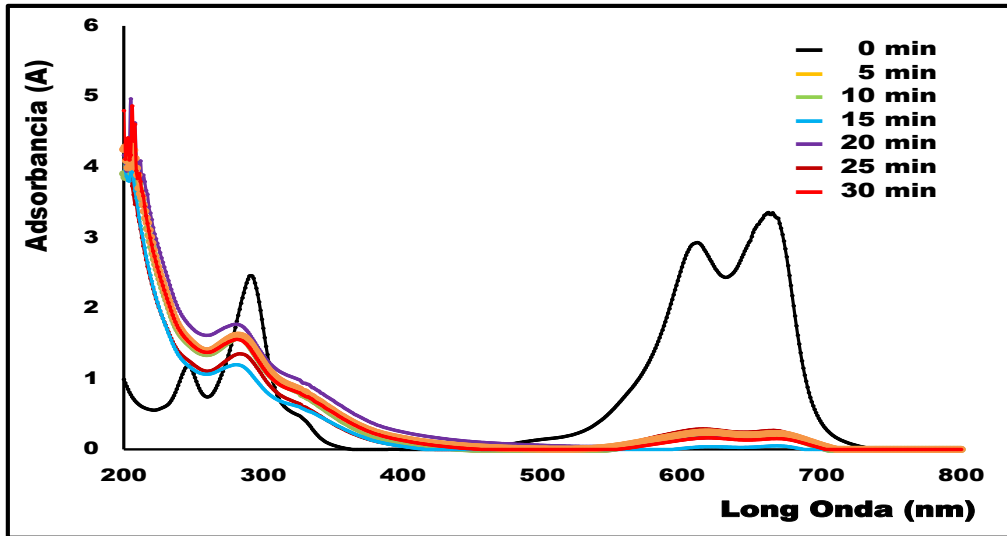


Figura 12. Espectro de remoción del colorante Azul de Metileno a  $40 \text{ mgL}^{-1}$   
Fuente. Elaboración propia del autor, 2018.

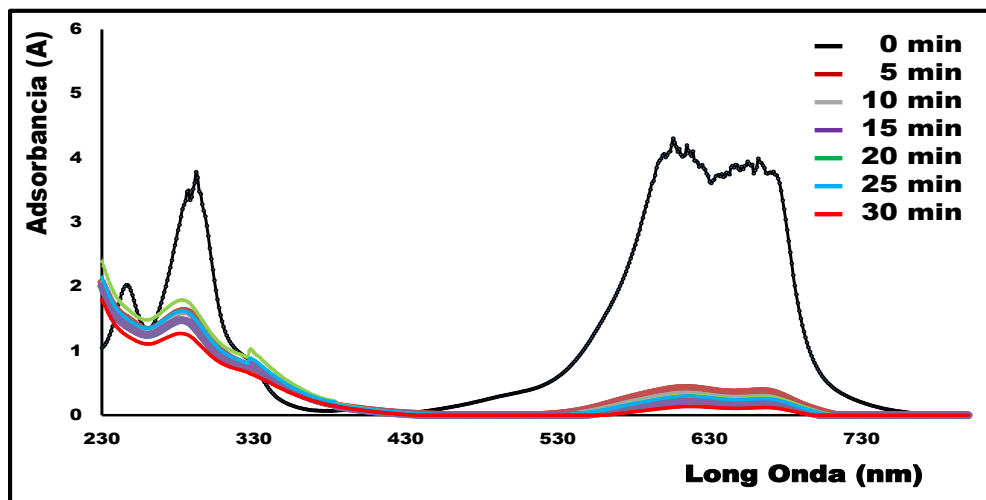


Figura 13. Espectro de remoción del colorante Azul de Metileno a  $50 \text{ mgL}^{-1}$   
Fuente. Elaboración propia del autor, 2018.

### 5.3. Determinación del porcentaje de remoción después del contacto

Como se señaló anteriormente los resultados de absorbancia fueron transformados en concentración mediante el equipo de espectrometría de ultravioleta. Estas transformaciones se muestran en la Tabla 3, donde se puede apreciar las concentraciones iniciales del colorante y las concentraciones finales después del tratamiento.

**Tabla 3. Resultados de remoción del colorante Azul de Metileno con el biomaterial**

<b>Concentración / solución inicial</b>	<b>Tiempo (min)</b>	<b>Concentración de colorante en el agua (mgL<sup>-1</sup>)</b>	<b>% Porcentaje de remoción</b>
5 ppm	5	0.16	96.8
	10	0.1	99
	15	0.075	99.5
	20	0.1	99.5
	25	0.125	99.5
	30	0.15	99.5
10 ppm	5	0.289	94.22
	10	0.319	96.81
	15	0.255	98.3
	20	0.34	98.3
	25	0.425	98.3
	30	0.51	98.3
20 ppm	5	0.3165	92.37
	10	0.557	94.93
	15	0.807	95.87
	20	1.076	95.96
	25	1.3325	96.7
	30	1.599	96.7
30 ppm	5	0.3815	91.8
	10	0.507	91.04
	15	0.6195	94.51
	20	0.808	95
	25	0.825	95.26
	30	0.99	95.26
40 ppm	5	0.41	93.67
	10	0.896	94.43
	15	0.8235	94.62
	20	1	94.62
	25	1.185	94.67
	30	1.422	94.67

Concentración / solución inicial	Tiempo (min)	Concentración de colorante en el agua (mgL <sup>-1</sup> )	% Porcentaje de remoción
50 ppm	5	0.4815	90.37
	10	0.777	92.23
	15	0.807	94.62
	20	1.036	94.82
	25	1.275	94.9
	30	1.509	94.97
60 ppm	5	0.485	90.3
	10	0.747	92.53
	15	1.0065	93.29
	20	1.312	93.44
	25	1.64	93.44
	30	1.968	93.44

Fuente. Elaboración propia del autor, 2018.

Como se señaló previamente de la Tabla 3 se determinaron los porcentajes de remoción que se obtuvieron del uso de la espectrofotometría de ultravioleta. De estos resultados se realizaron las respectivas graficas de remoción que muestran el grado de reducción en la concentración del colorante Azul de Metileno en función del tiempo de tratamiento.

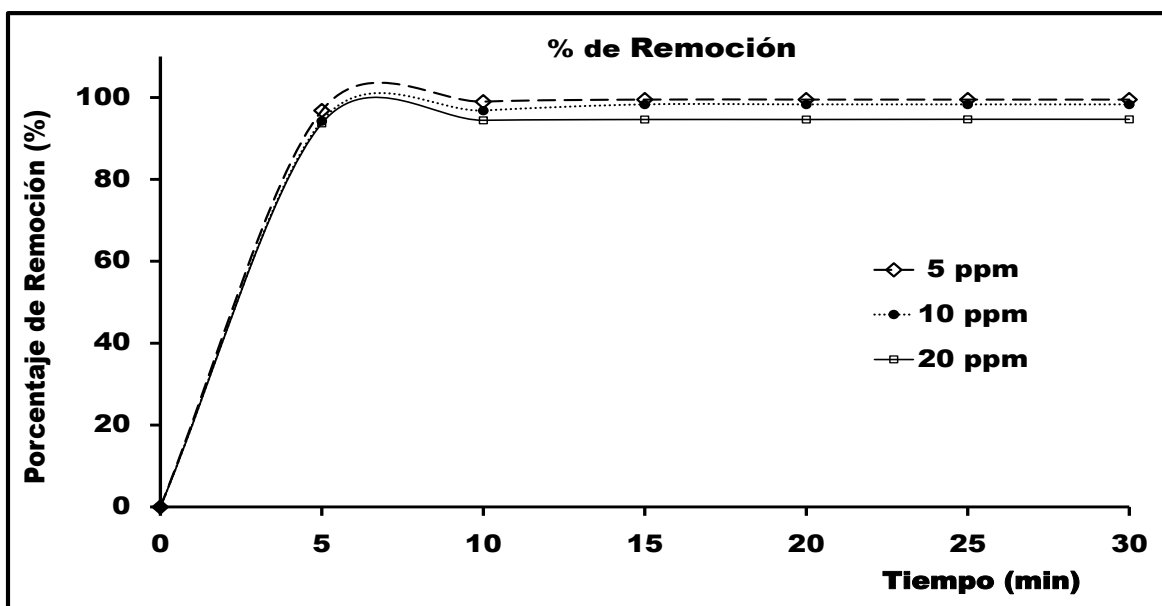


Figura 14. Porcentaje de remoción del colorante a las concentraciones de 5, 10 y 20 ppm de Azul de Metileno. Fuente. Propia del autor, 2018.

En la Figura 14 se muestran los porcentajes de remoción de las concentraciones de Azul de Metileno a 5, 10 y 20 ppm. En este caso se puede apreciar claramente que a los 5 minutos para las tres concentraciones se alcanza casi 100 % de remoción y posteriormente se tiende a pequeños incrementos en cuanto al valor de porcentaje de remoción. Siendo el 5 ppm en el cual se alcanzan porcentajes cercanos al 100%. De igual manera en la Figura 15. Se muestran las gráficas de remoción del colorante a las concentraciones de 30, 40, 50 y 60 ppm de Azul de Metileno.

