

Evaluación de la eficiencia fotocatalítica de nanopartículas de TiO₂, TiO₂-Au y TiO₂-Ag frente a dos colorantes reactivos

Arenas González Luis Enrique¹, Espinoza-Castañeda Marisol^{1*}, Hernández Fernández Javier²,
Haro Pérez Catalina¹

¹Universidad Autónoma Metropolitana, Departamento de Ciencias Básicas. Av. San Pablo No. 180, Azcapotzalco, Ciudad de México, C.P. 02200. México.

²Instituto Politécnico Nacional. Av. José Loreto Fabela s/n esquina 508, San Juan de Aragón 4^a sección, Gustavo A. Madero, Ciudad de México. C.P. 07950, México.

*Autor para correspondencia: maesca@azc.uam.mx

Recibido:
2/marzo/2020

Aceptado:
26/octubre/2020

Palabras clave:
Colorantes,
fotocatálisis,
TiO₂-X

Keywords:
Dyes,
photocatalysis,
TiO₂-X

RESUMEN

En la actualidad los colorantes son comúnmente utilizados en las industrias farmacéutica y alimenticia, entre otras, siendo la textil responsable de la generación del 20% de las aguas residuales globales. Por lo que en este trabajo se evaluó la eficiencia de nanopartículas de TiO₂, TiO₂-Au y TiO₂-Ag como agentes fotocatalíticos para la decoloración de aguas contaminadas con colorantes azul reactivo 19 (AR19) y naranja reactivo 84 (NR84) a 20, 50 y 100 ppm utilizando lámparas led de 375 nm. Para el AR19 a 100 ppm en 2 horas se obtuvieron decoloraciones de 27.62, 17.31 y 13.37%, para TiO₂, TiO₂-Au y TiO₂-Ag respectivamente, siguiendo el mismo orden para el NR84 las decoloraciones corresponden al 97.61, 84.55 y 32.28%, por lo que se comprueba la eficiencia en la decoloración, al disminuir la concentración los tiempos de remoción se reducen.

ABSTRACT

Nowadays dyes are commonly used in the pharmaceutical, food and textile industries being textile responsible for the generation of 20% of global wastewater. Therefore, in this work the efficiency of TiO₂, TiO₂-Au and TiO₂-Ag nanoparticles was evaluated as photocatalytic agents for the discoloration of contaminated water with dyes reactive blue 19 (AR19) and reactive orange 84 (NR84) at 20, 50 and 100 ppm using 375 nm led lamps. For AR19 at 100 ppm in 2 hours, discolorations of 27.62, 17.31 and 13.37% were obtained, for TiO₂, TiO₂-Au and TiO₂-Ag respectively, following the same order for NR84 the discolorations correspond to 97.61, 84.55 and 32.28%, so that the efficiency in the discoloration is confirmed, reducing the concentration the final removal times are also reduced.

Introducción

En la actualidad, los colorantes son utilizados en casi todas las industrias, como la farmacéutica, alimenticia y textiles por mencionar algunos ejemplos; siendo esta última una de las principales fuentes de contaminación del agua, además es responsable de la generación del 20% de las aguas residuales globales (Forbes, 2019; Anjaneyulu et al., 2005), ya que durante el proceso de teñido de algún producto es donde más contaminación se genera debido a que aproximadamente el 30% de los compuestos se pierden por la ineficiencia, confiriéndole no sólo color al agua sino que también causa modificaciones en la demanda química de oxígeno (DQO), demanda bioquímica de oxígeno (DBO), pH y salinidad (Walters et al., 2005; Dos Santos et al., 2007; Cortázar et al., 2014), la modificación de estas características afecta la flora y fauna marina, además de efectos perjudiciales para la salud humana.

