

Los Colorantes Textiles Industriales Y Tratamientos Óptimos De Sus Efluentes De Agua Residual: Una Breve Revisión

Textile Industrial Dyes and optimal wastewater effluents treatments: A short review

Pablo Esteban Zaruma Arias, José Bernardo Proal Nájera, Isaías Chaires Hernández, Heberto Iván Salas Ayala

Instituto Politécnico Nacional, Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional Unidad Durango, Durango, México.

Instituto Politécnico Nacional, rycarpablo@hotmail.com

Recibido: 14-03-2018. Aceptado después de revisión: 20-06-2018.

Resumen: En la actualidad, la industria textil es la mayor consumidora de colorantes sintéticos a nivel global. Se han producido alrededor de 10 000 colorantes que se encuentran disponibles en el mercado actual, y con esto se estima una producción anual aproximada de 700 000 toneladas de éstos compuestos sintéticos. Existe una gran variedad de colorantes, los cuales se clasifican de acuerdo a su estructura y a su método de aplicación en el proceso de elaboración de los productos textiles. Las industrias dedicadas a éstas actividades utilizan una cantidad considerablemente alta de agua para su producción. Los efluentes de las industrias textiles están cargados de diversos contaminantes, pero sobretodo con colorantes empleados durante todo el proceso de fabricación de telas. En este trabajo se clasifican y describen los diferentes tipos de colorantes que se utilizan en la industria textil, así como también los tratamientos terciarios de aguas residuales que resultan óptimos para este tipo de efluentes industriales.

Palabras claves: Agua residual, Colorantes, Tratamientos óptimos.

Abstract: Today the textile industry is the biggest global consumer of dyes. There are about 10 000 dyes available in current market, and annual production estimated of 700 000 tons approximately of these synthetic compounds. A great dyes variety exists and they are classified because of their structure and application method in the textiles production process. The industries dedicated to these activities use a great water quantity for their production. The textile industries wastewater effluents are filled of sundry pollutants, but especially with dyes which are used during the whole fabrics manufacturing process. In this article, different dyes used in textile industry are classified and described, as well as wastewater tertiary treatments which turn out to be ideal for this type of industrial effluent.

Keywords: Dyes, Optimal Treatments, Wastewater.

1. Introducción

En países en desarrollo, alrededor del 90% de aguas residuales se descargan sin tratamiento a diferentes cuerpos de agua y aproximadamente dos millones de toneladas de residuos industriales, domésticos y agrícolas, son desechados de igual forma en ríos o canales [1].

Dentro de las industrias, las textiles generan una gran cantidad de contaminantes al medio ambiente ya que gran parte de los colorantes que utilizan en sus procesos de teñido son descargados en aguas residuales sin un correcto tratamiento. La industria textil es la de mayor consumo y empleo de diferentes tintes y colorantes. La producción anual de colorantes sintéticos se calcula en 700,000 toneladas [2].

Se estima que hasta un 50% de los colorantes utilizados en la industria textil termina en las aguas descargadas por este sector industrial debido a su bajo grado de fijación en las telas [3].

Los colorantes textiles tienen diferentes orígenes y aplicaciones, aunque en la actualidad mayormente son utilizados los de origen sintético, los cuales no son biodegradables en el medio ambiente. Por este motivo, se ha visto obligado a buscar la manera de eliminar estos contaminantes ya que éstas sustancias son consideradas como recalitrantes. Por ende, a éstas se les debe aplicar procesos adecuados para degradarlos de las aguas residuales de manera efectiva, antes de que sean descargados al ambiente.

2. Los Colorantes

El proceso de elaboración de productos textiles consiste en una serie de operaciones unitarias que emplean diferentes materias primas como algodón, lana, fibras sintéticas y tintes o colorantes. Los efluentes líquidos que son generados al final de los diversos procesos contienen contaminantes de muy diversa naturaleza, entre ellos sales inorgánicas, almidón, peróxidos, EDTA, tensoactivos, enzimas, surfactantes, colorantes, metales y otros compuestos orgánicos de variada estructura [4].