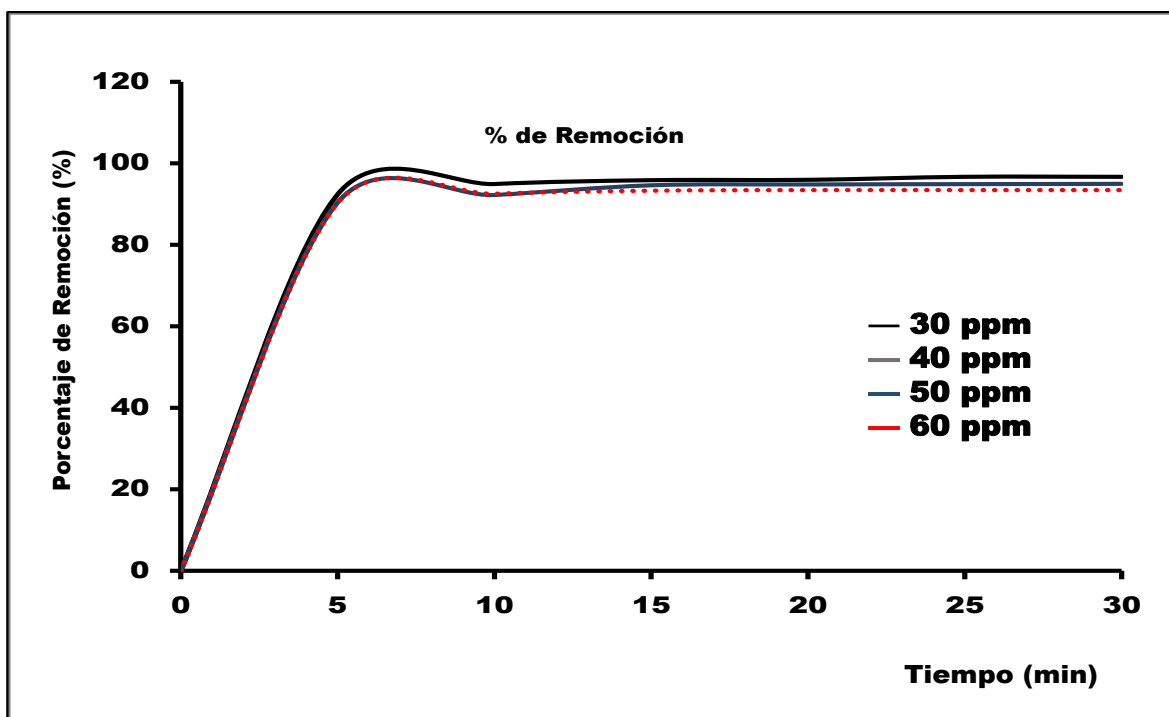


Figura 15. Porcentaje de remoción del colorante a las concentraciones de 30, 40, 50 y 60 ppm de Azul de Metileno. Fuente. Elaboración propia del autor, 2018.

En la Figura 15, se muestran los porcentajes de remoción del Azul de Metileno a concentraciones de 30, 40, 50 y 60  $\text{mgL}^{-1}$  en este caso los valores obtenidos están por arriba del 90% de eficiencia. Si se comparan todas las eficiencias se puede constatar claramente que conforme aumenta la concentración del colorante en solución la eficiencia de remoción disminuye. La propuesta de explicación es que en los primeros 5 minutos, se saturan los sitios de unión o de afinidad que existen en el biomaterial y el colorante.

#### 5.4 Análisis de isotermas de Langmuir y Freundlich

Con los datos generados de los porcentajes de remoción, se calcularon las variables correspondientes de las isotermas, para lo cual fue necesario determinar los valores de “ $C_e$ ” (concentración del analito, Azul de Metileno) disuelto en fase acuosa y de “ $q_e$ ” que es la (cantidad del analito adsorbida en la superficie del biomaterial).

La variable “ $q_e$ ” se determinó restando la concentración original de cada una de la soluciones con las concentraciones restantes presentes en la solución resultantes del proceso de remoción. El resultado es multiplicado por un factor de 0.1 que implica el volumen de alícuota de la muestra y el peso de la muestra del biomaterial. La variable “ $C_e$ ” es la concentración del contaminante disuelto en fase acuosa después del fenómeno de contacto.

Los resultados se muestran Tabla 4, que únicamente corresponden a la Isoterma de Langmuir.

**Tabla 4. Resultados para Isoterma de Langmuir**

Concentración de solución del colorante ( $\text{mgL}^{-1}$ )	$C_e$ ( $\text{mgL}^{-1}$ )	$q_e$ ( $\text{mgg}^{-1}$ )
5	0.025	0.4975
10	0.17	0.983
20	0.466	1.953
30	0.99	2.901
40	1.896	3.8104
50	2.59	4.741
60	3.931	5.6069

Fuente: Elaboración propia del autor, 2018

Con los resultados obtenidos de la isoterma de Langmuir se calcularon los logaritmos de cada uno de los valores y se generaron los valores de la isoterma de Freundlich, esto se muestra en la Tabla 5.



**Tabla 5. Resultados para la isoterma de Freundlich**

Concentración de solución del colorante (MgL <sup>-1</sup> )	Log Ce	Log qe
5	-1.60205999	-0.30320691
10	-0.76955108	-0.00744648
20	-0.33161408	0.29070224
30	-0.00436481	0.46254773
40	0.277838333	0.58097057
50	0.413299764	0.67586996
60	0.594503044	0.74872281

Fuente: Elaboración propia del autor, 2018

De los resultados de las Tablas 4 y 5 se procedió a graficar las correspondientes isotermas. En la Figura 16 se muestra la isoterma de Langmuir, cuyos fueron linearizados, generando la ecuación de la recta, así como su coeficiente de correlación.

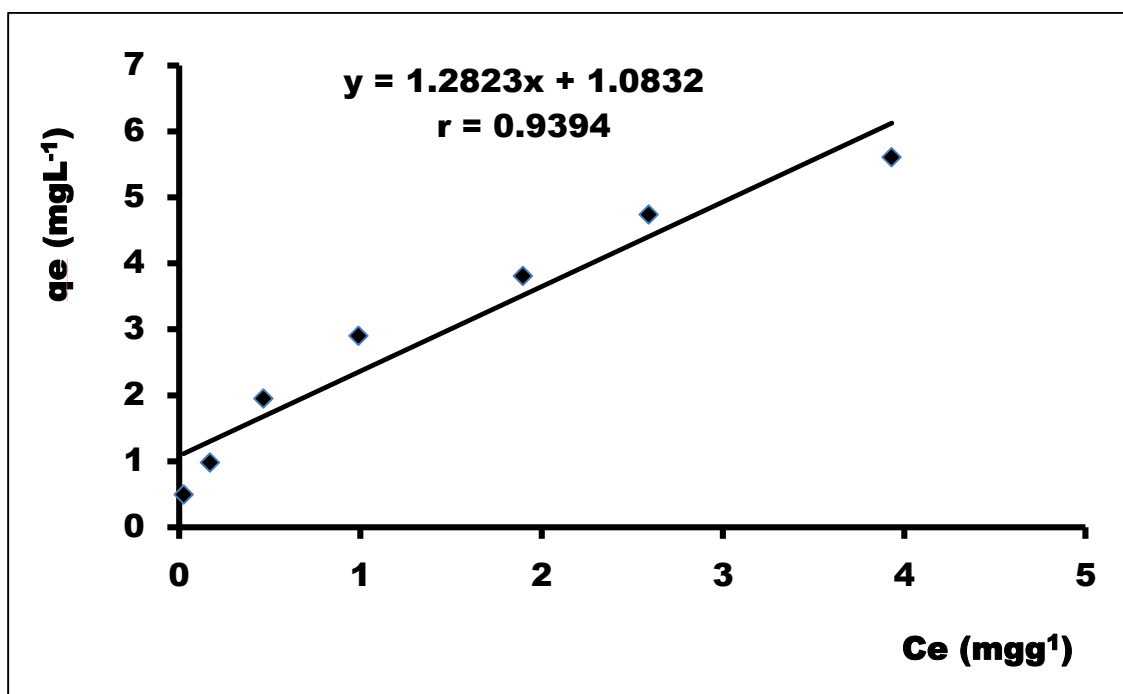


Figura 16. Isotherma de Langmuir  
Fuente. Propia de la autor, 2018

En esta isoterma se muestra la línea de tendencia y el coeficiente de correlación el cual muestra un valor de 0.9394 que en si es un resultado cuyo significado es que

existe una cierta relación directa entre la concentración del analito en fase acuosa (Ce) y el biomaterial que lo retiene en la superficie.

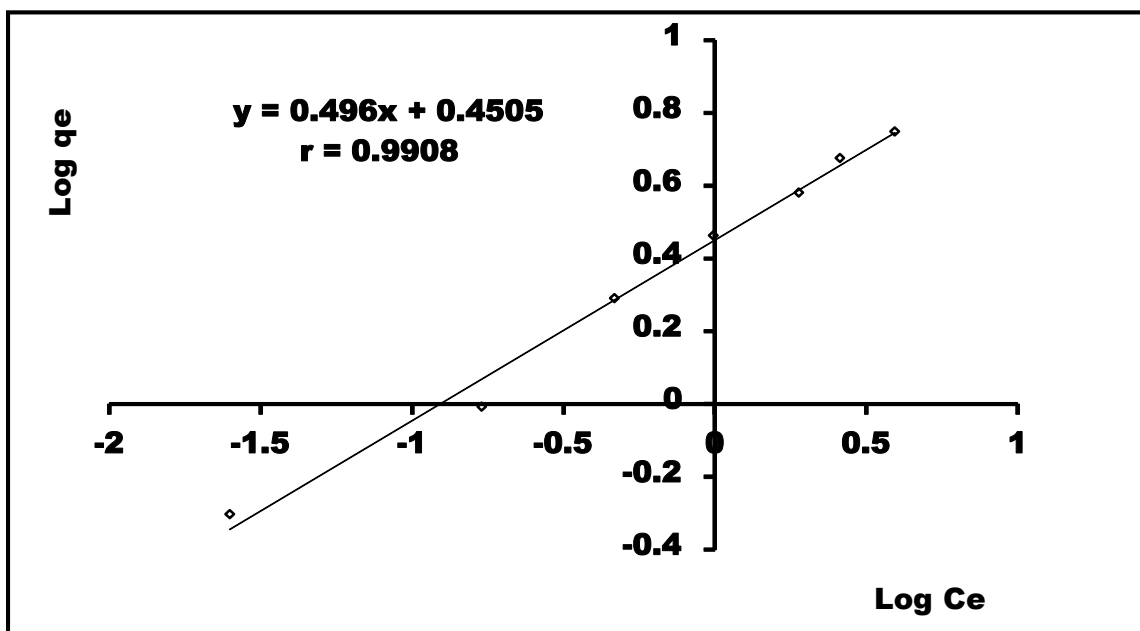


Figura 17. Isoterma de Freundlich  
Fuente. Propia de la autor, 2018.