Debido a la alta demanda de colorantes por las tendencias actuales, principalmente la moda, se producen más de 700,000 toneladas de colorantes al año (Basturk y Karatas, 2015; Forbes, 2019), que, en su mayoría pertenecen al grupo azo, los cuales pueden ser carcinógenos y mutagénicos, además que al degradarse producen subproductos más tóxicos (Brown y DeVito, 1994; Ramsay y Nguyen, 2002; Giordano et al., 2005; Gavril y Hodson, 2007). Estos colorantes presentan estructuras complejas y, además su origen sintético les ayuda a resistir la exposición solar, ataques químicos e incluso la degradación microbiana, son tan estables que algunos como el azul reactivo 19 puede perdurar hasta 46 años a condiciones de 25°C y pH de 7 (Hao et al., 2000).

El gasto de agua en la fabricación de prendas no es igual en todos los casos, las variaciones recaen en el tipo de fibra textil y el tipo de colorante a usar: por ejemplo, *“Un par de jeans de algodón con colorantes índigos, necesita un mínimo de 42 litros de agua para ser teñidos, lavados y acabados. Una vez en casa, empleamos más agua, cuidándolos; usando, 21 litros cada vez que los lavamos. La industria textil tiene como principales impactos ambientales el alto consumo del recurso del agua y las aguas residuales, con alta carga contaminante que se generan en los diversos procesos”* (Sánchez y Uribe, 2018).

Según citan Martínez et al., (2010): *“Dependiendo del tipo de colorante, se estima que del 2 al 50% de estos compuestos se desechan en las aguas residuales y se consideran como contaminantes persistentes que no pueden removerse con los métodos convencionales de tratamiento de aguas, debido a su origen y las estructuras complejas que presentan”*.

La mayoría de las industrias textiles liberan sus descargas sin un tratamiento previo, hoy en día algunas de éstas ya tienen implementado un sistema de tratamiento de aguas antes de la descarga, aunque no consideran un proceso específico para la remoción de colorantes, debido a que los métodos químicos y físicos existentes requieren una gran inversión económica y de energía (Cortázar et al., 2012; Maldonado y Molina, 2011).

En la actualidad, el agua es cada vez más demandada debido al aumento poblacional, en consecuencia, la cantidad disponible es cada vez menor (Méndez, 2019). Por lo anterior, el reciclaje de ésta mediante plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) es muy importante.

De todas las clases de colorantes, los de tipo azo son muy utilizados debido a su fácil síntesis en toda la gama de colores con solo modificar su estructura química, además de que los métodos de aplicación no son complejos, lo que los hace versátiles y llamativos para la industria dado que son muy económicos (Garrigós, 2003).

Un gran problema que existe en los métodos convencionales de las PTAR es su baja eficiencia en la remoción de colorantes, debido a su estabilidad química y su alta solubilidad ya que una gran parte de las aguas residuales pertenecen a la industria textil, a las cuales no les aplican un tratamiento previo antes de descargarlas. Es por esto, que es necesario un proceso complementario que pueda introducirse en el tren de tratamiento en las PTAR o la implementación de nuevas PTAR dentro de estas industrias específicamente para la degradación de colorantes, que es lo que se plantea en este proyecto, un proceso de degradación de colorantes por medio de fotocatalisis, para aumentar la eficiencia y reducir el tiempo de degradación, empleando TiO₂, TiO₂-Au y TiO₂-Ag y, así reducir la inversión económica, además de que el uso de luz UV y su consecuente desinfección podría traducirse en una mejora de la calidad del agua tratada y tener un valor más alto en el mercado (Kuhad et al., 2004; Dos Santos et al., 2007).

Metodología

Preparación de las soluciones de agua con colorantes

Los colorantes reactivos azul 19 (AR19) y naranja 84 (NR84), fueron proporcionados por la Escuela Superior de Ingeniería Textil (ESIT) del Instituto Politécnico Nacional, Zacatenco, los cuales fueron disueltos en agua destilada según se necesitó.