En la actualidad se utilizan diferentes tipos de tintes en las industrias, clasificados en dos grandes grupos: los colorantes y los pigmentos. Los colorantes son solubles en agua y son definidos como compuestos capaces de impartir color a una fibra, sin ser afectados por factores como la luz, temperatura y jabón [5].

No se conoce con claridad el año en el cual el hombre empezó a teñir su vestimenta, pero existen escritos que abarcan desde el año 2600 A.C., documentado en China, hasta la época de Alejandro Magno en 330 A.C. En éstas épocas se obtenían, principalmente, los colorantes por medio de diferentes insectos y plantas; este conocimiento pasó de generación en generación como un proceso casero. Pero acorde la civilización evolucionó, el proceso de teñido se ha ubicado como uno de los sectores más importantes del sector industrial [6].

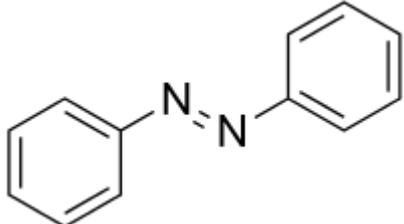
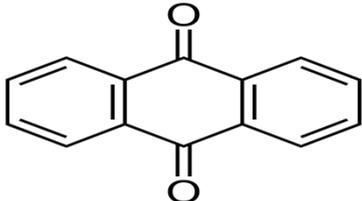
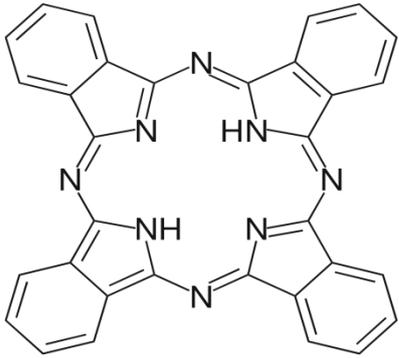
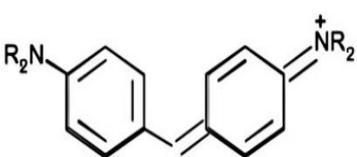
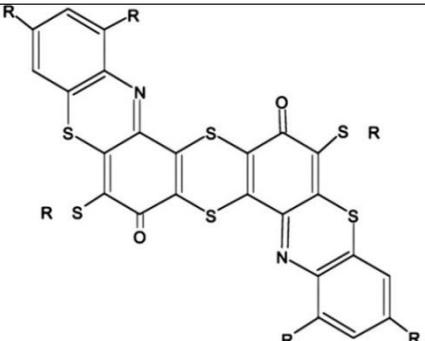
2.1. Clasificación de Colorantes

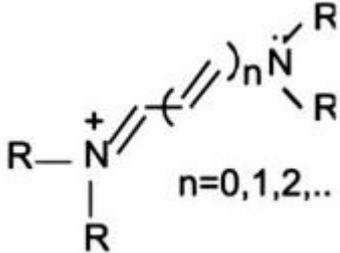
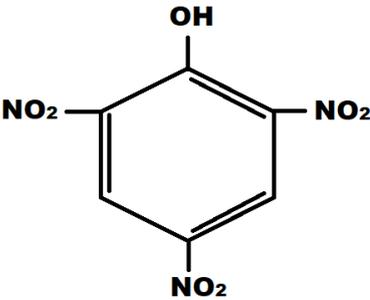
Como ya se mencionó anteriormente, actualmente existe una gran cantidad de colorantes comerciales disponibles en el mercado global. Al ser una gran variedad de colorantes, los podemos clasificar por estructura química y también por el método de aplicación al que están sujetos en la industria [7].

2.1.1. Clasificación Química

Este tipo de clasificación se puede observar con mayor detalle en la siguiente tabla (Tabla 1) en donde se agrupan a los colorantes de mayor a menor importancia de uso en la industria textil [8], así como su grupo cromóforo (grupo de átomos encargados del color).