En la Figura 17 se muestra la isoterma de Freundlich, en la cual se generó la línea de tendencia correspondiente y el coeficiente de correlación. De estas dos graficas se procedió a realizar una a comparación entre los resultados de los correspondientes coeficientes de correlación. El resultado mostrado en la isoterma de Langmuir fue de 0.9394, el de la isoterma de Frenldich alcanzo un valor de 0.9908. Estadísticamente se descarta que el fenómeno de adsorción se ajustara a la isoterma de Langmuir ya que su valor no se acerca al  $0.99 \approx 1$ . Caso contrario al 0.9908 de la isoterma de Freundlich, esto índico que la adsorción del colorante se ajustó a dicho modelo teórico. Con este resultado se establece que el proceso de adsorción del colorante Azul de Metileno sobre el biomaterial forma una monocapa sobre su superficie, siendo a su vez que la superficie es totalmente heterogénea.

### 5.5 Mecanismo de adsorción del colorante

El proceso de adsorción del colorante por parte del biomaterial se establece que fue formando una monocapa en una superficie heterogénea. Para explicar esto, se generó un mecanismo que indica como el colorante Azul de Metileno se adsorbe sobre el residuo de té verde. Esto se muestra en la Figuras 18, 19 y 20.

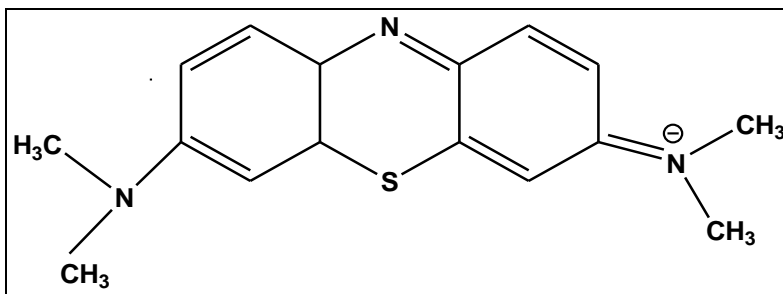
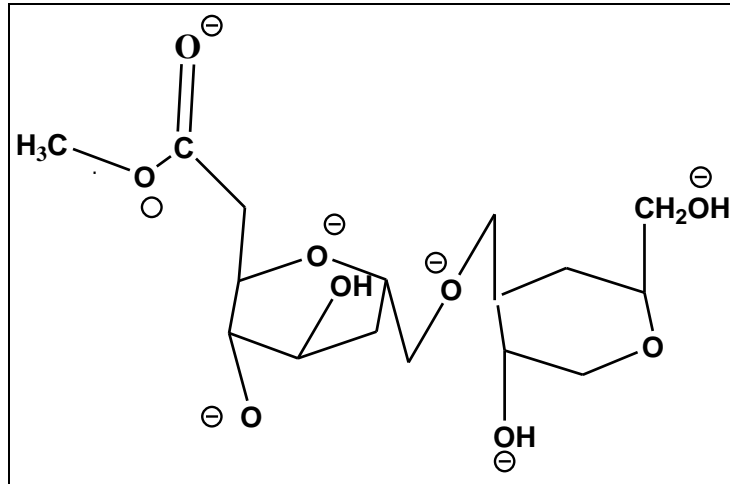


Figura 18. Colorante Azul de Metileno en solución acuosa. Fuente. Propia del autor, 2018.

En la Figura 18 se puede apreciar la fórmula molecular del colorante de Azul de Metileno disuelto en fase acuosa. Es primordial señalar que en su estructura posee los átomos de nitrógeno (N) y azufre (S), los cuales pudieran ser primordiales en la formación de dipolos negativos, ya que cada uno de estos elementos poseen grupos de electrones libres que confieren a la partes correspondientes sus cargas negativas.

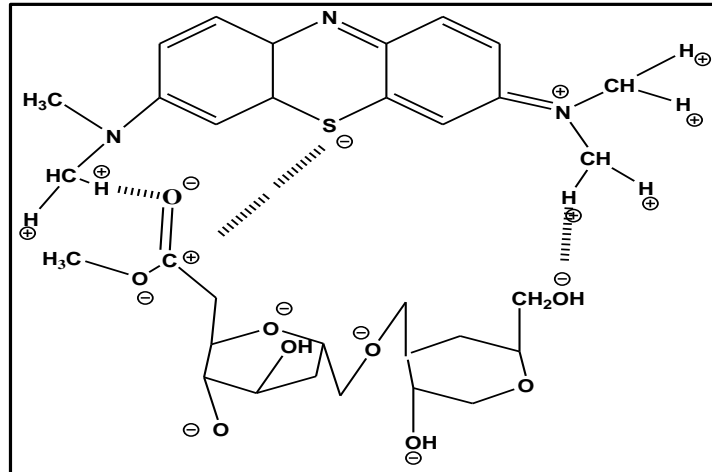
En la Figura 19 se desarrolló la estructura de la Hemicelulosa que es un constituyente primordial de toda estructura vegetal y por ende de los residuos de té que se utilizaron en esta investigación.



**Figura 19. Estructura básica de la Hemicelulosa que constituye a los residuos de té.  
Fuente. Propia del autor, 2018**

En la Figura 19 se muestra la estructura básica de la Hemicelulosa, que se encuentra en todos los materiales vegetales, que como se mencionó en los residuos de té utilizados en este trabajo de investigación. En esta Figura se puede apreciar que en cada uno de los átomos de oxígeno se forman dipolos negativos, ya que hay que recordar que este elemento que está en la familia VI de la tabla periódica, por lo cual tiene 6 electrones en su último nivel y en su caso particular tiene dos pares de electrones libres y estos le confieren dicha carga.

En el momento que se lleva a cabo el proceso de contacto entre el biomaterial y el colorante disuelto en fase acuosa, se presenta una agitación mecánica la cual facilita el acercamiento entre ambas moléculas. Al acercarse estas dos estructuras se presentan atracciones del tipo dipolo-dipolo, lo cual explicaría por qué el colorante se adsorbe sobre la superficie del biomaterial. Este se visualiza en la Figura 20.



**Figura 20. Atracciones entre las moléculas de Azul de Metileno y Hemicelulosa.**

**Fuente. Elaboración propia del autor, 2018.**

Como se mencionó anteriormente las dos moléculas del Azul de Metileno y la hemicelulosa se acercan debido a la agitación mecánica, esto favorece que se presenten atracciones del tipo dipolo-dipolo (positivo con negativo), estas se señalan de manera punteada entre las dos moléculas, por lo cual la molécula del contaminante es retenida por el biomaterial. Esta propuesta solamente se presenta entre dos moléculas, es de aseverar que la interacción se puede presentar entre varias moléculas lo cual generaría un océano de atracciones electrostáticas entre ambos actores (adsorbato como adsorbente). Esta propuesta explicaría entonces como los porcentajes de remoción del colorante a bajas concentraciones son alto.

Esto anterior significa que al existir pocas moléculas del colorante, estas son adsorbidas por la gran cantidad de moléculas de la hemicelulosa y por consecuencia la concentración del colorante en fase acuosa disminuiría.

Y por el contrario al aumentar la concentración del colorante en fase acuosa el porcentaje de remoción disminuiría, hasta llegar a un punto de saturación. Esto se vería reflejado en bajos porcentajes de remoción del contaminante que se esté estudiando.

### 5.6.- Resultados de la Demanda Química de Oxígeno

Los resultados de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) se muestran en la Tabla 6.

Concentración/ solución inicial	Tiempos	DQO	Porcentaje de remoción %
5 ppm	0	12.5	
	5	0.32	97.5
	10	0.13	99
	15	0.13	99
	20	0.13	99
	25	0.13	99
	30	0.13	99
10 ppm	0	25.51	
	5	1.96	93.5
	10	1.27	95
	15	0.77	97
	20	0.77	97
	25	0.77	97
	30	0.77	97
20 ppm	0	51.02	
	5	3.75	92.7
	10	2.95	94.2
	15	2.95	94.2
	20	2.55	95
	25	2.55	95
	30	2.55	95
30 ppm	0	76.53	
	5	6.12	92
	10	6.12	92
	15	4.59	94
	20	4.17	94.5
	25	4.17	94.5
	30	4.17	94.5
40 ppm	0	102.2	
	5	8.48	91.7
	10	6.74	93.4
	15	6.43	93.7
	20	6.43	93.7
	25	6.43	93.7
	30	6.43	93.7

Concentración/ solución inicial	Tiempos	DQO	Porcentaje de remoción %
50 ppm	0	127.55	
	5	12.76	90
	10	12.24	90.4
	15	8.9	93.4
	20	8.8	93.1
	25	8.8	93.1
	30	8.8	93.1
60 ppm	0	153.06	
	5	15.3	90
	10	12.74	91.7
	15	12.24	92
	20	12.24	92.3
	25	12.24	92.3
	30	12.24	92.3

Fuente. Elaboración propia del autor, 2018.

Como se puede apreciar al valorar los resultados de remoción del colorante en función tiempo de tratamiento la concentración del colorante va decreciendo y por consecuencia los valores de la DQO y el porcentaje de remoción también disminuyen. Esto se establece tomando como referencia la eficiencia del 99 % para bajas concentraciones del colorante (5ppm) y comparándola con el 92 % generado para la alta concentración del colorante (60 ppm). Esto corrobora que los sitios activos de la biomasa se saturan rápidamente a concentraciones altas. No obstante valorando la magnitud de todas las concentraciones de las soluciones sintéticas del colorante son bajas, pero se establece que el método de tratamiento que es la biosorción tiene excelentes resultados a bajas concentraciones del contaminante y debe de ser utilizado como método de pulimiento en un tren de tratamiento de aguas residuales.

De la Tabla 6, se trazaron las gráficas correspondientes a la variable DQO, esto con la finalidad de analizar la proporción de reducción del colorante en función del tratamiento. La razón de decrecimiento de cada solución del colorante se puede visualizar en las Figuras 21 y 22.

