

Reutilización de residuos orgánicos de infusiones para remover un colorante disuelto en fase acuosa

Reuse of organic waste from infusions to remove a dissolved dye in aqueous phase

Eduardo Campos-Medina*
Carolina Garduño-Urbina*

Recibido: marzo 03 de 2021.
Aceptado: noviembre 12 de 2021.

Resumen

En este trabajo de investigación se estudió la remoción de un colorante disuelto en fase acuosa empleando como biosorbente residuos orgánicos de infusiones. El colorante utilizado fue el azul de metileno y el biomaterial fue remanente de té verde. El experimento de biosorción fue tipo batch; las concentraciones de las soluciones sintéticas del colorante azul de metileno fueron 5, 10, 20, 30, 40, 50 mgL⁻¹. Se tomaron 10 mL de cada solución y pusieron en contacto con 10 mg del biomaterial en tubos de ensayo. Las muestras del tratamiento fueron recolectadas en periodos de 5 minutos; posteriormente, se emplearon los equipos de espectrofotometría de ultravioleta y el equipo digestión DQO hach para determinar el porcentaje de remoción del colorante y establecer la reducción de la variable de control la Demanda Química de Oxígeno (DQO). Los resultados mostraron que a los 5 minutos de contacto se genera la máxima remoción de colorante azul de metileno. El proceso de tratamiento generó excelentes resultados para concentraciones bajas del contaminante, que fueron casi del 99% de eficacia. El porcentaje de eficiencia de la disminución del colorante estuvo en función de la concentración del colorante. Se concluyó que la biosorción del colorante se puede realizar utilizando residuos orgánicos de infusiones. El proceso de biosorción se ajustó al modelo teórico de isoterma de Freundlich con un coeficiente de Pearson ($r^2 = 0.998$).

Palabras clave: biosorción, azul de metileno, isoterma de adsorción.

Abstract

In this research work, the removal of a dye dissolved in the aqueous phase was studied using organic waste from infusions as a bio sorbent. Methylene blue was the dye used and remnants of Green tea were the biomaterials. The bio sorption experiment was a batch type, the concentrations of the synthetic solutions of colorant dye were 5, 10, 20, 30, 40 y 50 mgL⁻¹. 10 mL of each solution were taken and they were put in contact with 10 mg of biomaterial in test tubes. The treated samples were collected in periods of 5 minutes. Later on, the ultraviolet spectrophotometry and hach equipment were used to determine the colorant removal degree and to establish the control variable reduction the oxygen chemical demand. The results demonstrated that after 5 minutes of contact the maximum dye removal of blue methylene was executed. The process of this treatment yielded excellent results for low concentrations of the pollutant giving as a result 99% of efficiency. The percentage of effectiveness on diminishing the colorant concentration. It was concluded that bio sorption of the dye can be performed using organic residues from infusions. The bio sorption process was fitted to the theoretical Freundlich isotherm model with a Pearson coefficient ($r^2=0.998$).

Keywords: bio sorption, methylene blue, isotherm.

*Universidad Autónoma del Estado de México, México. Correo electrónico: ecamposm@uaemex.mx

Introducción

La contaminación ambiental afecta a nuestro planeta; este escenario puede definirse como la incorporación de sustancias químicas al ambiente en concentraciones altas que causan efectos nocivos en los seres humanos, animales y vegetales (Beltrami, 2001). La contaminación del ambiente tiene varias manifestaciones como la del agua, que puede ser por compuestos artificiales tanto orgánicos como inorgánicos; dichos materiales afectarían al olor, color, turbiedad, temperatura del agua; asimismo, algunos agentes biológicos, como bacterias, hongos, protozoarios, algas y virus, provocan la generación de enfermedades en los seres vivos que habitan y coexisten en el medio ambiente (Mercado, 2012).

El origen de la contaminación es muy variado, pero algunos causantes son: a) los desechos urbanos e industriales, b) los drenados de la agricultura y de minas, c) la erosión, d) los derrames de sustancias tóxicas (accidentes o intencionales), e) los efluentes de plantas depuradoras, f) los subproductos de procesos de depuración, g) la ruptura de drenajes, entre otros (Jiménez, 2001). En cada una de estas condiciones, la afectación en los cuerpos de agua puede apreciarse a simple vista, específicamente en las variables de color y olor.

A la par de este problema, se busca que las soluciones puestas sobre la mesa se vinculen con el desarrollo sostenible. Este caso particular de investigación se empalma con el manejo sustentable de los residuos que se generan dentro de las mismas urbes, cuyo uso sustentable involucra la intervención tanto de las autoridades municipales de servicios de limpia como de los distintos órdenes de gobierno responsables del desarrollo económico y social, de la protección al ambiente y la salud, de la educación y desarrollo científico y tecnológico, de energía, y otras, además de los sectores de la sociedad (Cortinas de Nava, s/f).

El planteamiento fue manipular los residuos orgánicos de infusiones señalados como té, ya que debido a su naturaleza son una fuente de carbono que puede reutilizarse para investigaciones científicas. Este proyecto se fundamenta en que Canadá, México y Estados Unidos en conjunto generan aproximadamente 265 millones de toneladas anuales de residuos orgánicos. De esta cantidad, en los sectores residencial y comercial se desvían cerca de 75 millones de toneladas por medio de actividades como digestión anaeróbica y compostaje industriales, en tanto que 190 millones de toneladas se envían a disposición final. Canadá y Estados Unidos registran en forma individual una tasa de desvío de residuos orgánicos para aprovechamiento de 32%, en comparación con la tasa en México de 7% (SEMARNAT, 2011).

De ahí, este diseño toma el terreno de desarrollo sustentable y gira en torno al reúso de estos residuos orgánicos que pueden ser empleados en la búsqueda de soluciones de la remoción de contaminantes disueltos en agua residual. Esta idea empieza a desarrollarse y aplicarse en investigaciones científicas, debido a que las sustancias contaminantes vertidas por el hombre tienen características químicas específicas. Asimismo, en este siglo XXI, se demanda que los métodos de remoción sean más amigables con el medio ambiente.

El problema de contaminación del agua, abordado en este estudio, en las últimas tres décadas se han reportado métodos de decoloración biológica, física y química, por industrias específicas, como la papelera y la textil. De manera específica, en diversas investigaciones y propuestas se han desarrollado procesos de tratamiento para la eliminación de colorantes de aguas residuales, tales como: a) degradación foto catalítica (Sohrabi y Ghavam, 2008), b) degradación sonoquímica (Abbasi y Asl, 2008), c) ultrafiltración mejorada micelar (Zaghbani, Hafiane y Dhahbi, 2008), d) membranas de intercambio catiónico (Wu, Liu, Chu y Suen, 2008), e) degradación electroquímica (Fan, Zhou, Yang, Chen y Yang, 2008), f) degradación químico-biológica (Sudarjanto, Keller-Lehmann y Keller, 2006), g) tratamiento foto solar-Fenton acoplado con proceso biológico (García *et al.*, 2008) y h) tratamiento biológico (Lodha y Chaudhari, 2007).