Para llevar a cabo esto, se utilizó la Ecuación 1, con la cual se calculó la cantidad de colorante necesaria para alcanzar la concentración deseada.

$$\text{ppm} = (\text{g de soluto}) / (\text{L de solución}) \times 1000 \quad (\text{Ec 1})$$

Además, se utilizó la Ecuación 2, para conseguir las diluciones necesarias para realizar la curva de calibración y las pruebas de degradación de los colorantes.

$$\text{Volumen}_1 * \text{Concentración}_1 = \text{Volumen}_2 * \text{Concentración}_2 \quad (\text{Ec 2})$$

Determinación de la curva de calibración de cada colorante

A partir de la Ecuación 2 se prepararon soluciones con concentraciones desde 10 hasta 150 ppm para cada colorante, con incrementos de 10 ppm, inicialmente se prepararon 50 mL de solución de cada colorante a una concentración de 200 ppm y a partir de ésta se hicieron las diluciones como se indica en la tabla 1.

Tabla 1. Preparación de las soluciones para la curva de calibración para un volumen final de 50 mL.

Concentración inicial (ppm)	Volumen (mL)		Concentración final (ppm)
	colorante	Agua destilada	
200	37.5	12.5	150
150	46.66	3.34	140
140	46.42	3.58	130
130	46.15	3.85	120
120	45.83	4.17	110
110	45.45	4.55	100
100	45	5	90
90	44.44	5.56	80
80	43.75	6.25	70
70	42.85	7.15	60
60	41.66	8.34	50
50	40	10	40
40	37.5	12.5	30
30	33.33	16.67	20
20	25	25	10

Caracterización de las soluciones con colorante y del agua destilada

Espectrofotometría de ultravioleta visible

Para esta prueba se utilizó el espectrofotómetro EPOCH2 de Biotek, donde en una placa de 96 pocillos se colocaron 300 µL de cada dilución, para realizar un barrido de 400 a 700 nm y así obtener el espectro de absorbancia de cada colorante. Posteriormente, con los espectros de se determinó su máximo de absorbancia y se realizaron sus respectivas curvas de calibración, cada dilución fue analizada por triplicado.

Nanopartículas

Todas las nanopartículas (NPs) fueron proporcionadas por el Dr. Javier Hernández. Siendo las NPs de TiO₂ de la

marca Sigma Aldrich (718467) y las modificadas con oro y plata (TiO₂-Au y TiO₂-Ag respectivamente), fueron sintetizadas de acuerdo con la metodología propuesta en su tesis de doctorado (Hernández, 2012).

Dispersión de luz dinámica

A partir de esta prueba se determinó el diámetro hidrodinámico de las nanopartículas en el equipo ZetaSizer de Malvern. Se preparó un mililitro a una concentración de 0.25 mg/mL de cada NPs y se colocaron en tubos Eppendorf (Epp). Después, se tomaron 800 µL de cada suspensión y fueron colocados en una celda de 1 cm² para ser leída en el equipo por triplicado.

Montaje del sistema fotocatalítico

El procedimiento que a continuación se describe, se aplicó para cada una de las combinaciones (por triplicado) entre los colorantes (AR19 y NR84), la concentración (20, 50 y 100 ppm), las nanopartículas a evaluar (TiO₂-Ag, TiO₂-Au y TiO₂), en presencia de luz led de 375 nm como se indica en la tabla 2, donde se muestra la composición de cada reactor.

Tabla 2. Diseño de los reactores para las pruebas de fotocatalisis.

Reactor	Colorante (ppm)	Lámpara
Colorante + TiO ₂	20	X
Colorante + TiO ₂ -Ag	50	X
Colorante + TiO ₂ -Au	100	X

Se colocaron 50 mL de la solución del colorante a evaluar en un cristizador de 100x50 mm de la marca KIMAX que previamente se cubrió con papel aluminio para evitar que la luz se disperse, se le colocó un agitador magnético para posteriormente colocar el cristizador sobre una parrilla de agitación, una vez hecho esto se añadieron las NPs correspondientes a una concentración de 0.25 mg/mL y se puso en agitación por 30 min. antes de disponerse a las condiciones de luz correspondientes, para luego ser cubierto todo el reactor con una caja de cartón y comenzar a tomar el tiempo.