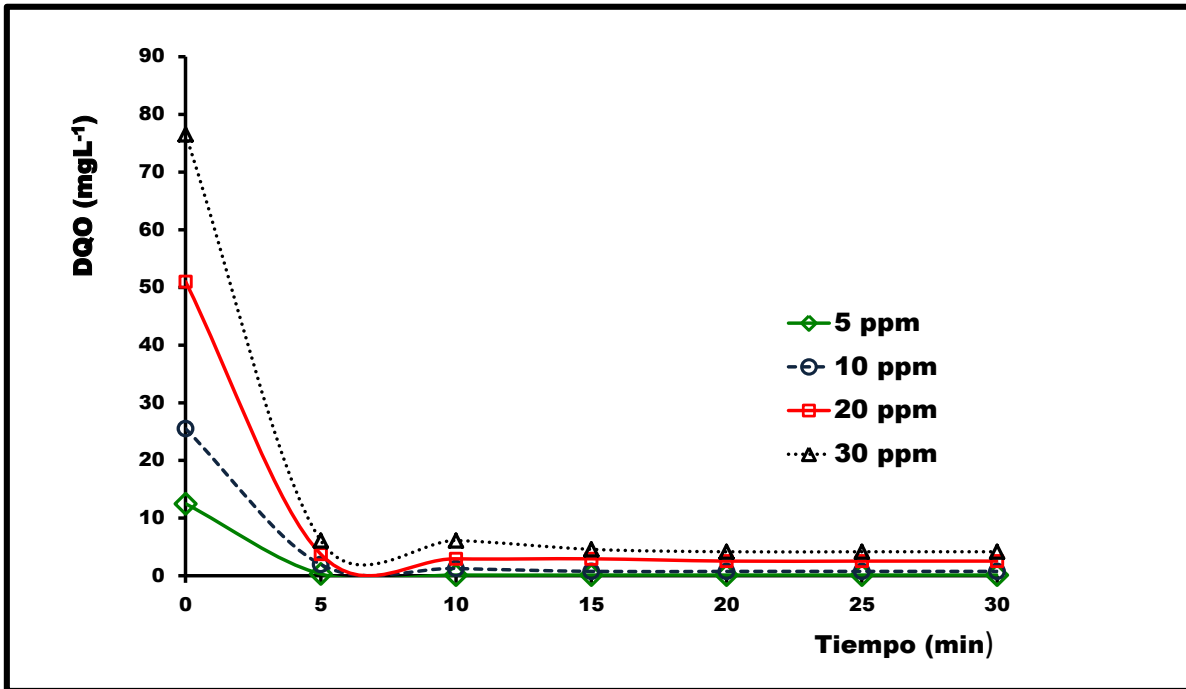


Figura 21. Demanda Química de Oxígeno  
Fuente. Elaboración propia del autor, 2018.

En la Figura 21 se puede apreciar que en las bajas concentraciones del colorante (5,10,20, 30  $\text{mgL}^{-1}$ ) durante los primeros cinco minutos se alcanzan la máxima remoción de las moléculas del colorante por la atracción que ejerce la biomasa. Después de este tiempo el porcentaje de remoción permanece constante, esto significa que los sitios activos ya han sido ocupados por las moléculas del colorante. Esto corrobora lo señalado en el mecanismo de atracción entre el colorante y el biomaterial. Esto se reflejó en los valores de la DQO ya a los cinco minutos el valor de este parámetro disminuyó radicalmente y después de este tiempo los valores de la DQO permanecieron casi constantes.



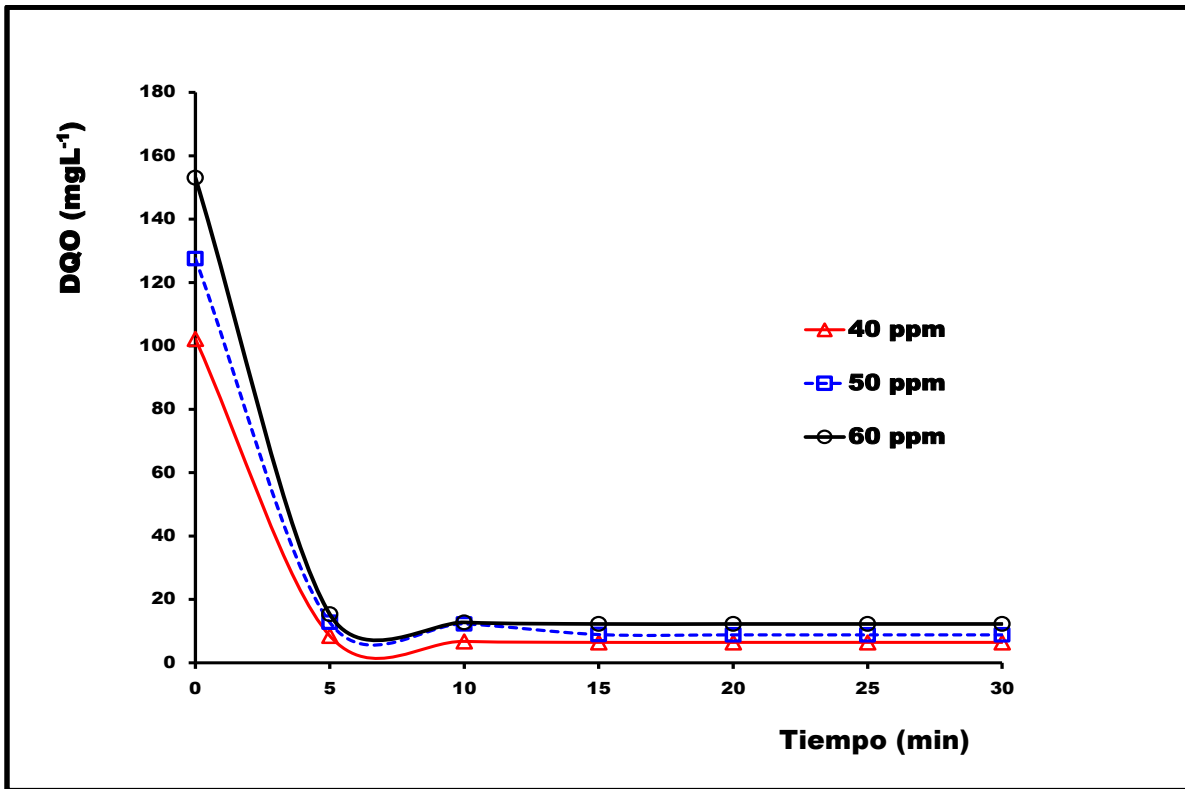


Figura 22. Demanda Química de Oxígeno  
Fuente. Elaboración propia del autor, 2018.

En la Figura 22 se muestra el comportamiento de las últimas concentraciones del colorante. En las concentraciones de 40, 50 y 60 mgL<sup>-1</sup> la remoción presentó una conducta igual a las primeras concentraciones, es decir, a los primeros cinco minutos se alcanza casi la mayor remoción del colorante y posteriormente el porcentaje de remoción aumenta muy poco, asimismo el valor de la DQO disminuyó en los primeros minutos y consecutivamente permaneció casi constante.

Con este último análisis se corrobora el comportamiento de la remoción del colorante azul de metileno en fase acuosa, mediante el proceso de biosorción con los residuos de té empleados en esta investigación.

## CONCLUSIONES

A partir del análisis y discusión de los resultados obtenidos en la presente investigación se determinaron las siguientes conclusiones:

- El proceso de remoción del colorante generó excelentes resultados para concentraciones bajas del contaminante, que fueron casi del 99 % de eficiencia. Se establece que en función del incremento de la concentración del colorante la eficiencia disminuye proporcionalmente.
- El comportamiento señalado se estableció tanto con los espectros de ultravioleta del colorante como con los resultados del parámetro de la DQO, es decir en función del tiempo de tratamiento estos disminuyeron.
- En la biosorción del colorante por parte del biomaterial se propone un mecanismo de atracción entre los grupos funcionales que tienen los residuos de té (provenientes de la celulosa y hemicelulosa), con los grupos funcionales que posee el colorante.
- La biosorción del colorante con la superficie de la biomasa siguió un modelo teórico de isoterma de Freundlich, es decir, se adhirió formando una monocapa sobre una superficie heterogénea. Esto se estableció comparando los resultados generados de los coeficientes de correlación de los dos modelos teóricos de isotermas señalados en la investigación. En el cual el mejor resultado de coeficiente fue de 0.9908 para el modelo de isoterma señalado.
- De acuerdo a los datos obtenidos no se requieren de más de 5 minutos de tiempo de retención para obtener la máxima remoción de colorante Azul de Metileno.
- Se recomienda emplear este procedimiento en aguas residuales que hayan recibido un tratamiento previo con lo cual se aseguraría que las concentraciones remanentes de contaminantes presentes en el agua serían retenidas por el biomaterial, de ahí que se señale esta técnica como una etapa de pulimiento final en un tren de tratamiento de agua residual.

## REFERENCIAS

- Chacón, J. M., Leal, M. T., Sánchez, M., & Bandala, E. R. (2006). Solar photocatalytic degradation of Azo-dyes by photo-Fenton process. *Dyes and Pigments*, 69, 144-150.
- Holan, Z. R., & Volesky, B. (1995). Accumulation of cadmium, lead, and nickel by fungal and wood biosorbents . *Biochem. Biotechnol*, 133-146.
- Momenzadeh, H., Tehrani-Bagha, A. R., Khosravi, A., Gharanjig, K., & Holmberg, K. (2011). Reactive dye removal from wastewater using a chitosan nanodispersion. *Desalination*, 271, 225-230.
- A, D. (2008). Heavy metal adsorption onto agro-based waste materials: a review. *J Hazard Mater* 157, 220–229.
- A, D. (2009). Agricultural based activated carbons for the removal of dyes from aqueous solutions: a review. *J Hazard Mater* 167, 1–9.
- Aguirre, S. E. (2009). Adsorción de Cd<sup>2+</sup> y 4-clorofenol por silicalita -1 sintetizada a partir de la cascara de arroz. *Tesis para obtener el grado de Ingeniero Químico. Universidad Nacional Autónoma de México* .
- Akar, T., Celik, S., & Tunali Akar, S. (2010). Biosorption performance of surface modified biomass obtained from *Pyraecanthia coccinea* for the decolorization of dye contaminated solutions. *Chemical Engineering Journal*, 160, 466–472.
- Aksu , Z. (2005). Aplicación de biosorción para la eliminación de contaminantes orgánicos: una revisión. *Proceso Biochem*, 997-1026.
- Alamillo Lopez, V. (Marzo de 2013). Tesis de licenciatura, Facultad de Química, Uaemex. *REMOCIÓN DE COLORANTES ORGÁNICOS AZUL ÍNDIGO Y TARTRAZINA*. Toluca, Mexico, Mexico.
- Alamillo Lopez, V. (s.f.). *Repositorio Institucional* .
- Ali, I. (2012). Adsorbentes de nueva generación para el tratamiento del agua. *Chem Rev* 112, 5073-5091.
- Ali, I. (2014). Tratamiento del agua por columnas de adsorción: evaluación a nivel del suelo. *Sep Purif Rev* 43, 175-205.