De entre estas numerosas técnicas de eliminación de colorantes, la biosorción es el procedimiento de elección y ha generado excelentes resultados, ya que puede ser utilizado para eliminar diferentes tipos de colorantes disueltos en fase acuosa. Esto inclina la reutilización en general de los residuos orgánicos de manera sustentable y ha generado numerosas investigaciones sobre el desarrollo de adsorbentes más baratos y efectivos. En estos estudios se han utilizado materiales naturales, residuos orgánicos de desechos de materiales de la agricultura para remover sustancias disueltas en el agua (Jain, Gupta y Suhas, 2003).

Por citar algunos casos, Crominski da Silva y Teixeira de Abreu Pietrobelli (2019) utilizaron la biomasa de la extracción del aceite de semilla de chía, con la finalidad de remover al colorante textil reactivo amarillo B2R de soluciones acuosas en un sistema por lotes. Este material orgánico como residuo no requirió un tratamiento previo; el proceso de biosorción respondió muy bien a una temperatura de 303 °K y un tiempo de contacto de hasta 60 min; los resultados mostraron una prometedora aplicación altamente práctica en aguas residuales de industrias textiles. El proceso de biosorción se concluyó efectivo por cinética, termodinámica y estudios de equilibrio. El estudio teórico de adsorción de isoterma indicó la capacidad de biosorción máxima de 70.95 mg g⁻¹ y un parámetro de heterogeneidad de 1.2785; ambos sugieren una buena capacidad de eliminación de contaminantes por biosorbente y un ligero grado de heterogeneidad de la superficie del biosorbente (Crominski da Silva y Teixeira de Abreu Pietrobelli, 2019).

Por su parte, Khalid y Taha (2015) compararon la paja de trigo y carbón activado como biosorbentes; los experimentos se realizaron por lotes utilizando un agitador mecánico, y la temperatura fue al ambiente. Se emplearon soluciones sintéticas del colorante azul de metileno a las concentraciones de 5, 20, 30, 50, 70 y 90 mgL⁻¹, de cada una de las soluciones el pH fue ajustado a los valores de 2.5 a 10.5. El biomaterial tuvo un pretratamiento químico ácido con una solución diluida de ácido sulfúrico para incrementar su capacidad de biosorción. Los tiempos de contacto fueron en periodos de 30 minutos hasta

llegar a los 180 minutos. El experimento se realizó a diferentes dosis (0.1-1g) del biomaterial; los resultados mostraron que, para la paja de trigo modificado, el modelo teórico de isoterma que se ajusta en cuanto a la biosorción es el de Freundlich, y, para el carbón activado, el de Langmuir (Khalid y Taha, 2015).

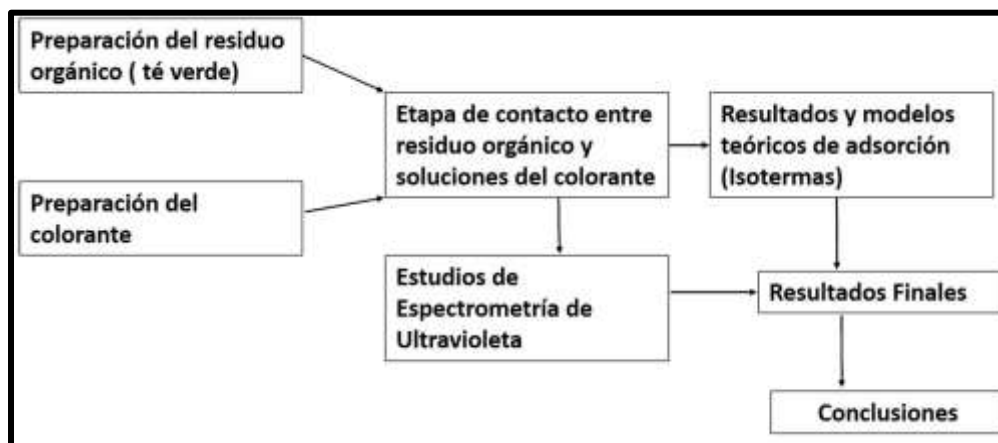
Del mismo modo, Brungesh *et al.* (2015) utilizaron residuos orgánicos de haba de la India para remover Cr(VI) disuelto en fase acuosa; este biomaterial tuvo un pretratamiento químico con la finalidad de incrementar su capacidad de biosorción. Los tiempos de contacto fueron durante 30 minutos hasta llegar a los 180 minutos y la variable control de los experimentos fue el pH. Al término del estudio experimental, se determinó que la eliminación máxima del Cr(VI) fue del 99.8% a un valor de pH de 1 y los resultados generados mostraron que la biosorción se ajustó al modelo teórico de isoterma de Freundlich (Brungesh *et al.*, 2015).

Además, Pandhare, Trivedi, Pathrab y Dawande (2013) realizaron un estudio de remoción de Cd(II) y Pb(II) empleando residuos de hojas de un árbol perteneciente a la familia Meliaceae conocido como Neem. El estudio se realizó en un sistema continuo con diferentes tiempos de contacto; las cuantificaciones de los iones señalados mostraron que la capacidad de adsorción incrementó con la disminución de la concentración del Cd (II) y Pb (II) (Pandhare *et al.*, 2013).

Metodología

En este apartado se describen las etapas de las actividades desarrolladas en la investigación; de manera resumida, se presenta en la figura 1.

Figura 1. 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.

- a) Preparación del residuo orgánico a emplearse de manera natural y lavado con alcohol etílico.

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

- Secado: en este tratamiento se utilizaron residuos orgánicos de té verde, los cuales se secaron por 7 días a los rayos del sol a temperatura ambiente; posteriormente, se terminaron de deshidratar a 70 °C por 5 horas en una estufa del laboratorio.
- Tamizado: una vez seca la biomasa, se pasó por una malla de 40 mesh a fin de tener un tamaño de partícula homogéneo. Posteriormente, el biomaterial se lavó en repetidas ocasiones con alcohol etílico al 98%.

- b) Preparación 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⁻¹. Posteriormente, mediante diluciones, se prepararon soluciones de 5, 10, 20, 30, 40, 50 y 60 mgL⁻¹ del mismo compuesto, con las cuales se preparó la curva patrón con la que se trabajó el equipo de espectrometría de ultravioleta en un intervalo de 200 a 900 nm. Con estos datos, se generó una ecuación de la recta con un coeficiente de correlación (r^2) con un valor de 0.98 y esto estableció el punto de referencia para la determinación de la cantidad de colorante removido de las soluciones que se puso en contacto con el biomaterial.

- c) Etapa de contacto entre residuo orgánico y soluciones del colorante. En este punto se desglosa:

- Tiempo de contacto: de cada una de estas soluciones del colorante, se tomaron 10 mL de muestra (con valores de pH a un intervalo de 6.5- 7.3 y temperatura ambiente) 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 mecánico a 60 rpm), 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.