Los tiempos propuestos para tomar la muestra a evaluar del reactor fueron al minuto 0, 2, 4, 6, 8, 10, 15, 30, 60, 90, 120 de contacto, siendo el tiempo 0 el momento en que ya transcurrieron los 30 min de estabilización y se dispuso a las condiciones de luz correspondientes. La toma de muestra (1mL), se realizó con una micropipeta en los tiempos mencionados y fue colocada en tubos Epp previamente marcados con el tiempo correspondiente, para luego ser centrifugados en una microcentrífuga a 14,000 rpm por 20 min a 5°C. Posterior al tiempo de centrifugación, se tomaron 300 µL de cada muestra y se colocaron en una placa de 96 pocillos para leer su

absorbancia en el EPOCH2 a la longitud de onda correspondiente al máximo de absorbancia del AR19 o NR84 según la solución de colorante usada en el reactor.

Resultados y discusión

Determinación de la curva de calibración de cada colorante

Se prepararon las soluciones descritas en la tabla 1 para cada colorante, en la figura 1 se muestran dichas soluciones, de izquierda a derecha se observa el decremento en la intensidad del color, debido a la disminución de la concentración.



Figura 1. Se observa la intensidad en las soluciones para los colorantes A. AR19, B. NR84, utilizados para la curva de calibración.

Con base a las soluciones preparadas, se colocaron 300 μL de cada solución en una placa de ELISA de 96 pocillos y se determinó su máximo de absorbancia haciendo un barrido de 400 a 700 nm, en la figura 2 se puede observar la placa de ELISA conteniendo las muestras a evaluar.

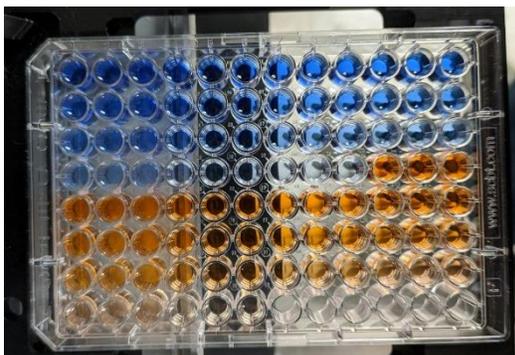


Figura 2. Placa de ELISA con 300 μL por triplicado de cada colorante.

En la figura 3 se observa que el máximo de absorbancia disminuye en proporción a la concentración, la figura 3A muestra una absorbancia máxima de 1.75 a 594 nm para el AR19 a una concentración de 150 ppm y un segundo pico a 631 nm con una absorbancia de 1.61. En la figura 3B, se observa que a 488 nm el máximo de absorbancia tiene una intensidad de 2.7 a una concentración de 150 ppm para el NR84.

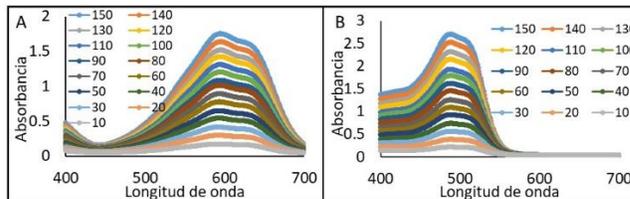


Figura 3. Espectros de absorbancia para AR19 (A) y NR84 (B).

Con base a estos resultados se puede observar que a la misma concentración (150 ppm) el máximo de absorbancia es mayor para el NR84.

A partir de estas gráficas con los máximos de absorbancia obtenidos se elaboraron las curvas de calibración mostradas en la figura 4, donde se puede observar la relación proporcional entre la absorbancia y la concentración para cada colorante.