- Ali, I., & Gupta, V. (2007). Avances en el tratamiento del agua mediante tecnología de adsorción. *Nat Protoc* 1, 2661-2667.
- Anaya, K. (26 de Julio de 2018). Tesis para obtener el grado de Ingeniero en Alimentos. Universidad Tecnológica de la Mixteca. *Actividad fotocatalítica de una heteroestructura de TiO<sub>2</sub>/SnO<sub>2</sub>:F/Sustrato en una solución de azul de metileno*. Toluca.
- Andreozzi, R., Caprio, V., Insola, A., & Marotta, R. (1999). Advanced oxidation processes (AOP) for water purification and recovery. *Catal Today* 53, 51–59.
- Anjaneyulu, Y., & Sreedhara-Chary, N.-R. (2005). Decolourization of industrial effluents. *Available methods and emerging technologies*, 245–273.
- Anonymous. (2006). Emerging contaminants special issue. *Environ Sci Technol* 40, 7105–7450.
- Arica, M., & Bayramoglu, G. (2007). Biosorption of Reactive Red-120 dye from aqueous solution by native and modified fungus biomass preparations of *Lentinus sajor-caju*. *Journal of Hazardous Materials*, 149, 499–507.
- Arslan, I. (2001). Treatability of a simulated disperse dye-bath by ferrous iron coagulation, ozonation and ferrous iron-catalyzed ozonation. *Journal of Hazardous Materials*, 85, 229-240.
- Arvanitoyannis, I. S., & Varzakas, T. H. (2008). Vegetable waste treatment: comparison and critical presentation of methodologies. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.*, 48, 205–247.
- Auriol, M., Filali-Meknassi, Y., & Tyagi, R. (2006). Endocrine disrupting compounds removal from wastewater, a new challenge. *Proceso Biochem*, 525-539.
- Ay, F., Catalkaya, E. C., & Kargi, F. (2009). A statistical experiment design approach for advanced oxidation of Direct Red Azo-dye by photo-Fenton treatment. *Journal of Hazardous Materials*, 162, 230-236.
- Baes, C., & Mesmer, R. (1976). The hydrolysis of cations. *Wiley interscience USA*.
- Balcha, A., Yadav, O., & Dey, T. (22 de 11 de 2016). Photocatalytic degradation of methylene blue dye by zinc oxide nanoparticles obtained from

precipitation and sol-gel methods. *Environ Sci Pollut Res*, 23, 25485–25493. Obtenido de <https://doi.org/10.1007/s11356-016-7750-6>

- Banat, I., Nigam, P., Singh, D., & Marchant, R. (1996). Microbial process for the decolorization of textile effluent containing azo, diazo and reactive dyes. *Process Biochem*, Vol 31.
- Barcelò, D., & Petrovic, R. (2008). Emerging contaminants from industrial and municipal waste. *Springer, Berlin*.
- Barrios Ziolo, L. F., Gaviria Restrepo, L. F., Agudelo, E. A., & Cardona Gallo, S. A. (2015). Technologies for the removal of dyes and pigments present in wastewater. A review. *Bdigital de la Universidad Nacional de Colombia*, 118-126.
- Bautista, L. (2011). *Degradación de colorantes (Azul de Metileno) por métodos electroquímicos*. Obtenido de Tesis para obtener el grado de Ingeniería Química. Facultad de Química. Universidad Veracruzana: <https://core.ac.uk/download/pdf/16305412.pdf>
- Bellatín, L., Herrera, O., Navarro, A., Sun-Kou, R., & Llanos, B. (2014). Estudio de la biosorción de Rojo ácido 18, Azul básico 99 y Amarillo básico 57, presentes en los tintes de cabellos, con residuos de hojas de té verde. *Sociedad Química de Perú vol 80*, 14-21.
- Bourbigot, M., Dodin, A., & Lheritier, R. (1981). La flore bacterienne dans un réseau de distribution: Bacteria in distribution systems. *ELSEVIER*, 581-591.
- Cai, J., Cui, L., Wang, Y., & Lui, C. (2009). Effect of functional groups on sludge for biosorption of reactive dyes. *Journal of Environmental Sciences*, 21, 34-53.
- Campos Medina, E., Gómez Hinojos, A. M., & Velázquez Rodríguez, A. (2011). ESTUDIO DE LA REMOCIÓN DEL COLORANTE AZUL DE METILENO EMPLEANDO LA BIOMASA. *Quivera*, vol. 13, núm. 2, 52-62.
- Cañizares-Villanueva, R. (2000). Biosorción de metales pesados por el uso de biomasa microbiana. *Revista Latinoamericana de Microbiología* 42, 131-141.
- Carvalho, G., Delee, W., Novais, J. M., & Pinheiro, H. M. (2002). A factorially designed study of physicochemical reactive dye colour removal from simulated cotton textile processing wastewaters. *Coloration technology*, 215-219.

- Caselatto, A., Ferrari Ferreira, J., Tambourgi, E., Moraes, R., & Silveira, E. (2011). Biodegradation of textile azo dyes by *Shewanella putrefaciens* (CCT 1967). *Chemical Engineering Transactions*, 24, 871–876.
- Castiglione, S., Zuccato, E., & Fanelli, R. (2011). Illicit drugs in the environment. Occurrence, analysis and fate using mass spectrometry. *Wiley, Hoboken*.
- CCM. (2015). *Azul de metileno. Definicion*. Obtenido de <http://salud.com.met/faq/14550-azul-de-metileno-definicion>
- CCM. (26 de 07 de 2018). *Azul de metileno. Definicion*. Obtenido de <https://salud.ccm.net/faq/14550-azul-de-metileno-definicion>
- Cedillo, C., Rosales, L., & Constantino, F. (2001). *Linfoquistosis en peces tetra fantasia Parambassis baculis de la Ciudad de Mexico*. Obtenido de Volumen 32, Numero 1: <http://www.ejournal.unam.mx/rvm/vol32-01/rvm32111.pdf>
- Chafi, M., Gourich, B., Essadki, A. H., Vial, C. A., & Fabregat, A. (2011). Comparison of electrocoagulation using iron and aluminium electrodes with chemical coagulation for the removal of a highly soluble acid dye. *Desalination*, 281, 285-292.
- Chagas, E. P., & Durrant, L. R. (2001). Decolorization of Azo dyes by *Phanerochaete chrysosporium* and *Pleurotus sajorcaju* Enzyme and Microbial Technology. *Process Biochemistry*, 37, 473-477.
- Chang, J. S., Chen, B. Y., & Lin, Y. S. (2004). Stimulation of bacterial decolorization of an azo dye by extracellular metabolites from *Escherichia coli* strain NO3, *Bioresour. Technol.*, 91, 243–248.
- Chomiak, A., Sinnet, B., Derlon, N., & Morgenroth, E. (2014). Inorganic particles increase biofilm heterogeneity and enhance permeate flux. *Wat Res* 64, 177–186.
- Chong, M., Jin, B., Chow, C., & Saint, C. (2010). Recent developments in photocatalytic water treatment technology: a review. *ELSEVIER*, 2997-3027.
- Couto, S. R. (2009). Dye removal by immobilized fungi. *Biotechnology Advance*, 27, 227–235.
- Cruz, C. V. (2004). Kinetic modeling and equilibrium studies during cadmium. *. Bioresource Technology*, 257.

- Cui, L., Liu, C., & Wu, G. (2008). Performance and mechanism of methylene blue biosorption on orange peel. *Environmental Technology*, 29, 1021–1030.
- Cundy , A., Hopkinson , L., & Whitby , R. (2018). Use of iron-based technologies in contaminated land and groundwater remediation: a review. *ELSEVIER*, 42-51.
- Daneshvar, N., Oladegaragoze, A., & Djafarzadeh, N. (2006). Decolorization of basic dye solutions by electrocoagulation: An investigation of the effect of operational parameters. *Journal of Hazardous Materials*, 129, 116-122.
- Dave, S., & Dave , R. (2009). Isolation and characterization of *Bacillus thuringiensis* for Acid red 119 dye decolourisation. *Bioresource Technology*, 249-253.
- Dawood, S., & Sen, T. (2012). Removal of anionic dye Congo red from aqueous solution by raw pine and acid-treated pine cone powder as adsorbent: equilibrium, thermodynamic, kinetics, mechanism and process design. *Water Research*, 46(6), 1933–1946.
- De Faria, L. A., Santana, M. H., Da Silva, L. M., Freitas, A. C., Boodts, J. F., & Fernandes, K. C. (2009). Application of electrochemically generated ozone to the discoloration and degradation of solutions containing the dye Reactive Orange 112. *Journal of Hazardous Materials* 164, 10-17.
- De la Torre, S. (1975). *Manual basico de la microtecnia biologica*. La Habana, Cuba : Instituto cubano.
- De Moraes , S. G., Freire , R. S., & Duran , N. (2000). Degradation and toxicity reduction of textile effluent by combined photocatalytic and ozonation processes. *Chemosphere*, 40, 369-373.
- Derlon , N., Koch , N., Eugster , B., Posch , T., Pernthaler , J., Pronk , W., & Morgenroth , E. (2013). Activity of metazoan governs biofilm structure formation and enhances permeate flux during gravity-driven membrane (GDM) filtration. *Wat Res* 47, 2085–2095.
- Dhir, B. (2014). Potential of biological materials for removing heavy metals from wastewater. *Environ Sci Pollut Res*, 1614–1627.
- Eichlerova, I., Homolka, L., & Nerud, F. (2007). Decolorization of high concentrations of synthetic dyes by the white rot fungus *Bjerkandera adusta* strain CCBAS 232. *Dyes and Pigments*, 75, 38-44.