- d) Estudio de espectrometría de ultravioleta: 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 determinó la cantidad de colorante disuelto. Se

realizó midiendo la absorbancia de las muestras resultantes en un equipo de espectrofotometría de ultravioleta Perkin Elmer Lambda 25. Dicha absorbancia fue transformada a concentración a través de la correspondiente ecuación de la recta generada de la curva de calibración que el mismo equipo generó de soluciones patrones del colorante a diferentes concentraciones.

- e) Modelos teóricos de adsorción: el estudio de los modelos teóricos de la adsorción, en este caso una biosorción, ayuda a entender el comportamiento del analito (colorante) con respecto a la superficie del material. Es decir, la interpretación de cómo el colorante se adhiere a la superficie de los compuestos orgánicos que constituyen al té verde. Con el modelo de Langmuir, el argumento teórico señala que el contaminante se adsorbe sobre el biomaterial formando una monocapa en una superficie homogénea (Rivas, Nuñez, Longoria, y Gonzalez, 2014). 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 (Rivas *et al.*, 2014).

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

- 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 (mgg^{-1})

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

b = Constante empírica (Lmg^{-1})

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

- 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 (mgg^{-1})

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

$1/n$ = Coeficiente de Freundlich

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

- f) Resultados finales: de las soluciones que se filtraron de los tiempos de contacto se recolectaron y se determinó la variable de la Demanda Química de Oxígeno (DQO), siguiendo la metodología de la norma oficial mexicana NMX-AA-030/1-SCFI-2012, (Fondo por la Comunicación y Educación Ambiental, 2013), con el fin de valorar el grado de disminución del colorante en el agua que fue tratada por el proceso de biosorción (Borrero, 2012).

Con los resultados experimentales de la DQO, se estableció el porcentaje de remoción; sin embargo, debido a la transversalidad del sector hídrico, existen diversas normas aplicables al tema de investigación desarrollado. 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.

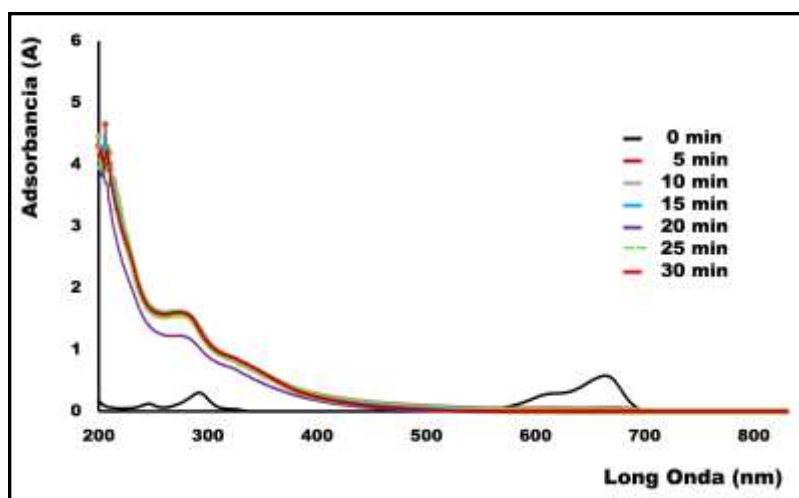
Debido a que México no cuenta con alguna normatividad específica que se encargue de regular la cantidad de color en los efluentes provenientes de industria, principalmente, en la industria textil, existe una preocupación por eliminar el color de las aguas residuales (Alamillo, 2013). En 2002, la Secretaría de Salud dio a conocer la NOM-201-SSA1-2002 "Productos y servicios de hielo y agua para consumo humano, envasados y a granel. Especificaciones sanitarias", donde se explica que estos productos no pueden tener más de 15 unidades de color verdadero en la escala de platino cobalto (SSA, 2002).

Resultados y discusión

Espectros de remoción del colorante azul de metileno

Para realizar esta actividad, se colocaron las muestras de las soluciones sintéticas del colorante en tubos de ensayo y agregaron a cada tubo 100 mg de la biomasa; posteriormente, se procedió al respectivo proceso de adsorción. Finalizada esta actividad, se realizaron filtraciones por gravedad para recuperar las biomásas manipuladas de todos los tiempos de tratamiento y de todas las concentraciones de las soluciones recolectadas; después, fueron llevadas al equipo de espectrofotometría de ultravioleta para determinar el porcentaje de remoción. La solución correspondiente a la concentración de 5 mgL⁻¹ se muestra en la figura 2.

Figura 2. Espectro de remoción del colorante azul de metileno a 5 mgL⁻¹

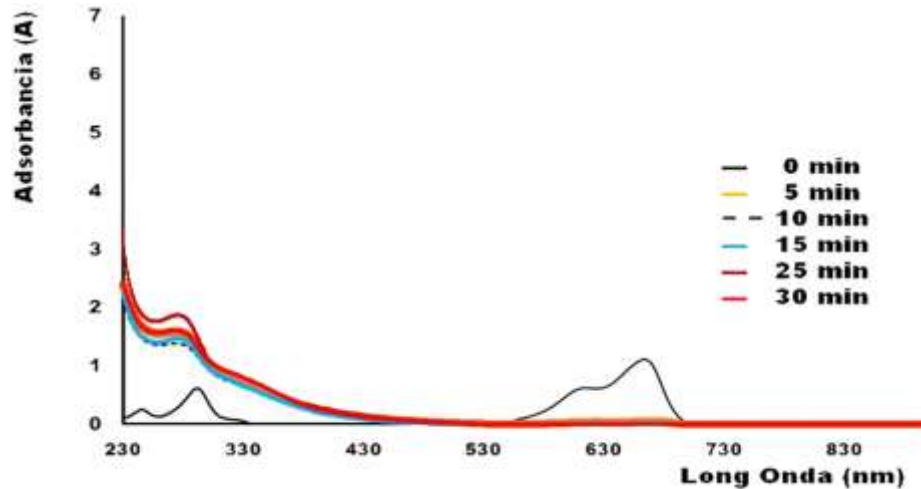


Fuente: elaboración propia.

En la figura 2 se puede apreciar en color negro del colorante (5mgL⁻¹) sin proceso de adsorción. En el rango de 600 y 700 nm se aprecia un pico que 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, lo cual indica que parte del colorante ha sido adsorbido. Sin embargo, se puede apreciar también que el rango de 400 a 200 nm tiene otras especies químicas diferentes al colorante, 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.

En la figura 3 se muestra el espectro de la solución tratada de concentración de 10 mgL^{-1} y 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 corroboró ya que en todas estas ondas no aparece el pico correspondiente del colorante azul de metileno.