Tabla 1. Clasificación de colorantes por estructura química

Familia	Grupo Cromóforo	Descripción
Azoicos		Este grupo de colorantes es el más importante dentro de la industria textil con una elaboración aproximada del 70% de los colorantes orgánicos del mercado.
Antraquinonas		Son quinonas tricíclicas derivadas del antraceno que a menudo contienen uno o más grupos hidroxilo
Ftalocianina		Éstos colorantes están formados por la unión de cuatro grupos isoindol (dos anillos fusionados, uno bencénico y el otro; una piridina) mediante cuatro átomos de nitrógeno, dando lugar a un anillo de 16 átomos: ocho de nitrógeno y ocho de carbono, alternados con dobles enlaces conjugados [9].
Ion arilcarbonio		Su estructura química esta conformada por un átomo carbonilo unido a dos o tres anillos aromáticos.
Sulfuro		Grupo de colorantes totalmente insolubles en agua pero solubilizable por reducción. Proporciona una gama de colores bajos y apagados.

Polimetino		Se clasifican en tintes neutros, catiónicos y anicónicos. En los extremos de su cadena poseen un grupo donador y un sustractor de densidad electrónica.
Nitro		Son un grupo de colorantes incoloros cuando se encuentran aislados. Su absorción se encuentra muy cerca del campo visible por combinación de grupos auxocromos débiles, adquiriendo una tonalidad amarillenta.

Los colorantes que son más comúnmente utilizados en la industria textil son los de la familia azo o colorantes azoicos, donde estos destacan por estar compuestos con un doble enlace de moléculas de nitrógeno. Estos compuestos, al igual que la gran mayoría de los colorantes sintéticos, son poco biodegradables, pero se han encontrado diversas condiciones para que puedan ser completamente degradados [10]-[13]. Se ha demostrado que algunos de estos compuestos son cancerígenos y mutagénicos [14]-[16].

2.1.2. Clasificación por su método de aplicación

En la industria textil existen diversos tipos de fibras (lana, algodón, nylon, poliéster, etc.) a las cuales aplican diferentes métodos de teñido por su capacidad y grado de fijación de los colorantes. En la siguiente tabla (Tabla 2) observamos la clasificación de los tipos de colorantes por el método de aplicación al que están sujetos por el tipo de tela:

Tabla 2. Clasificación de colorantes por método de aplicación

TIPO	FIBRAS	MÉTODO DE APLICACIÓN	GRUPOS CROMÓFOROS
Ácidos	Nylon, lana, seda, papel, tintas y piel	Normalmente para baños de tinte neutros a ácidos	Azo, antraquinona, trifenilmetano, nitro y nitroso
Básicos	Papel, poliacrilonitrilos, nylon, poliéster y seda	Para baños de tintura básicos	Azo, trimetilmetano, antraquinona
Directos	Algodón, rayón, piel y nylon	Inmersión de la fibra en un baño con un electrolito. Forma enlaces de hidrógeno.	Azo
Dispersos	Poliéster, poliamida,	En forma de presión coloidal con altas temperaturas y	Azo, antraquinona y nitro

	acetato, acrílico y plásticos	presión. Unión del colorante por interacciones dipolares	
Mordaz	Lana, piel y algodón	Aplicado en conjunto con sales de Cr	Azo y antraquinona
Reactivos	Algodón, lana, seda y nylon	Los grupos reactivos del colorante reaccionan con los grupos funcionales de la fibra para enlazarse covalentemente bajo la influencia de la temperatura y el pH	Azo y antraquinona
Al azufre	Algodón y rayón		Estructuras indeterminadas
A la tina	Algodón, rayón y lana	Reducción con hidrosulfito de sodio, después de la impregnación se oxida	Antraquinona e índigos

Fuente: [17].