- El-Ashtoukhy, S. Z. (2009). Loofa *egyptiaca* as a novel adsorbent for removal of direct blue dye from aqueous solution. *Journal of Environmental Management*, *90*, 2755-2761.
- Eren , Z. (2012). Ultrasound as a basic and auxiliary process for dye remediation: A review. *Journal of Environmental Management*, *104*, 127-145.
- F, D. (2013). Adsorption properties of low-cost biomaterial derived from *Prunus amygdalus L.* for dye removal from water. *Sci World J* *2013*, 9616–9671.
- Fan, L., Zhou, Y., Yang , W., Chen, G., & Yang, F. (2008). Electrochemical degradation of aqueous solution of Amaranth azo dye on ACF under potentiostatic model Original. *Dyes and Pigments*, *76*, 440-446.
- Farkas , V., Felinger, A., Hegedusova, A., Dekany, I., & Pernyeszi, T. (2013). Comparative study of the kinetics and equilibrium of phenol biosorption on immobilized white-rot fungus *Phanerochaete chrysosporium* from aqueous solution. *Colloids Surfaces B*, *103*, 381–390.
- Ferrer , I., Lanza , F., & Tolokan , A. (2000). Selective trace enrichment of chlorotriazine pesticides from natural waters and sediment samples using terbuthylazine molecularly imprinted polymers. *Anal Chem*, 3934-3941.
- Foo, K., & Hameed, B. (2009). Utilization of biodiesel waste as a renewable resource for activated carbon: application to environmental problems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2495–2504.
- Fram , M., & Belitz , K. (2011). Occurrence and concentrations of pharmaceutical compounds in groundwater used for public drinking-water supply in California. *Sci Total Environ* *409*, 3409–3417.
- Fuentes Moyado, S., & Diaz Guerrero, G. (1988). Catalizadores: ¿la piedra filosofal del siglo XX? *Fondo de Cultura Economica. Coleccion: La ciencia desde Mexico*, No 59, 150-160.
- Fytianos, K., Voudrias, E., & Kokkalis, E. (2000). Sorption-desorption behavior of 2,4-dichlorophenol by marine sediments. *Chemosphere*, *40*, 3–6.
- Gadd, G. M. (2009). Biosorption: Critical review of scientific rationale environmental importance and significance for pollution treatment. *Journal of Chemical for Pollution Treatment*, 13.28.



- García , J., Gomes, H. T., Serp , P., Kalck , P., Figuereido , J. L., & Faria , J. L. (2005). Platinum catalysts supported on MWNT for catalytic wet air oxidation of nitrogen containing compounds. *Catal Today* 102, 101–109.
- Garg, V., Amita, M., Kumar, R., & Gupta, R. (2004). Basic dye (methylene blue) removal from simulated wastewater by adsorption using Indian Rosewood sawdust: a timber industry waste. *Dyes and Pigments*, 63,, 243–250.
- Garzon , R. (s.f.). *Clases Químicas Por hongos y Bacterias Inmovilizados sobre Fibra De Agave Tequiliana Webber var Azul* .
- Garzon, R. (26 de 07 de 2018). *Clases químicas por hongos y bacterias inmovilizados sobre fibra de agave tequiliana Webber var azul*. Obtenido de <http://www.javeriana.edu.co/biblos/tesis/ciencias/tesis217.pdf>
- Golka, K., Kopps, S., & Myslak, W. (2004). Carcinogenicity of azo colorants: influence of solubility and bioavailability. *Toxicol Lett* 15, 203–210.
- Greene, B., Hosea, R., McPherson, M., Henzl, M., & Darnall, W. (1986). Interaction of gold (I) and gold (II) complexes with algal biomass. *Environ Sci. Technol*, 627-632.
- Gulay, B., Nezaket, A., Gozde, E., Meltem, Y., & Yakup, A. (16 de 11 de 2017). *Water Air Soil Pollut*. Obtenido de <https://doi.org/10.1007/s11270-013-1640-z>
- Gundogdu, A., Ozdes , D., Duran , C., Numan, B., Soylak, M., & Basri , S. H. (2009). Biosorption of Pb (II) ions from aqueous solution by pine bark (*Pinus brutia* Ten). *Chemical Engineering Journal* 153, 62-69.
- Gupta, V. K., & Suhas. (2009). Application of low-cost adsorbents for dye removal—a review. *Journal of Environmental Management*, 90, 2313–2342.
- Gupta, V., Suhas, A. I., & Saini, V. (2004). Removal of rhodamine B, fast green, and methylene blue from wastewater using red mud, an aluminum industry waste. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 43, 1740-1747.
- Han , F., Subba, V., Srinivasan, M., Rajaratham, D., & Naidu, R. (2009). Tailored titanium dioxide photocatalysts for the degradation of organic dyes in wastewater treatment: A review. *Applied Catalysis A: General*, 359, 25-40.

- Han , R., Zou , W., Yu , W., Cheng , S., Wang , Y., & Shi , J. (2007). Biosorption of methylene blue from aqueous solution by fallen phoenix tree's leaves tree's leaves. *J Hazard Mater* 141, 156–162.
- Han, R., Wang, Y., Han, P., Shi, J., Yang, j., & Lu, Y. (2006). Removal of methylene blue from aqueous solution by chaff in batch mode. *Journal of Hazardous Materials*, 137, 550–557.
- Harmita, H., Karthikeyan , K. G., & Pan, X. (2009). Copper and cadmium sorption onto kraft and organosolv lignins. *Bioresource Technology* 100, 6183-619.
- Hernandez, M., Perales, H. V., Flores, C. M., & Cañizares, R. O. (2014). Physiological and biochemical responses of *Chlorella vulgaris* to Congo Red. *Ecotoxicol Environ Saf* 108, 72–77.
- Hernández-Zamora, M., Cristiani-Urbina, E., & Martínez-Jerónimo, F. (22 de 11 de 2017). *Environ Sci Pollut Res* . Obtenido de Springer Berlin Heidelberg: <https://doi.org/10.1007/s11356-015-4277-1>
- Hidalgo-Vázquez, A., Alfaro-Cevas-Villanueva, R., Márquez-Benavides, L., & Cortés-Martínez, R. (2011). Removal of cadmium and lead from aqueous solutions using pine sawdust as biosorbent. *Journal of Applied Sciences in Environmental Sanitation*, 447-462.
- Ho, Y. S., & McKay, G. (1998). Sorption of dye from aqueous solution by peat. *Chemical Engineering Journal*, 70, 115–124.
- Iqbal, M., & Edyvean , R. G. (2004). Biosorption of lead, copper and zinc ions on loofa immobilized biomass of *Phanerochaete chrysosporium*. *Minerals Engineering* 17, 217-223.
- Islam, M. A., Khan, M. R., & Mozumder, M. I. (2004). Adsorption equilibrium and adsorption kinetics: a unified approach. *Chemical Engineering and Technology*, 27, 1095–1098.
- Janoš , P., Coskun , S., Pilařová , V., & Rejnek , J. (2009). Removal of basic (Methylene Blue) and acid (Egacid Orange) dyes from waters by sorption on chemically treated wood shavings. *Bioresource Technology*, 100, 1450-1453.
- Janos, P., Buchtova, H., & Ryznarova, M. (2003). Sorption of dyes from aqueous solutions onto fly ash. *Water Research*, 37,, 4938–4944.

- Jarosz-Wilkolazka, A., Malarczyk, E., Pirszel, J., Skowronski, T., & Leonowicz, A. (2002). Uptake of cadmium ions in white rot fungus *Trametes versicolor*: effect of Cd (II) ions on the activity of laccase. *Cell Biology International* 26, 605-613.
- Jimenez, G. (2009). *Cinética de degradación de colorantes textiles de diferentes clases químicas por hongos y bacterias Inmovilizados sobre fibra de agave tequiliana*. Mexico: Instituto Politecnico Nacional.
- Jimenez, R., & Barrera, J. (29 de Febrero de 2000). *Resurge peligro toxico*. Obtenido de El Universal: <http://www.eluniversal.com.mx>
- Jin, X., Liu, G., Xu, Z., & Tao, W. (2007). Decolourisation of a dye industry effluent by *Aspergillus fumigatus* XC6, *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 74, 239–243.
- Johnson, T., Jain, N., Joshi, H., & Prasad, S. (2008). Agricultural and agro-processing wastes as low cost adsorbents for metal removal from wastewater. A review. *J Sci Ind Res* 67, 647–658.
- Jonstrup, M., Kumar, N., Murto, M., & Mattiasson, B. (2011). Sequential anaerobic–aerobic treatment of azo dyes: Decolourisation and amine degradability. *Desalination*, 280, 339–346.
- Kandelbauer, A., & Guebitz, G. M. (2005). Bioremediation for the decolorization of textile dyes - a review. *En Environmental Chemistry (Editores: Lichtfouse E, Dudd S, Robert D) Springer Berlin Heidelberg*, 269–288.
- Kim, T., Park, C., Shin, E., & Kim, S. (2002). Decolorization of disperse and reactive dyes by continuous electrocoagulation process. *Desalination*, 150, 165-175.
- King, P., Anuradha, K., Beena Lahari, S., Prasanna Kumar, Y., & Prasad, V. R. (2008). Biosorption of zinc from aqueous solution using *Azadirachta indicabark*: Equilibrium and Kinetic Studies. *Journal of Hazardous Materials* 152, 324-329.
- Kratochvil, D. (1998). Removal of trivalent and hexavalent chromium by seaweed adsorbent. *Environmental Science & Technology*, 2693-2698.
- Kuch, H., & Ballschmiter, K. (2001). Determination of endocrine-disrupting phenolic compounds and estrogens in surface and drinking water by

HRGC-(NCl)-MS in the picogram per liter range. *Environ Sci Technol* 35, 3201–3206.