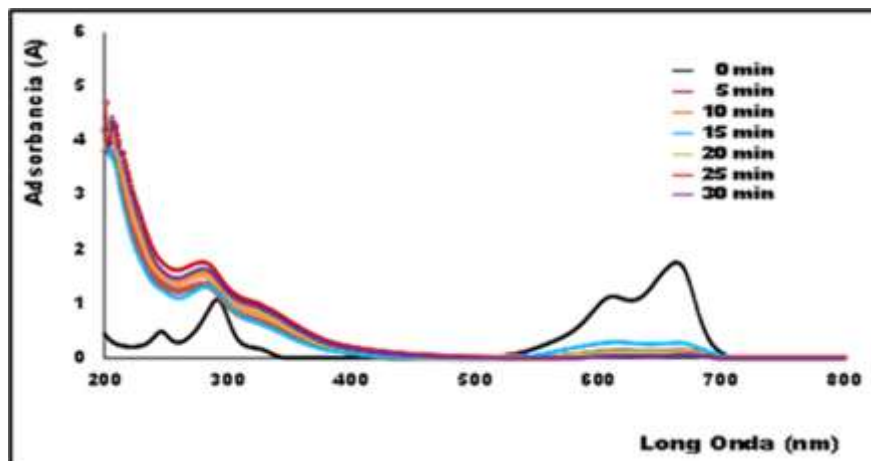
Figura 3. Espectro de remoción del colorante azul de metileno a 10 mgL^{-1}



Fuente: elaboración propia.

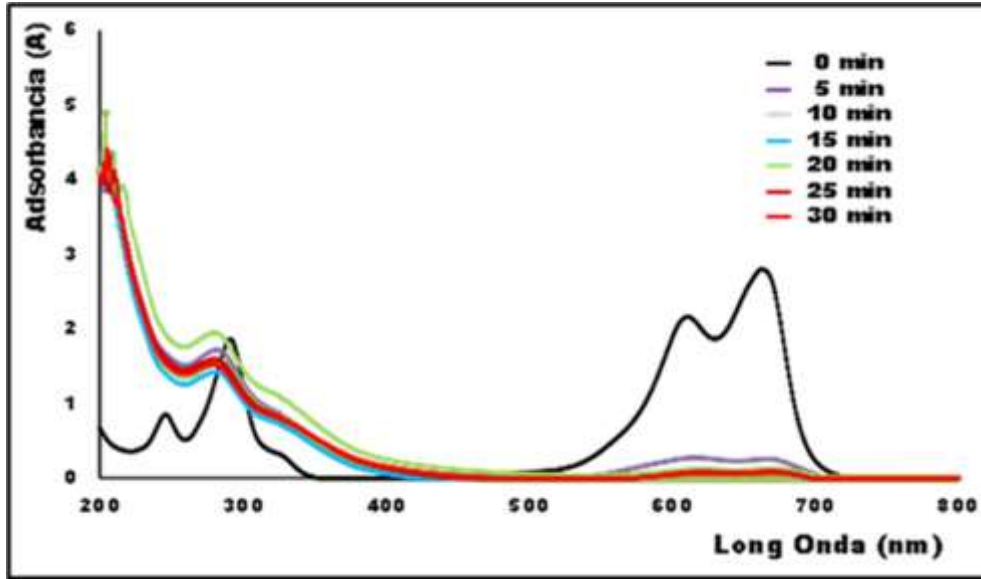
En la figura 4 (concentración colorante 20 mgL^{-1}) se aprecia que, conforme aumenta la concentración del colorante, la remoción va disminuyendo, lo cual se establece con la altura de cada una de las ondas de los diferentes tiempos de tratamiento. Este mismo comportamiento se observó en la figura 5 que corresponde a la concentración de 30 mgL^{-1} .

Figura 4. Espectro de remoción del colorante azul de metileno a 20 mgL^{-1}



Fuente: elaboración propia.

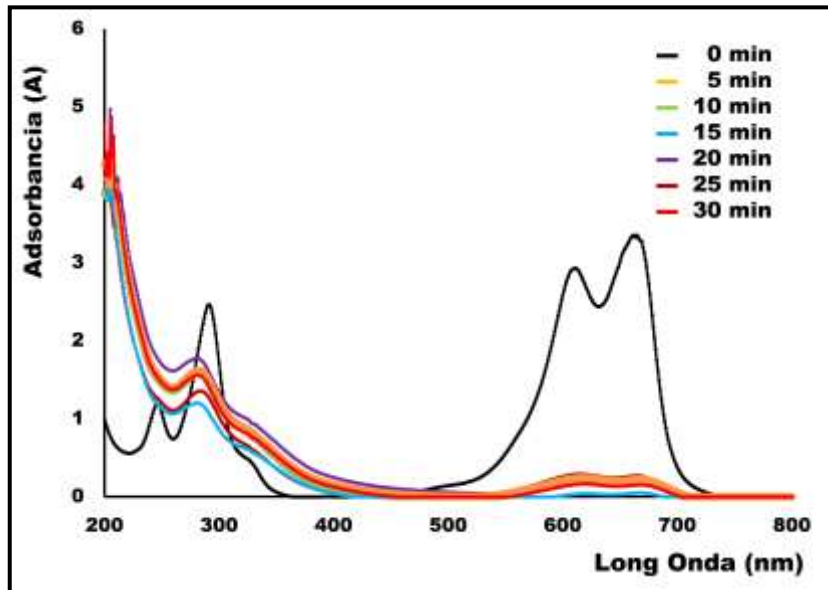
Figura 5. Espectro de remoción del colorante azul de metileno a 30 mgL⁻¹



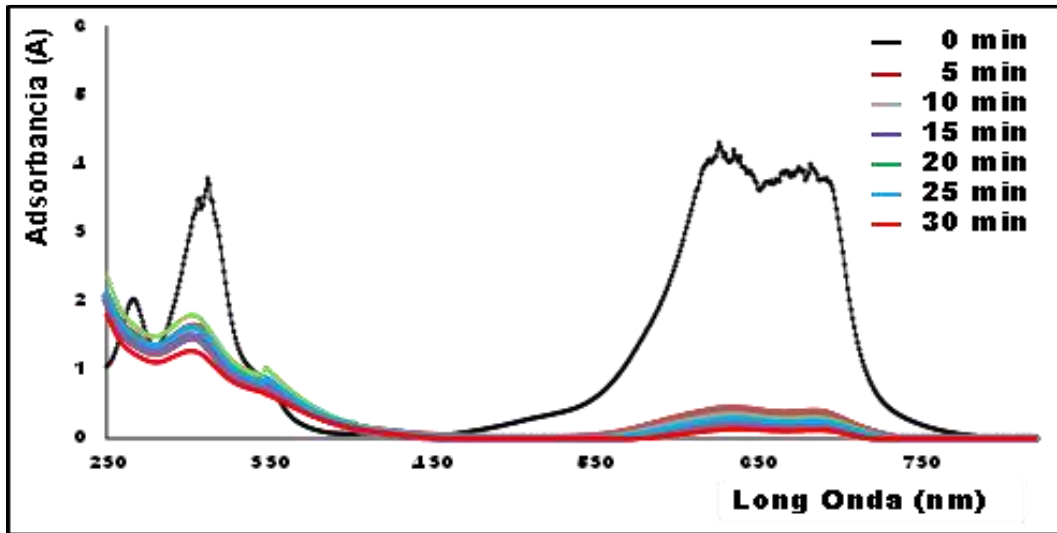
Fuente: elaboración propia.