Desde la síntesis del primer colorante sintético, se han producido alrededor de 10 000 colorantes, de los cuales, el 30% son del tipo azo y como se observa en la tabla anterior, este grupo de colorantes son el de mayor uso dentro de la industria textil, que se calcula aproximadamente al 70% de la producción total. Con esto, al incrementar el empleo de los colorantes, incrementa la demanda de agua, ya que el proceso de fijación de los colorantes en las telas se da en medio acuoso. Aproximadamente se requieren de 200 L de agua para producir 1 kg de producto textil [18].

Se estima que hasta un 50% de los colorantes utilizados en la industria textil termina en las aguas descargadas por este sector industrial, debido a su bajo grado de fijación en las telas [3]. En la siguiente tabla (Tabla 3) se expresan los porcentajes aproximados de fijación de los colorantes en las telas por los diferentes métodos de aplicación.

Tabla 3. Grado de fijación de colorantes

Método de aplicación	Tipo de Fibra	Grado de Fijación (%)	Descarga en efluentes (%)
Ácido	Poliamida	85-95	5-15
Básico	Acrílico	95-100	0-5
Directo	Celulosa	70-95	5-30
Disperso	Poliéster	90-100	0-10
Reactivo	Celulosa	50-90	10-50
Sulfuro	Celulosa	60-90	10-40
Tina	Celulosa	80-95	5-20

Fuente: [19].

La descarga de éstos efluentes en los cuerpos de agua conduce a una grave contaminación de las aguas superficiales y subterráneas en las cercanías de las industrias textiles. Los colorantes no son biodegradables y tienden a acumularse en los organismos vivos, causando diversas enfermedades y trastornos [2]. A éstos compuestos se los conoce comúnmente como recalitrantes. El rango de concentraciones de colorantes en las aguas residuales de origen textil esta entre los 100 y 500 mg/L [20]. Considerando el volumen y la composición de las aguas residuales generadas por este

tipo de industrias, están clasificadas como las más contaminantes dentro del sector industrial [21]. En otras palabras, las aguas residuales con colorantes sintéticos son consideradas como unas de las más complicadas de tratar [22]-[23]. Por este motivo, los efluentes que van cargados de este tipo de sustancias deben ser tratados de manera adecuada antes de ser descargados al ambiente, de lo contrario se está afectando directamente a los ecosistemas y, principalmente, a los cuerpos de agua.

3. Tratamientos de aguas residuales de la industria textil

Los efluentes, líquidos o gaseosos producidos por cualquiera de nuestras industrias, son perjudiciales para la salud y el bienestar general del hombre. Cuando las sustancias contaminantes están presentes en efluentes líquidos, pueden ser desastrosos ya que su presencia presenta una gran amenaza inmediata a sus destinatarios [Akpan]. Las aguas residuales de todas las industrias, fábricas, maquilas, etc., son un problema bastante serio para el medio ambiente.

Actualmente existe una gran variedad de procesos para el tratamiento de las aguas residuales provenientes de la industria textil. Se han utilizado una amplia variedad de microorganismos los cuales han obtenido resultados variados en la degradación de este tipo de compuestos [24]-[32]. Los tratamientos abarcan una gran serie de técnicas y métodos para la degradación de este tipo de efluentes, destacando los diferentes métodos físico-químicos; se pueden tratar por Reactivo de Fenton, ozonación, oxidación fotoquímica, oxidación electroquímica, entre otros [33]-[37]. A estos métodos se les conoce como Procesos de Oxidación Avanzada (POAs). Éstos procesos no convencionales están diseñados para la remoción específica de compuestos orgánicos persistentes que son resistentes a tratamientos convencionales químicos o biológicos. Consiste en una oxidación química en condiciones de presión y temperatura ambiente, con la cual se puede llegar hasta la mineralización completa de los contaminantes [38]. El objetivo específico de los POAs es la degradación de los compuestos recalcitrantes por medio de la generación de un agente oxidante, el cual es un radical denominado hidroxilo ($\bullet\text{OH}$), el cual posee una elevadísima capacidad oxidante, no es selectivo y presenta tiempos de reacción muy cortos, y con esto, convierte a los POAs como uno de los métodos más efectivos en materia de tratamientos de agua residual cargada de compuestos orgánicos [39].