- Kuhad , R. C., Sood , N., Tripathi , K. K., Singh , A., & Ward , O. P. (2004). Developments in microbial methods for the treatment of dye effluents. *Adv. Appl. Microbiol.* 56, 185-213.
- Kuyack, N., & Volensky, B. (1989). The mechanism of chromium and cobalt biosorption . *Biotechnology and bioengineering* , 823-831.
- Kuyucak, N., & Volesky, B. (1986). Accumulation of gold by algae biosorbent. *Biorecovery* 1:189-204., 189-204.
- Kyzas , G. Z., Lazaridis , N. K., & Mitropoulos, A. C. (2012). Removal of dyes from aqueous solutions with untreated coffee residues as potential low-cost adsorbents: equilibrium, reuse and thermodynamic approach. *Chem Eng J* 189–190, 148–159.
- Lade, H., Waghmode, T., Kadam, A., & Govindwar, S. (2012). Enhanced biodegradation and detoxification of disperse Azo dye Rubine GFL and textile industry effluent by defined fungal-bacterial consortium. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 72, 94-107.
- Lagergren, S. (1898). About the theory of so-called adsorption of soluble substance. *Kung Sven Vetem Hand*, 24, 1–39.
- Lannacone, J., & Alvariano, L. (Diciembre de 2007). *Ecotoxicidad acuatica de dos colorantes y de tres antiparacitos de importancia en acuicultura en daphnia magna*. Obtenido de Scielo Peru: [http://www.scielo.org.pe/scielo.php?pid=S1726-22162007000100012&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.org.pe/scielo.php?pid=S1726-22162007000100012&script=sci_arttext)
- Lee, J., & Choi, S. (2006). Thiruvengkatachari, R., Shim, W. and Moon, H., Evaluation of the performance of adsorption and coagulation processes for the maximum removal of reactive dyes. *Dyes and Pigments*, 69, 196-203.
- Levec, J., & Pintar, A. (2007). Catalytic wet-air oxidation processes: a review. *Catal Today* 124, 172–184.
- Liu, Y. G., Fan, T., Zeng, G. M., X, L., Q, T., Ye, F., . . . Huang, Y. (2006). Removal of cadmium and zinc ions from aqueous solution by *Aspergillus niger*. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* 16 , 681-686.

- Lourie , E., & Gjengedal, E. (2011). Metal sorption by pedestrian and algae treated pedestrian: Kinetics and factors affecting the process. *Chemosphere* 85, 759-764.
- Low, L. W., Teng, T. T., Ahmad, A., Morad, N., & Wong, Y. S. (2011). A novel pretreatment method of lignocellulosic material as adsorbent and kinetic study of dye waste adsorption. . *Water, Air, and Soil Pollution*, 218, 293–306.
- Lu, X., Yang, B., Chen, J., & Sun, R. (2009). Treatment of wastewater containing Azo dye reactive brilliant red X-3B using sequential ozonation and up flow biological aerated filter process. *Journal of Hazardous Materials*, 241-245.
- Mahmoode, N., Hagali, B., Ararm, M., & Lan, C. (2011). Adsorption of textile dyes on pine cone from collared wastewater: kinetics, equilibrium and thermodynamic studies. . *Desalination*, 268, 117–125.
- Mahmoodia, N. M., Najafib, F., Khorramfara, S., Aminia, F., & Aramic, M. (2011). Synthesis, characterization and dye removal ability of high capacity polymeric adsorbent: polyaminoimide homopolymer. *Journal of Hazardous Materials*, 198, 87–94.
- Manu, B., & Chaudhari, S. (2003). Decolorization of indigo and azo dyes in semicontinuous reactors with long hydraulic retention time. *Process Biochemistry*, 38, 1213-1221.
- Martín Lara, M. A. (2008). Tesis Doctoral: Caracterización y aplicación de biomasa residual a la eliminación de metales pesados. *Universidad de Granada, Departamento de Ingeniería Química*. <http://0-hera.ugr.es.adrastea.ugr.es/tesisugr/17514629.pdf>.
- McGuire, M., & Suffet, I. (01 de Noviembre de 1978). *Adsorption of Organics From Domestic Water Supplies*. Obtenido de American Water Works Association : <https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.1978.tb04257.x>
- Meena, A. K., Mishra, G., Rai, P., Rajagopal, C., & Nagar, P. (2005). Removal of heavy metal ions from aqueous solutions using carbon aerogel as an adsorbent. *Journal of Hazardous Materials*, 122, 161–170.
- Meshko, V., Markovska, L., Mincheva, M., & Rodrigues, A. E. (2001). Adsorption of basic dyes on granular activated carbon and natural zeolite. *Water Resources*, 35(14), 3357.

- Meshko, V., Markovska, L., Mincheva, M., & Rodrigues, A. E. (2001). Adsorption of basic dyes on granular activated carbon and natural zeolite. *Water Resources*, 35(14), 3357.
- Mishra, V. S., Mahajani, V. V., & Joshi, J. B. (1995). Wet air oxidation. *Ind Eng Chem Res* 34, 2–48.
- Mohammed, H., Kadhim, B., & Mohammed, A. (2011). Adsorption study of some sulphanilic azo dyes on charcoal. *E-J. Chem.*, 8,, 739-747.
- Morel, F. (1983). Principles of aquatic chemistry. *John Wiley & Sons New York USA*.
- Morrison, R. (1987). Organic chemistry Allyn Bacon Inc Newton USA 13 Glasstone Set al 1941. *The theory of rate processes Mc Graw-Hill New York USA*.
- Mukhlis, M. B., Khan, M. R., & Bhoumick, M. C. (2012). Papaya (*Carica papaya* L.) Leaf Powder: Novel Adsorbent for Removal of Methylene Blue from Aqueous Solution. *Water Air Soil Pollut* 223, 4949–4958.
- Murphy, V., Hughes, H., & McLoughlin, P. (2009). Enhancement strategies for Cu (II), Cr (III) and Cr (VI) remediation by a variety of seaweed species. *Journal of Hazardous Materials* 166, 318-326.
- Naja, G., Volesky, B., & Murphy, V. (2010). Biosorption Metals. *Wiley encyclopedia of Industrial Biotechnology*, 552 -559.
- Najm, I., Snoeyink, V., Suidan, M., Lee, C., & Richard, Y. (01 de Enero de 1990). *Effect of Particle Size and Background Natural Organics on the Adsorption Efficiency of PAC*. Obtenido de American Water Works Association: <https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.1990.tb06907.x>
- Noroozi, B., Sorial, G., Bahrami, H., & Arami, M. (2007). Equilibrium and kinetic adsorption study of a cationic dye. *Journal of Hazardous*, 139, 167–174.
- Oladoja, N., Aboluwoye, C., Oladimeji, Y., Ashogbon, A., & Otemuyiwa, I. (2008). Studies on castor seed shell as a sorbent in basic dye contaminated wastewater remediation. *Desalination*, 227, 190–203.
- Oller, I., Malato, S., & Sánchez-Pérez, J. (2011). Combination of advanced oxidation processes and biological treatments for wastewater decontamination—a review. *Sci Total Environ*, 4141-4166.

- Ong , S., Uchiyama , K., Inadama , D., Ishida , Y., & Yamagiwa , K. (2010). Treatment of azo dye Acid Orange 7 containing wastewater using up-flow constructed wetland with and without supplementary aeration. *Bioresour Technol* 101, 9049–9057.
- Ong, S., Keng, P., Lee, W., Ha, S., & Hung, Y. (2011). Dyes waste treatments. *Water*, 3, 156-157.
- Oxford, U. d. (1999). Complutense. *Diccionario de Química, 1er ed.* Madrid: Complutense, 160 P.
- Peter-Varbanets. (06 de 12 de 2015). *ravity-driven membrane disinfection for household water treatment*. Obtenido de Eawag: [https://www.eawag.ch/fileadmin/Domain1/Abteilungen/eng/projekte/trinkwasser/gdm/Ab\\_6796.GDMD\\_final\\_report\\_Peter\\_032015.pdf](https://www.eawag.ch/fileadmin/Domain1/Abteilungen/eng/projekte/trinkwasser/gdm/Ab_6796.GDMD_final_report_Peter_032015.pdf)
- Peter-Varbanets, M., Hammes, F., Vital, M., & Pronk, W. (2010). Stabilization of flux during dead-end ultra-low pressure ultrafiltration. *Water Res* 44, 3607–3616.
- Petrinic, I., Andersen, N. P., Sostar-Turk, S., & Le Marechal, A. M. (2007). The removal of reactive dye printing compounds using nanofiltration. *Dyes and Pigments*, 74, 512-518.
- Pintar, A., Besson, M., Gallezot, P., & Durecu, S. (2001). Catalytic wet air oxidation of Kraft bleach plant effluents in a trickle-bed reactor over a Ru/TiO<sub>2</sub> catalyst. *Appl Catal B Environ* 31, 275–290.
- Piña, S. (05 de Agosto de 2018). *Decoloracion biologica del colorante azul directo 2 en un filtro anaerobio/aerobio*. Obtenido de Tesis para obtener el grado de Maestro en Ingenieria. Instituto de Ingenieria. Universidad Nacional Autonoma de Mexico : <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/1732/pi%C3%B1amondragon.pdf?sequence=1>
- Qin, J. J., Oo, M. H., & Kekre, K. A. (2007). Nanofiltration for recovering wastewater from a specific dyeing facility. *Separation and Purification*, 199-203.
- Quan, X., Lu, X., Bo, L., Chens, S., Zhao, Y., & Cui, X. (2004). Regeneration of acid orange-7 exhausted granular activated carbons with microwave irradiation. *Water Research*, 38, 4484-4490.