En la figura 5 se observa nuevamente el comportamiento del proceso de remoción, es decir, 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 mgL⁻¹, que corresponden a las figuras 6 y 7.

Figura 6. Espectro de remoción del colorante azul de metileno a 40 mgL⁻¹

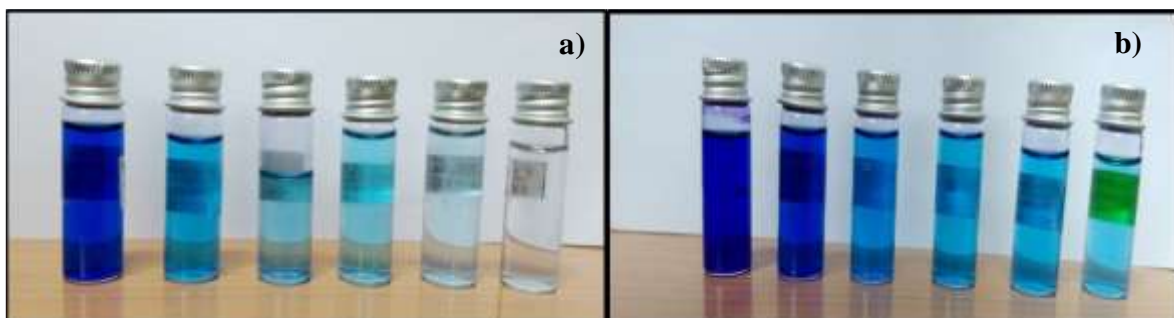


Fuente: elaboración propia.

Figura 7. Espectro de remoción del colorante azul de metileno a 50 mgL^{-1} 

Fuente: elaboración propia.

Estos resultados constataron la remoción del colorante después del tratamiento de biosorción; a simple vista se pudo apreciar la disminución del color, lo cual se corroboró mediante las imágenes de la figura 8a y 8b que corresponden a las concentraciones de 30 y 50 mgL^{-1} . Los frascos con la solución del colorante sin tratamiento se ubican del lado izquierdo y los del lado derecho son los de diferentes tiempos de tratamiento. Se aprecia que, conforme aumentó el tiempo de contacto, la coloración disminuyó gradualmente.

Figura 8a. Frascos con colorante de 30 mgL^{-1} Figura 8b. Frascos con colorante de 50 mgL^{-1} , en el tiempo cero y con tiempos de tratamiento

Fuente: elaboración propia.

Determinación del porcentaje de remoción después del contacto

Los porcentajes de remoción generados se muestran en la tabla 1; esta fase experimental se realizó por triplicado y se indica la media de dichos resultados.

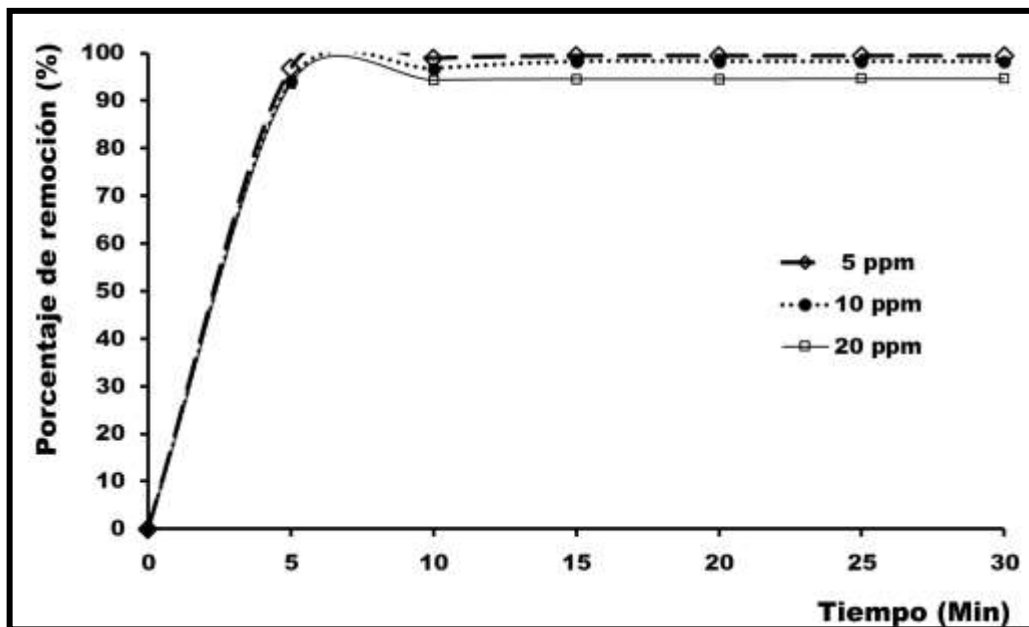
Tabla 1. Resultados de remoción del colorante azul de metileno con el biomaterial

Concentración/solución inicial	Tiempo (min)	Concentración de colorante en el agua (ngL ⁻¹)	% Porcentaje de remoción
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
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.

De estos resultados se realizaron las respectivas gráficas de remoción que muestran el grado de reducción en la concentración del colorante azul de metileno en función del tiempo de tratamiento. En la figura 9 se graficaron los porcentajes de remoción de las concentraciones de azul de metileno a 5, 10 y 20 mgL⁻¹. Se puede apreciar claramente que a los 5 minutos para las tres concentraciones se alcanza casi el 100% de remoción y, posteriormente, se tiende a pequeños incrementos en cuanto al valor de porcentaje de remoción, siendo el 5 mgL⁻¹ en el que se alcanzan porcentajes cercanos al 100%.

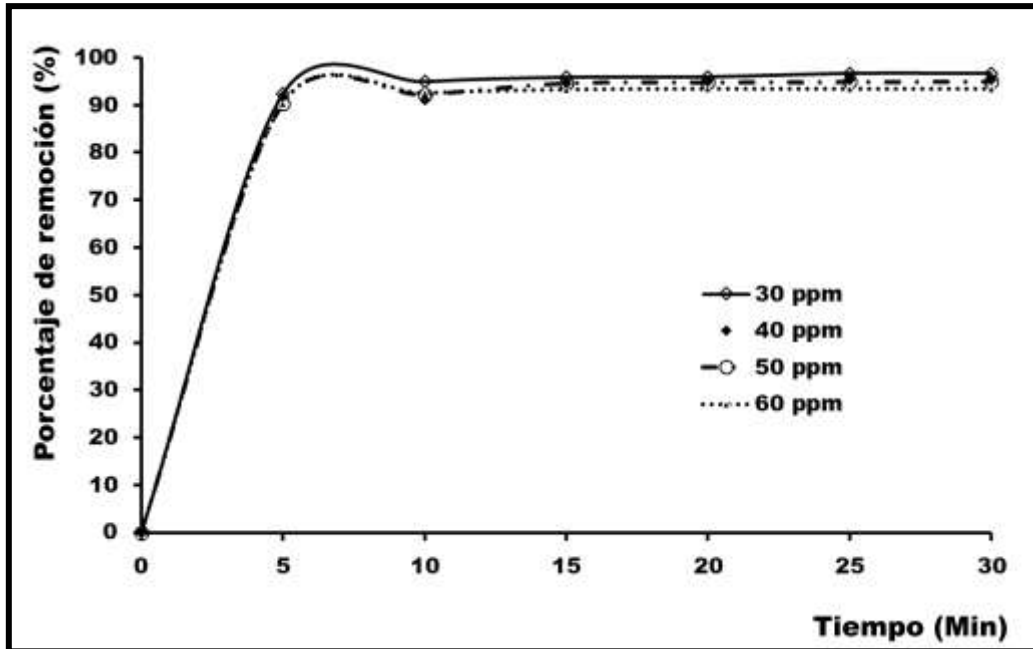
Figura 9. Porcentaje de remoción del colorante a las concentraciones de 5, 10 y 20 mgL⁻¹ de azul de metileno