Éstas técnicas utilizan diversos agentes oxidantes como: ozono (O_3), O_3 /peróxido de hidrógeno (H_2O_2), O_3 /catalizador, radiación ultravioleta (UV), UV/ O_3 , UV/ H_2O_2 , sus interacciones, es decir, O_3 /UV/ H_2O_2 , pero además Hierro (Fe^{2+})/ H_2O_2 y fotocátalisis (homogénea o heterogénea). Éstos procesos oxidativos de fase líquida consisten en sistemas continuos, donde se mezcla el agua residual con los agentes oxidantes respectivos para la degradación completa por el radical hidroxilo generado “in situ”.

En las últimas décadas las investigaciones que involucran el uso de POAs combinadas con métodos biológicos en el tratamiento de este tipo de efluentes industriales han tenido un gran incremento.

En los procesos de fotólisis (UV/ H_2O_2) y fotocátalisis (UV/ H_2O_2 / TiO_2), dada su efectividad, se llegó a la conclusión de que los parámetros óptimos a considerar son: la concentración de peróxido de hidrógeno, magnitud de pH, concentración inicial de colorante, e intensidad de la radiación UV, ya que son los que provocan mayores efectos en las aguas residuales textiles, toda vez que reducen tanto la coloración como la degradación de compuestos orgánicos [40]-[42]. Éstos procesos pueden resultar óptimos al involucrar un fotocatalizador.

La fotocatalisis con TiO_2 , como semiconductor, al utilizar radiación UV, tanto solar como artificial, se ha convertido en uno de las técnicas más efectivas en materia de remoción de contaminantes dentro de las aguas residuales, por su gran efecto de degradación de contaminantes [43]-[45]. Esto es debido a que, esta técnica, está diseñada para realizarla *in situ* y tratar las aguas cargadas con los compuestos químicos y colorantes que arrastra a lo largo de las etapas de la producción de la industria textil previo a su descarga a los cuerpos de agua. Además, cuando se utiliza la radiación UV solar natural, tanto la fotólisis como la fotocatalisis, no generan un costo energético elevado ni considerable, lo que lo vuelve una de las energías más limpias y amigables con el medio ambiente.

4. Conclusiones

Las aguas residuales provenientes de la industria textil ponen en riesgo el medio ambiente, al descargar sus efluentes con diversos contaminantes, sobre todo con los colorantes utilizados durante todo el proceso de producción.

Actualmente, para este tipo de efluentes industriales existen diversos tratamientos terciarios, como son los procesos oxidación avanzada. Una de éstas tecnologías empleadas para la degradación de los contaminantes recalcitrantes es la fotocatalisis que, con ayuda de un fotocatalizador (agente oxidante) y con luz ultravioleta (solar o artificial), puede llegar a degradar gran cantidad de contaminantes orgánicos, convirtiéndolo en uno de los tratamientos más viables para tratar aguas contaminadas con colorantes textiles, ya que ayuda considerablemente en la disminución del color y reducción del contenido orgánico.

Con esto podemos concluir que, efectivamente, existen varios métodos de tratamiento de aguas residuales cargadas con colorantes sintéticos, pero la fotocatalisis es una de las alternativas más adecuadas para el tratamiento de aguas residuales provenientes de la industria textil. Cabe aclarar que este tratamiento genera resultados significativos bajo ciertas condiciones, como son la concentración de los colorantes, el tipo de colorante utilizado, la intensidad de radiación UV y la magnitud de pH, entre otras.