- Rae , I. B., Stuart , G. W., & Shuguang, L. (2009). Biosorption of Hg from aqueous solutions by crab carapace. *Journal of Hazardous Materials* 164, 1601-1604.
- Ramos, F. S., & Blanco, B. A. (2017). Decoloracion y degradacion de azul de metileno presente en agua. *Tesis para obtener el grado de Ingenieria Ambiental. Universidad Libre de Colombia.* .
- Regnery , J., Püttmann , W., Merz , C., & Berthold , G. (2011). Occurrence and distribution of organophosphorus flame retardants and plasticizers in anthropogenically affected groundwater. *J Environ Monit* 13, 347–354.
- Reungoat , J., Macova , M., & Escher , B. (2010). Removal of micropollutants and reduction of biological activity in a full scale reclamation plant using ozonation and activated carbon filtration. *Water Res*, 625–637.
- Richardson , S. (2008). Environmental mass spectrometry: emerging contaminants and current issues. *Anal Chem* 8, 4373–4402. Recuperado el 16 de NOVIEMBRE de 2017
- Richardson , S., & Ternes , T. (2011). Water analysis: emerging contaminants and current issues. *Anal Chem* 83, 4614-4648.
- Robens, J. F., Dill, G. S., Ward, J. M., Joiner, J. R., Griesemer, R. A., & Douglas, J. F. (1980). Thirteen-week subchronic toxicity studies of Direct Blue 6, Direct Black 38 and Direct Brown 95 dyes. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 54, 431–442.
- Robinson, T., Chandran, B., & Nigam, P. (2002). Removal of dyes from an artificial textile dye effluent by two agricultural waste residues, corncob and barley husk. *Environment International*, 28, 29–33.
- Robinson, T., Chandran, B., & Nigam, P. (2002). Removal of dyes from a synthetic textile dye effluent by biosorption on apple pomace and wheat straw. *Water Res* 36, 2824–2830.
- Roy , J., & Bickerton , G. (2010). Proactive screening approach for detecting groundwater contaminants along urban streams at the reach-scale. *Environ Sci Technol* 44, 6088–6094.
- Saeed, A., & Iqbal, M. (2005). Removal and recovery of lead (II) from single and multimetal (Cd, Cu, Ni, Zn) solutions by crop milling waste (black gram husk). *Journal of Hazardous Materials* 117, 65-73.



- Saiano, F., Ciofalo, M., Cacciola, S. O., & Ramirez, S. (2005). Metal ion adsorption by *Phomopsis* sp. biomaterial in laboratory experiments and real wastewater treatments. *Water Research* 39, 2273-2280.
- Salem, N. M., & Awwad, A. M. (2011). Biosorption of Ni(II) from electroplating wastewater by modified (*Eriobotrya japonica*) loquat bark. *Journal of Saudi Chemical Society*, 24-56.
- Saratale, R., Saratale, G., Chang, J., & Govindwar, S. (2011). Bacterial decolorization and degradation of azo dyes: a review. *J Taiwan Inst Chem Eng* 42, 138-157.
- Sarate, R., Sarate, G., Chang, J., & Govindwar, S. (2011). Bacterial decolorization and degradation of Azo dyes. A review. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 42, 138-157.
- Satiroglu, N., Yalcinkaya, Y., Denizli, A., & Aric, M. Y. (2002). Application of NaOH treated *Polyporus versicolor* for removal of divalent ions of Group IIB elements from synthetic wastewater. *Process Biochemistry* 38, 65-72.
- Schiewer, S., & Volensky, B. (1995). Modelling of the proton metal ion exchange in biosorption. *environmental science & technology*, 3049-3058.
- Sciban, M., Klasnja, M., & Skrbic, B. (2008). Adsorption of copper ions from water by modified agricultural by-products. *Desalination*, 229, 170–180.
- Sen, T. K., Afroze, S., & Ang, H. (2011). Equilibrium, kinetics and mechanism of removal of methylene blue from aqueous solution by adsorption onto pine cone biomass of *Pinus radiata*. *Water, Air, & Soil Pollution*, 218, 499–515.
- Sen, T. K., Afroze, S., & Ang, H. (2011). Equilibrium, kinetics and mechanism of removal of methylene blue from aqueous solution by adsorption onto pine cone biomass of *Pinus radiata*. *Water, Air, & Soil Pollution*, 218(1–4), 499–515.
- Sen, T. K., Afroze, S., & Ang, H. (2011). Equilibrium, kinetics and mechanism of removal of methylene blue from aqueous solution by adsorption onto pine cone biomass of *Pinus radiata*. *Water, Air, & Soil Pollution*, 218(1–4), 499–515.
- Shende, R. V., & Mahajani, V. (2002). Wet oxidative regeneration of activated carbon loaded with reactive dye. *Waste Management*, 22, 73-83.

- Shu, H. (2006). Degradation of dyehouse effluent containing C.I. Direct Blue 199 by processes of ozonation, UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and in sequence of ozonation with UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. *Journal of Hazardous Materials*, 133, 92-98.
- Shuguang, L., Stuart , G., & Cochrane, E. (2007). Effective removal of zinc ions from aqueous solutions using crab carapace biosorbent. *Journal of Hazardous Materials* 149, 208-217.
- Sivaraj, R., Namasivayam, C., & Kadirvelu, K. (2001). Orange peel as an adsorbent in the removal of acid violet 17 (acid dye) from aqueous solutions. *Waste Management*, 21, 105–110.
- Smith, J. (1986). *Ingenieria de la Cinetica Quimica*. Compañía Editorial Continental.
- Song, S., Ying, H., He, Z., & Chen, J. (2007). Mechanism of decolorization and degradation of CI Direct Red 23 by ozonation combined with sonolysis. *Chemosphere*, 66, 1782-1788.
- Soon , A. N., & Hameed, B. H. (2011). Heterogeneous catalytic treatment of synthetic dyes in aqueous media using Fenton and photo-assisted Fenton process. *Desalination*, 269, 1-294.
- Sponza , D., & Isik , M. (2015). Toxicity and intermediates of C.I. Direct Red 28 dye through sequential anaerobic/aerobic treatment. *Process Biochem* 40, 2735–2744.
- Stuart, M., Manamsa , K., Talbot , J., & Crane , E. (16 de 11 de 2017). *Emerging contaminants in groundwater*. British Geological Survey. Obtenido de Natural Environment Research Council. : <http://nora.nerc.ac.uk/14557/>
- Sun , G., & Xu , X. (1997). Sunflower stalks as adsorbents for color removal from textile wastewater. *Ind Eng Chem Res* 36, 808–812.
- Ternes , T., & von Gunten , U. (2010). Editorial to special issue in water research: emerging contaminants in water. *Water Res*, 351.
- UNAM. (2015). *Estudio microscopio de los microorganismos*. Obtenido de [http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/7fTinciones\\_27340.pdf](http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/7fTinciones_27340.pdf)
- Vadivelan, V., & Kumar, K. V. (2005). Equilibrium, kinetics, mechanism, and process design for the sorption of methylene blue onto rice husk. *Journal of Colloid and Interface Science*, 286,, 90–100.

- Valderrama, J., & Galvis , L. (2006). Hydraulic transients with genetic algorithms used for leakage detection . *Real water distribution networks* , 1-9.
- Vasudevan, P., Padmavathy, V., & Dhingra, S. (2003). Kinetics of biosorption of cadmium on Baker's yeast. *Bioresource Technology* 89, 281-287.
- Velmurugan , P., Rathina , K. V., & Dhinakaran , G. (2011). Dye removal from aqueous solution using low cost adsorbent. *Int J Environ Sci* 1, 1493–1503.
- Venturini, S., & Tamaro, M. (1979). Mutagenicity of anthraquinone and azo dyes in Ames Salmonella typhimurium test. *Mutation Research*, 68, 307–312.
- Vilaseca, M., Lopez, V., Gutierrez, C., & Crespi, M. (2015). Metodos de eliminacion del color en efluentes de tintura. *Laboratorio de Control de la Contaminación Ambiental del Instituto de Investigación Textil (INTEXTER)*., 1-10.
- Villanueva, A. (2007). Estudio de la remocion de cromo hexavalente presente en solucion acuosa empleando la biomasa de la musa paradisiaca como biosorbente. *Tesis para obtener el grado de Licenciatura en Ciencias Ambientales. UAEM.*
- Villanueva, A. (Noviembre de 2017). Estudio de la remocion de cromo hexavalente presente en solucion acuosa empleando la biomasa de la musa paradisiaca como biosorbente. *Tesis para obtener el grado de Licenciatura en Ciencias Ambientales. UAEM.*
- Volenskii, B. (2001). Detoxification of metal-bearing effluents: biosorption for the next century. *Hydrometallurgy* 59, 203-216.
- Volesky, B. (2003). Sorption and biosorption. *B.V. Sorbex, Inc. Montreal-St. Lambert, Quebec, Canada*, 24-35.
- Wan , X., Li, D., & Zhang , Z. (2008). *Green tea and black tea. In: Tea and Tea Products: Chemistry and Health-*. Boca Raton, FL: Ho, Chi-Tang ; Lin, Jen-Kun ; Shahidi, Fereidoon;
- Wang , S., & Huiting , L. (2007). Kinetic modelling and mechanism of dye adsorption. *Dyes and Pigments*, 72.
- Wang, L., & Yan , G. (2011). Adsorptive removal of direct yellow 161 dye from aqueous solution using bamboo charcoals activated with different chemicals. *Desalination*, 274 , 81-90.

- Weng, C. H., Lin, Y. T., Chang, C. K., & Liu, N. (2013). Decolourization of direct blue 15 by Fenton/ultrasonic process using a zero-valent iron aggregate catalyst. *Ultrasonic Sonochemistry*, 20, 970-977.
- Wu, J., Doan, H., & Upreti, S. (2008). Decolorization of aqueous textile reactive dye by ozone. *Chemical Engineering Journal* 142, 156-160.
- Xiong, J. B., & Mahmood, Q. (2010). Adsorptive removal of phosphate from aqueous medium by peat. *Desalination* 259, 59-64.
- Yan, G., & Viraraghavan, T. (2006). Heavy metal removal from aqueous solution by fungus *Mucor rouxii*. *Water Research* 37, 4486-4496.
- Yu, Z., Qi, T., Qu, J., Wang, L., & Chu, J. (2009). Removal of Ca (II) and Mg (II) from potassium chromate solution on Amberlite IRC 748 synthetic resin by ion exchange. *Journal of Hazardous Materials*, 167, 406–412.
- Zahrim, A. Y., Tizaoui, C., & Hilal, N. (2010). Evaluation of several commercial synthetic polymers as flocculant aids for removal of highly concentrated CI Acid Black 210 dye. *J Hazard Mater* 182, 624-630.
- Zuorro, A., Lavecchia, R., Medici, F., & Piga, L. (2013). Spent tea leaves as a potential low-cost adsorbent for the removal of azo dyes from wastewater. *Chem Eng Trans* 32, 19–24.