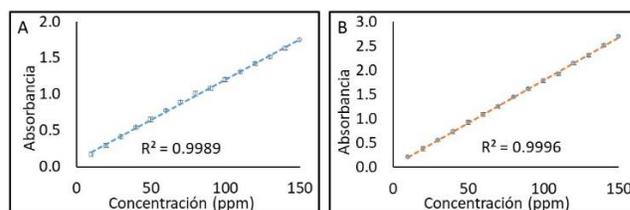


Figura 4. A. Curva de calibración del colorante AR19 a una longitud de onda de 594 nm. B. Curva de calibración del colorante NR84 a una longitud de onda de 488 nm.

Una vez obtenida la curva de calibración, ésta fue usada para determinar la concentración del colorante después del proceso de fotocatalisis determinando su máximo de absorbancia a la longitud de onda correspondiente.

Caracterización de las nanopartículas

Dispersión de luz dinámica

Se determinó el diámetro hidrodinámico de las NPs, por lo que en la figura 5 se puede observar la distribución de tamaño con respecto a la intensidad a una concentración de 0.25 mg/mL para cada NPs. Para las NPs de TiO_2 se determinó un diámetro de 24.33 ± 1.48 nm, para las $\text{TiO}_2\text{-Ag}$ se obtuvo un diámetro de 582.03 ± 56.55 nm, finalmente para $\text{TiO}_2\text{-Au}$, un diámetro de 179.3 ± 42.88 nm.

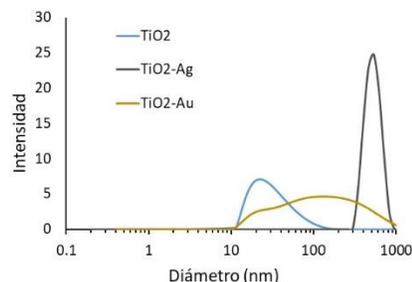


Figura 5. Distribución del diámetro hidrodinámico de las NPs.

Se puede observar que el tamaño de las NPs de TiO₂ incrementa al ser modificadas en su superficie con Au y Ag, siendo éstas últimas las de mayor tamaño con una mayor dispersión e intensidad. En el caso de TiO₂-Au, se observa que la distribución de tamaño es más dispersa, con una menor intensidad en la población.

Montaje del sistema de fotocatalítico

En la figura 6 se muestra el fotorreactor diseñado y tal cual fue empleado. Se puede observar el cristizador protegido con papel aluminio, conteniendo el colorante disuelto, las nanopartículas y el agitador magnético en la figura 6A, las pruebas se llevaron a cabo en un ambiente sin luz, para lo cual el sistema fue protegido de la luz utilizando una caja de cartón (Figura 6B). En la figura 6C se muestra un disipador de calor (1) el cual fue soldado a la tarjeta de circuito impreso (PCB) para evitar el calentamiento de la misma, así como un posible calentamiento de la solución; en la PCB (2) se puede observar el arreglo de leds de 375 nm. Se utilizó una placa de agitación (3) sobre la cual se colocó el cristizador (4), en este caso se observa la solución del colorante NR84 posterior al proceso fotocatalítico. Se puede observar una disminución en la intensidad del color.

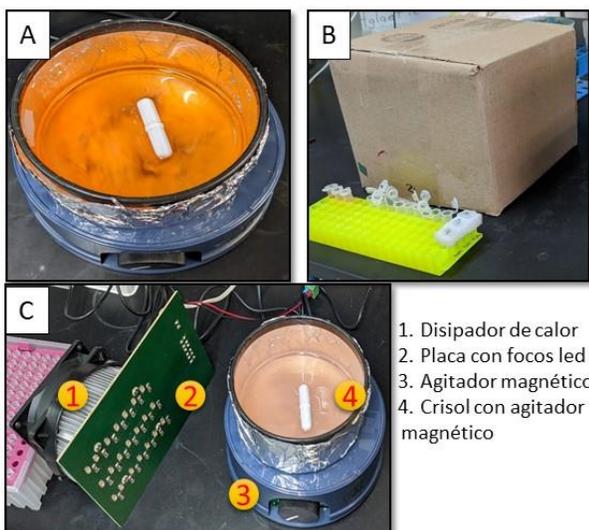


Figura 6. A. Cristizador conteniendo el colorante NR84 previo al proceso fotocatalítico. B. El uso de una caja de cartón evitaba la entrada de luz natural. C. PCB con disipador de calor y el cristizador con el NR84 después del proceso de decoloración.