Fuente: elaboración propia.

De igual manera, en la figura 10 se muestran las gráficas de remoción del colorante a las concentraciones de 30, 40, 50 y 60 mgL⁻¹ de azul de metileno.

Figura 10. Porcentaje de remoción del colorante a las concentraciones de 30, 40, 50 y 60 mgL⁻¹ de azul de metileno



Fuente: elaboración propia.

En la figura 10 se muestran los porcentajes de remoción calculados; se sitúan por arriba del 90% de eficiencia. Si se comparan todas las eficiencias, se estableció 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.

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 las 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 en la tabla 2, que únicamente corresponden a la isoterma de Langmuir.

Tabla 2. Resultados para isoterma de Langmuir

Concentración de solución del colorante (mgL ⁻¹)	C _e (mgL ⁻¹)	q _e (m ³ g ⁻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.

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, lo cual se muestra en la tabla 3.

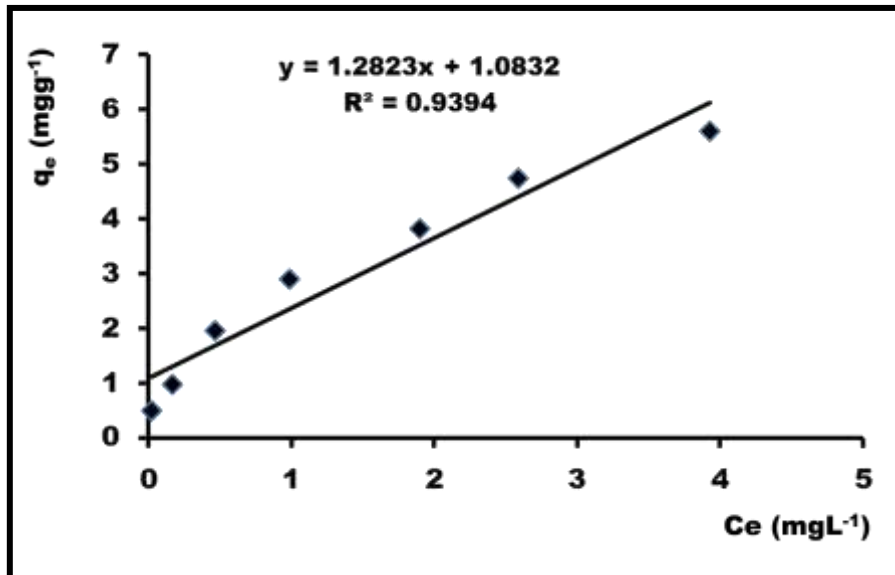
Tabla 3. Resultados para la isoterma de Freundlich

Concentración de solución del colorante (mgL ⁻¹)	Log C _e	Log q _e
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.

De los resultados de las tablas 2 y 3 se graficó la correspondiente linealización de isotermas. En la Figura 11 se muestra la isoterma de Langmuir, obteniéndose la ecuación de la recta, así como su coeficiente de correlación (r^2).

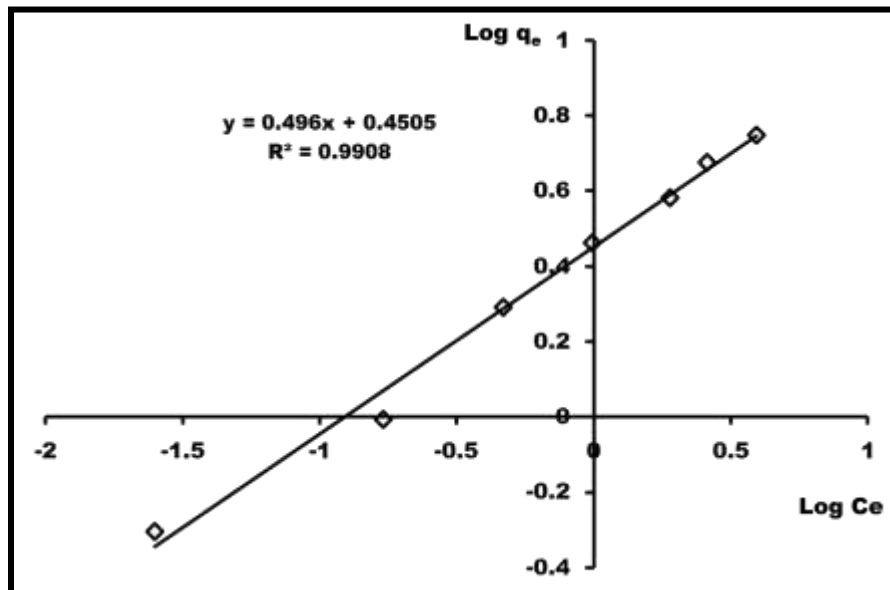
Figura 11. Isoterma de Langmuir



Fuente: elaboración propia.

En esta isoterma se muestra la línea de tendencia y el coeficiente de correlación con un valor de 0.9394 que en sí es un resultado cuyo significado es que existe una cierta relación directa entre la concentración del analito en fase acuosa (C_e) y el biomaterial que lo retiene en la superficie. En la figura 12 se observa la isoterma de Freundlich, en la cual también generó la línea de tendencia correspondiente y el coeficiente de correlación.

Figura 12. Isoterma de Freundlich



Fuente: elaboración propia.

De estas dos gráficas se realizó una 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 Freundlich alcanzó 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 indicó 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 (Rivas *et al.*, 2014) sobre su superficie, siendo, a su vez, que ésta es totalmente heterogénea.