Agradecimientos

Al Dr. José Proal, por su dirección y apoyo en todo momento. De igual manera al Dr. Isaías Chaires por su ayuda en cuestiones estadísticas. A mi compañero y amigo Ing. Iván Salas por su gran disponibilidad y amabilidad a lo largo de este escrito. Al Instituto Politécnico Nacional por brindar el acceso a la información necesaria. Asimismo, al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por facilitarme los recursos económicos para el desarrollo de este trabajo.

Referencias

- [1] E. Corcoran, C. Nelleman, E. Baker, R. Bos, D. Osborn y H. Savelli, *Sick Water? The central role of wastewater management in sustainable development*. United Nations Environment Programme, 2010.
- [2] M. A. Al-Ghouti, J. Li, Y. Salamh, N. Al-Laqtah, G. Walker, y M. N. M. Ahmad, «Adsorption mechanisms of removing heavy metals and dyes from aqueous solution using date pits solid adsorbent», *Journal of Hazardous Materials*, vol. 176 (1), pp. 510–520, 2010.

- [3] F. J. Cervantes, «Reducción de colorantes azo por distintos grupos microbianos en consorcios anaerobios», *Biotechnología*, vol. 12 (3), pp. 6–20, 2008.
- [4] H. Mansilla, C. Lizama, A. Gutarra, J. Rodriguez, «Tratamiento de residuos líquidos de la industria de celulosa y textil», *Estrucplan Online*, 2015.
- [5] R. Garzón, «Diferentes clases químicas por hongos y bacterias inmovilizados sobre fibra de agave tequilana webber var» *Tesis, Facultad de Ciencias, Pontificia Universidad Javeriana*, enero 2009.
- [6] M. J. Gavira, «Colorantes y el arte de teñir, compañeros milenarios del ser humano», *Triplénlace*, enero 2013.
- [7] M. M. Soto, «Síntesis de diésteres simétricos a base de líquidos iónicos para la posible remoción de colorantes Azo», *Tesis Magistral, Centro de Investigación e Innovación Tecnológica, Instituto Politécnico Nacional*, diciembre 2013.
- [8] C. López, M. T. Moreira, G. Feijoo, y J. Lema, «Tecnologías para el tratamiento de efluentes de industrias textiles», *Afinidad, Revista de Química Teórica Y Aplicada*, vol. 64, pp. 561-573, enero 2007.
- [9] E. Pinto, (2015), «¿Qué son las Ftalocianinas?», *Millennium Nucleus*, 2015.
- [10] J. A. Field, F.J. Cervantes, F.P. Van der Zee, y G. Lettinga, «Role of quinones in the biodegradation of priority pollutants: a review», *Water Sci. Technol.*, vol. 42, pp. 215-222, 2000.
- [11] F. J. Cervantes, F. P. Van der Zee, G. Lettinga, J. A. Field, «Enhanced decolourisation of acid orange 7 in a continuous UASB reactor with Quinones as redox mediators», *Water Sci. Technol.*, vol. 44, pp. 123-128, 2001.
- [12] F. J. Cervantes, T. Duong-Dac, K. Roest, A. D. L. Akkermans, G. Lettinga, J. A. Field, «Enrichment and immobilization of quinone-respiring bacteria in anaerobic granular sludge», *Water Sci. Technol.*, vol. 48, pp. 9-16, 2003.
- [13] L. V. González, E. M. Escamilla, «Biodegradación Anaerobia de Colorantes Azoicos Textiles usando Carbón Activado», *Biotechnología*, vol. 12, pp. 34-47, 2008.
- [14] B. Manu, S. Chaudhari, «Decolorization of indigo and azo dyes in semi continuous reactors with long hydraulic retention time», *Process Biochem*, vol. 38, pp. 1213–1221, 2003.
- [15] M. Kornaros, G. Lyberatos, «Biological treatment of wastewaters from a dye manufacturing company using a trickling filter», *J. Hazard. Mater.*, vol. 136, pp. 95–102, 2006.
- [16] G. Sudarjanto, B. K. Lehmann, J. Keller, «Optimization of integrated chemical–biological degradation of a reactive azo dye using response surface methodology», *J. Hazard. Mater.*, vol. B138, pp. 160–168, 2006.
- [17] J. N. Castillo Cervantes, «Remoción de Colorantes Tipo Azo Usando Líquidos Iónicos», *Tesis Magistral, Centro de Investigación e Innovación Tecnológica, Instituto Politécnico Nacional*, julio 2015.
- [18] A. E. Ghaly, R. Ananthashankar, M. Alhattab, y V. V. Ramakrishnan, «Production, characterization and treatment of textile effluents: a critical review», *J. Chem. Eng. Process Technol*, vol. 5, pp. 1-18, 2014.
- [19] A. López, «Estudio del proceso de degradación electroquímica de colorantes tipo ftalocianina en matrices acuosas contaminadas con azul lanasol 8G», *Tesis Magistral, Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica*, julio 2015.
- [20] D.T. Sponza y M. Işık (2004) «Decolorization and inhibition kinetic of Direct Black 38 azo dye with granulated anaerobic sludge», *Enzyme Microb. Technol.*, vol 34, pp. 147–158, 2004.