Determinación del porcentaje de decoloración

Para la determinación del porcentaje de decoloración se tomaron las muestras a los tiempos mencionados en la metodología, una vez centrifugados se tomó el sobrenadante para determinar su máximo de

absorbancia. En la figura 7A se puede observar un tubo Epp conteniendo 500 µL del colorante NR84 antes y después del proceso de centrifugación, se puede observar al fondo del mismo las NPs. La figura 7B muestra el pellet obtenido para el colorante AR19 a las mismas condiciones de centrifugación, con este procedimiento se evita la interferencia de las NPs en el espectro de absorbancia.

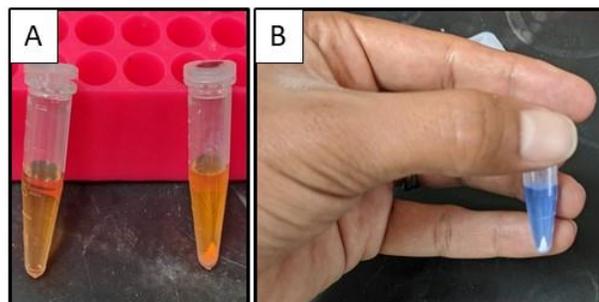


Figura 7. A. Epp conteniendo 500 µL del colorante NR84 antes (izquierda) y después (derecha) del proceso de centrifugación. B. Epp conteniendo 500 µL del colorante AR19 después de ser centrifugado.

Se realizaron los experimentos propuestos en la tabla 2, una vez obtenidas las absorbancias máximas, se hizo la comparación y el análisis de los resultados obtenidos, los cuales se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Máximos de absorbancia obtenidos a los 120 minutos, y porcentajes de decoloración correspondientes.

Colorante	Máximo de absorbancia	100 pmm		
		TiO ₂	TiO ₂ -Au	TiO ₂ -Ag
AR19	Inicial	1.142±0.025	1.225±0.007	1.204±0.019
	Final	0.8345±0.070	1.036±0.069	1.043±0.047
	Decoloración	27.62%	17.31%	13.37%
NR84	Inicial	1.721	1.795	1.589
	Final	0.041	0.279	1.076
	Decoloración	97.61%	84.55%	32.28%

50 pmm

AR19	Inicial	0.613±0.024	0.586±0.028	0.606±0.017
	Final	0.128±0.114	0.217±0.098	0.341±0.082
	Decoloración	79.11%	62.96%	43.72%
NR84	Inicial	0.895	0.871	0.0846
	Final	0.039	0.039	0.04
	Decoloración	95.64%	95.52%	52.71%

Continúa...

20 pmm

AR19	Inicial	0.262±0.028	0.586±0.028	0.606±0.017
	Final	0.038±0.007	0.217±0.098	0.341±0.082
	Decoloración	85.49%	84.29%	98.17%
NR84	Inicial	0.259	0.317	0.323
	Final	0.042	0.041	0.039
	Decoloración	83.78%	87.06%	87.92%

Se puede observar que a una concentración de 100 pmm tanto para el colorante AR19 como para el NR84 se obtuvo una mayor decoloración con utilizando TiO₂, en comparación con las TiO₂-X observándose una estabilidad en el decrecimiento de la absorbancia a partir del minuto 90 para el AR19 en presencia de TiO₂, pero en presencia de TiO₂-Au y TiO₂-Ag no se observa dicha estabilidad; para el NR84 al minuto 60 en presencia de TiO₂, se observa una señal constante, pero con TiO₂-Au y TiO₂-Ag la pendiente sigue decreciendo.