De los modelos de Langmuir y Freundlich se determinan las capacidades máximas de remoción, siendo Q_o (cantidad del soluto adsorbido por peso unitario de adsorbente) y K (energía de adsorción) para la isoterma de Langmuir. Para Freundlich, se consideraron K_f (constante de Freundlich) y $1/n$ (Coeficiente de Freundlich), para lo cual se tomaron en consideración las dos ecuaciones de las rectas generadas de los datos de regresión. En el modelo de Langmuir se tiene:

$$Y = 1.2823x + 1.0823$$

De esta ecuación se toma como la pendiente "m" a 1.2823 y a "b" a 1.0823, entonces

$$m = 1.2823 \text{ y } b = 1.0823$$

$$Q_o = \frac{1}{m} = \frac{1}{1.2823} = 0.821 \text{ mg/g}$$

$$k = \frac{1}{bQ_o} = \frac{1}{0.821} = 1.14 \text{ L/mg}$$

Para el modelo de Freundlich, se tiene la ecuación:

$$y = 0.496x + 0.4505$$

De esta expresión se toman como “*m*” a 0.496 y a “*b*” como 0.4505, entonces tomando estos valores $m = 1/n$ y $K_f = 10^b$. Se sustituyen los valores correspondientes y se tiene:

$$m = \frac{1}{n} = 0.496$$

$$K_f = 10^{0.4505} = 2.82 \text{ mg/g}$$

Finalmente, se compararon los dos valores de máxima capacidad de adsorción del analito (colorante azul de metileno) sobre el adsorbente (residuos orgánicos), esto se muestra como Q_o contra K_f . Esto implica contrastar 0.821 mg/g con 2.82 mg/g, y con ello se estableció que tiene mayor magnitud de retención el modelo de Freunlich.

Resultados de la Demanda Química de Oxígeno

Los resultados de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) se muestran en la tabla 4. Como se puede apreciar, la remoción del colorante en función del tiempo de tratamiento de la concentración del colorante va decreciendo y, por consecuencia, los valores de la DQO y el porcentaje de remoción también disminuyen. Esto se estableció deduciendo las proporciones de las eficiencias de remoción; el 99% corresponde a bajas concentraciones del colorante (5ppm) y el 92 % generado recae para la alta concentración del colorante (60 ppm), lo cual indicó que los sitios activos (Leyva, Díaz, Guerrero, Mendoza y Aragón, 2004) de la biomasa se saturan rápidamente debido a las concentraciones altas del colorante. No obstante, todas las concentraciones de las soluciones sintéticas del colorante son bajas, pero se establece que el tratamiento, que es la biosorción, tiene excelentes resultados a bajas concentraciones del contaminante.

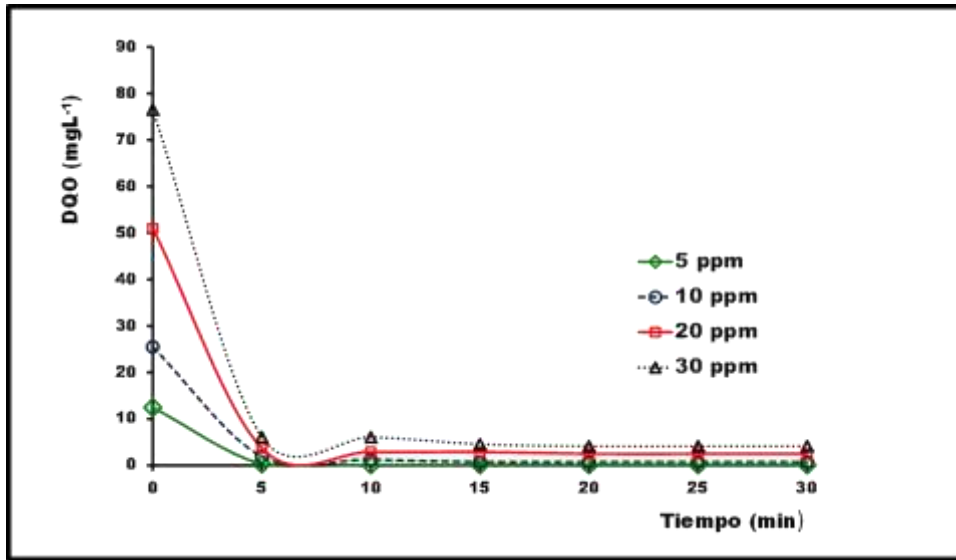
De la tabla 4, se trazaron las gráficas correspondientes a la variable DQO, con la finalidad de analizar la proporción de reducción del colorante en función del tratamiento. La razón de decrecimiento de cada solución del colorante se puede visualizar en las figuras 13 y 14.

Tabla 4. Resultados de la DQO de las soluciones tratadas

Concentración/ solución inicial	Tiempos	DQO	Porcentaje de remoción %
5 ppm	0	12.5	0
	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	0
	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	0
	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	0
	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	0
	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
50 ppm	0	127.55	0
	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	0
	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.

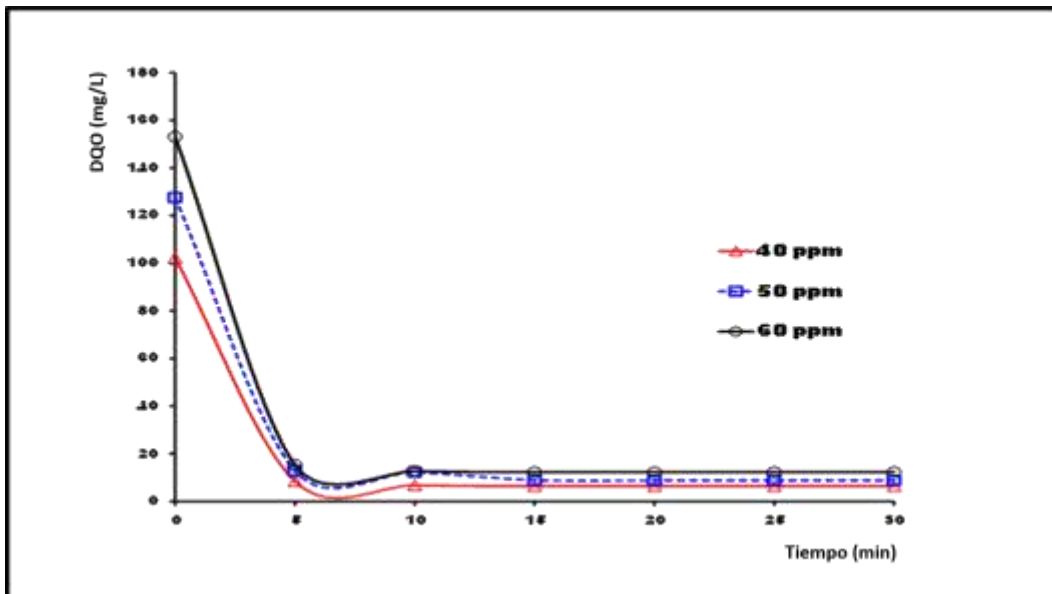
Figura 13. Demanda Química de Oxígeno (concentraciones 5, 10, 20 y 30 mgL⁻¹)



Fuente: elaboración propia.

En la figura 13 se aprecia que en las bajas concentraciones del colorante (5, 10, 20, 30 mgL⁻¹) durante los primeros cinco minutos se alcanza 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, lo cual significa que los sitios activos ya han sido ocupados por las moléculas del colorante.