Para una concentración de 50 ppm, se observa que, al tener una concentración menor, los porcentajes de decoloración son más altos en comparación con una concentración de 100 ppm, esto se puede observar para los 3 tipos de NPs utilizadas en presencia de los dos colorantes; además las NPs de TiO₂, fueron las que lograron un mayor porcentaje de decoloración. Para el AR19 al minuto 120 no se observa una estabilidad en el máximo de absorbancia en presencia de TiO₂, TiO₂-Au y TiO₂-Ag, por lo que se sugiere que aumentando el tiempo de fotocatalisis el porcentaje de decoloración podría ser mayor. En el caso del NR84, a partir del minuto 30 se observa un máximo de absorbancia relativamente estable, lo cual se ve reflejado al tener porcentajes de remoción más altos que el AR19, mayores del 90%, al mismo tiempo de exposición a la luz led en presencia de TiO₂, pero en el caso de TiO₂-Au y TiO₂-Ag dicha estabilidad en la señal se observa a partir del minuto 70 y 90, respectivamente.

Finalmente, para una concentración de 20 ppm se puede observar que para el AR19 los porcentajes de decoloración son más altos que con las concentraciones anteriores, además que la absorbancia se vuelve constante a partir del minuto 30 en presencia de TiO₂, siendo con las NPs de TiO₂-Ag donde se alcanza una mayor decoloración del 98.17% a los 120 minutos. En cuanto al NR84 también se obtuvo una mayor decoloración con las NPs de TiO₂-Ag, siendo del 87.92%, para este colorante se encontró una estabilidad en el máximo de absorbancia a partir del minuto 30. Pero en presencia de TiO₂, a partir del minuto 10 se observa una señal constante con un porcentaje de decoloración final de 83.78%.

Sin embargo, para ambos colorantes el porcentaje de decoloración fue menor que a una concentración de 50 ppm.

Conclusiones

En todas las pruebas se ha demostrado la eficiencia en la decoloración del AR19 y del NR84, a una concentración de 100 ppm se propone aumentar el tiempo de exposición a la luz led, ya que durante el tiempo de exposición evaluado no se observa una estabilidad en los máximos de absorbancia, lo que sugiere que aumentado el tiempo de exposición el porcentaje de decoloración será mayor.

Para las pruebas realizadas a una concentración de 50 ppm, se encontraron porcentajes de remoción más altos con el mismo tiempo de exposición, en el caso del AR19 en presencia de los tres tipos de NPs no se encontró una estabilidad en la señal, por lo que se sugiere aumentar el tiempo de exposición. En la evaluación del NR84 en presencia de TiO₂, al minuto 30 se obtiene una señal constante, por lo que se puede acortar el tiempo de exposición obteniendo un porcentaje de remoción del 95.64%, en el caso de TiO₂-Au y TiO₂-Ag dicha estabilidad en la señal se observa a partir del minuto 70 y 90, respectivamente, de igual manera se pueden reducir los tiempos del experimento.

Finalmente, para una concentración de 20 ppm, para el AR19 se obtuvo el porcentaje más alto de decoloración (98.17%) en presencia de TiO₂-Ag al minuto 120, al no observarse estabilidad en los máximos de absorbancia se sugiere aumentar el tiempo de exposición con la finalidad de obtener un 100% de remoción; en los casos donde se evaluó TiO₂ y TiO₂-Au la estabilidad en la señal se encontró al minuto 50 y 70 respectivamente. Para el NR84 se encontró que en presencia de TiO₂, hay una estabilidad al minuto 10 lo cual reduce en gran medida el tiempo de exposición obteniéndose un porcentaje de decoloración del 83.78%, al evaluar el TiO₂-Au y TiO₂-Ag al minuto 40 y 60 respectivamente, se observó una estabilidad en la señal.