Figura 14. Demanda Química de Oxígeno (concentraciones 40, 50 y 60 mgL⁻¹)



Fuente: elaboración propia.

En la figura 14 se muestra el comportamiento de las últimas concentraciones del colorante. En las concentraciones de 40, 50 y 60 mgL⁻¹ 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; después, el porcentaje de remoción crece muy poco. Este planteamiento se relacionó con el valor de la DQO, que disminuyó en los primeros minutos; posteriormente, el comportamiento fue casi constante.

Conclusiones

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

- El porcentaje de remoción del colorante fue casi del 99% de eficiencia a bajas concentraciones. El incremento de la concentración del colorante propició el decremento de la eficiencia del proceso de tratamiento.
- El comportamiento de abatimiento de eficiencia se corroboró mediante el análisis de los espectros de ultravioleta del colorante y de los resultados del parámetro de la DQO.
- 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. El mejor resultado de coeficiente fue de 0.9908 para el modelo de isoterma señalado.
- De acuerdo con los datos obtenidos, se requieren más de 5 minutos de tiempo de retención para obtener la máxima remoción de colorante azul de metileno a sus concentraciones experimentales.

Referencias

- Abbasi, M. y Asl, N. R. (2008). Sonochemical degradation of Basic Blue 41 dye assisted by nanoTiO₂ and H₂O₂. *Hazard Mater*, 942-947.
- Alamillo, V. (2013). *Remoción de Colorantes Orgánicos azul índigo y Tartrazina, en Solución Acuosa, empleando Nanopartículas de Hierro aportadas en Piedra Volcánica de Óxido de Hierro (Tezontle)*, (Tesis de Licenciatura), Toluca: Universidad Autónoma del Estado de México. Recuperado de: <http://ri.uaemex.mx/handle/20.500.11799/14391>
- Beltrami, C. R. (2001). *La contaminación el equilibrio ecológico*. Buenos Aires: Longseller.
- Borrero, F. (2012). *Determinación de la Demanda Química de Oxígeno en aguas naturales o de desperdicios*. Recuperado de: <https://sites.google.com/site/portafolioelectronicochem350/laboratorio/determinacion-de-la-demanda-quimica-de-oxigeno-en-aguas-naturales-o-de-desperdicios>.

- Brungesh, K. V., Nagabhushana, B. M., Raveendra, R. S., Hari Krishna, R., Prashantha, P. A., y Nagabhushana, H. (2015). Adsorption of Cr(VI) from Aqueous Solution onto a Mesoporous. *Environmental y Analytical Toxicology*, 1-7.
- Cortinas de Nava, C. (s/f) *Manejo Sustentable de Residuos*. Recuperado de: http://www.ceja.org.mx/IMG/PyGA_Art_Cristinas_Cortinas.pdf.
- Crominski da Silvaa, D. C. y Teixeira de Abreu Pietrobelli, J. M. (2019). Residual biomass of chia seeds (*Salvia hispanica*) oil extraction as low cost and ecofriendly. *Environmental chemical ingeneering*.
- Fan, L., Zhou, Y., Yang, W., Chen, G. y Yang, F. (2008). Electrochemical degradation of aqueous solutions of Amaranth azo dye on ACF under potentiostatic model. *Dyes Pigments*, 440-446.
- Fondo por la Comunicación y Educación Ambiental (2013). *NMX-AA-030/1-SCFI-2012*. Recuperado de: <https://agua.org.mx/biblioteca/nmx-aa-0301-scfi-2012-analisis-de-agua-medicion-de-la-demanda-quimica-de-oxigeno-en-aguas-naturales-residuales-y-residuales-tratadas-metodo-de-prueba-parte-1-metodo-de-reflujo-abierto-cancela-a-la-nmx/>
- García, J., Perez, L., Oller, I., Maldonado, M. I., Torrades, F. y Peral, J. (2008). Pilot plant scale reactive dyes degradation by solar photofenton and biological processes. *J. Photochem. Photobiol. A.*, 205-214.
- Jain, A. K., Gupta, V. K. y Suhas, B. A. (2003). Utilization of industrial waste products as adsorbents for the removal of dyes. *J. Hazard Mater.*, 31-42.
- Jiménez, B. E. (2001). *Contaminación Ambiental en México*. Colegio de Ingeniería Ambiental, México: Limusa
- Khalid, M. M. y Taha, A. H. (2015). Adsorption of Reactive Blue Dye onto Natural and Modified Wheat Straw. *Chemical Engineering y Process Technology*, 1-6.
- Leyva, R., Díaz, P. E., Guerrero, R. M., Mendoza, J. y Aragón, A. (2004). Adsorción de Cd(II) en solución acuosa sobre diferentes tipos de fibras de carbón activado. *Revista Sociedad Química de México*, 196-202.
- Lodha, B. y Chaudhari, S. (2007). Optimization of Fenton biological treatment scheme for the treatment of aqueous dye solutions. *J. Hazard Mater*, 459-466.
- Mercado, P. (2012). *Tratamiento de agua alimentados con energía solar: electrocoagulación adsorción contra fotoquímico-adsorción* (Tesis de Maestría), Toluca: Universidad Autónoma del Estado de México
- Pandhare, G. G., Trivedi, N., Pathrabe, R. y Dawande, S. D. (2013). Adsorption of cadmium (ii) and lead (ii) from a stock solution using neem leaves powder as a low-cost adsorbent. *International Journal of Innovative Research in Science*, 5752-5761.
- Rivas, C. F., Nuñez, O., Longoria, F. y Gonzalez, L. (2014). Isotherma de langmuir y freundlich como modelos para la adsorción de componentes de ácido nucleico sobre WO₃. *SABER. Revista Multidisciplinaria del Consejo de Investigación de la Universidad de Oriente*, 43-49.
- SEMARNAT (2011). *Caracterización y gestión de residuos orgánicos de América del Norte*. Recuperado de: <http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documents/Ciga/Libros2011/CD003593.pdf>
- Sohrabi, M. R. y Ghavam, M. (2008). Photocatalytic degradation of Direct Red 23 dye using UGV/TiO₂: effect of operational parameters. *J. Hazard Mater*, 1235-1239.
- SSA (2002). *Norma Oficial Mexicana NOM-201-SSA1-2002. Productos y servicios. Agua y hielo para consumo humano envasados y a granel. Específicamente sanitarias*. Recuperado de: <http://www.salud.gob.mx/unidades/cdi/nom201ssa12.html>
- Sudarjanto, G., Keller-Lehmann, B. y Keller, J. (2006). Optimization of integrated chemical-biological degradation of reactive azo dye using response surace methodology. *J. Hazard Mater*, 160-168.
- Wu, J. S., Liu, C. H., Chu, K. H. y Suen, S. Y. (2008). Removal of cationic dye methyl violet 2B from water by cation exchange membranes. *J. Membr. Sci.*, 239-245.
- Zaghbani, N., Hafiane, A., y Dhahbi, M. (2008). Removal of Safranin T from wastewater using micellar enhanced ultrafiltration. *Desalination*, 348-356.