Con base a los resultados obtenidos, se ha demostrado que el uso de NPs de TiO₂, TiO₂-Au y TiO₂-Ag es una buena herramienta para la remoción de colorantes reactivos textiles a altas y bajas concentraciones con tiempos de respuesta corta. Se ha demostrado la utilidad y eficiencia de un sistema fotocatalítico hecho en casa, lo cual reduce el costo en comparación con los equipos comerciales.

Agradecimientos

Agradecemos a la Escuela Superior de Ingeniería Textil (ESIT) del Instituto Politécnico Nacional, Zacatenco, por proporcionarlos los colorantes usados en este proyecto.



Referencias

- Anjaneyulu Y., Sreedhara C.N., Samuel Suman R.D. (2005). Decolourization of industrial effluents – available methods and emerging technologies – A review. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 4, 245-273.
- Basturk E., Karatas M. (2015). Decolorization of anthraquinone dye reactive blue 181 solution by UV/H₂O₂ process. *Journal of Photochemistry & Photobiology, A: Chemistry*, 299, 67-72.
- Brown M., DeVito S. (1993). Predicting azo dye toxicity. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 23:3, 249-324.
- Cortázar A., Coronel C., Escalante A., González C. (2014). Contaminación generada por colorantes de la industria textil. *Vida Científica Boletín Científico de la Escuela Preparatoria No. 4*, 2, 3.
- Dos Santos A. B., Cervantes F.J., Van Lier J.B. (2007). Review paper on current technologies for decolourisation of textile wastewaters: Perspectives for anaerobic biotechnology. *Bioresource Technology*, 98(12), 2369-2385.
- Forbes staff. (2019). La moda es una de las industrias más contaminantes: ONU. Forbes. Recuperado el 20 de octubre de 2019, de: <https://www.forbes.com.mx/la-moda-es-una-de-las-industrias-mas-contaminantes-onu/>.
- Garrigós M.D.C. (2003). Desarrollo de métodos analíticos para la determinación de compuestos tóxicos constituyentes de colorantes azo. Tesis de Doctorado, Universidad de Alicante, España.
- Gavril M., Hodson P.V. (2007). Investigation of the toxicity of the products of decoloration of amaranth by trametes versicolor. *Journal of Environmental Quality*, 36(6), 1591.
- Giordano A., Grilli S., De Florio L., Mattioli D. (2005). Effect of selected textile effluents on activated sludge nitrification process. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 40(11), 1997-2007.
- Hao O.J., Kim H., Chiang P. (2000). Decolorization of wastewater. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 30(4), 449-505.
- Kuhad R.C., Sood N., Tripathi K.K., Singh A., Ward O.P. (2004). Developments in microbial methods for the treatment of dye effluents. *Advances Applied Microbiology*, 56: 185-213.
- Maldonado A., Molina R. (2011). Estudio para la reducción colorantes de las aguas residuales de la industria textil a través de procesos electroquímicos. Tesis de pregrado, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca.
- Martínez A.C., Olivares C.C., Lozada A.E., Ramírez C.G. (2014). Contaminación generada por colorantes de la industria textil. *Revista Vida Científica. Ene*, 3(2). Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.
- Méndez L. (2019). SOS, la crisis del agua que amenaza la vida. El Universal. Recuperado el 17 de noviembre de 2019, de: <https://www.eluniversal.com.mx/mundo/sos-la-crisis-del-agua-que-amenaza-la-vida>
- Ramsay J.A., Nguyen T. (2002). Decoloration of textile dyes by trametes versicolor and its effect on dye toxicity. *Biotechnology Letters*, 24(21), 1757-1761.
- Sánchez M.B., Uribe C. (2018). Contaminación de los ambientes acuáticos generados por la industria textil. *Revista Campus*, 23(26).
- Walters A., Santillo D. Johnston P. (2005). El tratamiento de textiles y sus repercusiones ambientales-GreenPeace. Recuperado 19/10/2019 en: <https://internationalesommeruni.files.wordpress.com/2017/06/el-tratamiento-de-textiles-y-sus-repercusiones-ambientales.pdf>.