- [21] E. Khelifi, H. Gannoun, Y. Touhami, H. Bouallagui, y M. Hamdi, «Aerobic decolorization of the indigo dye-containing textile wastewater using continuous combined bioreactors», *J. Hazard. Mater.*, vol. 152, pp. 683-689, 2008.
- [22] T. H. Kim, Y. Lee, J. Yang, B. Lee, C. Park, y S. Kim, «Decolorization of dye solutions by a membrane bioreactor (MBR) using white-rot fungi», *Desalination*, vol. 168, pp. 287-293, 2004.
- [23] N. P. Tantak, y S. Chaudhari, «Degradation of azo dyes by sequential Fenton's oxidation and aerobic biological treatment», *J. Hazard. Mater.*, vol. B13, pp. 698-705, 2006.
- [24] K. Vasanth Kumar, V. Ramamurthi, y S. Sivánesan, «Biosorption of malachite green, a cationic dye onto *Pithophora* sp., a fresh water algae», *Dyes and Pigments*, vol. 69, pp. 102-107, 2006.
- [26] D. Mitrogiannis, G. Markou, A. Çelekli, y H. Bozkurt, «Biosorption of methylene blue onto *Arthrospira platensis* biomass: Kinetic, equilibrium and thermodynamic studies», *J. Environ. Chem. Engine.*, vol. 3, pp. 670-680, 2015.
- [27] M. Horník, A. Šňovská, D. Partelová, y M. Pipíška, «Continuous sorption of synthetic dyes on dried biomass of microalga *Chlorella pyrenoidosa*», *Chem. Papers*, vol. 67, pp. 254-264, 2013.
- [28] S. Piña, «Decoloración biológica del colorante azul directo 2 en un filtro anaerobio/aerobio», *Tesis Magistral, Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México*, 2007.
- [29] M. S. Abd-El-Kareem y H. M. Taha, «Decolorization of malachite green and methylene blue by two microalgal species», *I. J. Chem. Enviro. Engin.*, vol. 3, pp. 297-302, 2012.
- [30] S. Dinesh Kumar, P. Santhanam, R. Nandakumar, S. Ananth, B. Balaji Prasath, A. Shenbaga Devi, S. Jeyanthi, T. Jayalakshmi, y P. Ananthi, «Preliminary study on the dye removal efficacy of immobilized marine and freshwater microalgal beads from textile wastewater», *African Journal of Biotechnology*, vol. 13, pp. 2288-2294, mayo 2014.
- [31] N. Martínez Galván, «Evaluación de la capacidad de *Limnobium laevigatum* para fitorremediar agua residual de la industria textil», *Tesis, Facultad de Biología, Universidad Veracruzana*, junio 2014.
- [32] A. Ruiz Martínez, «Puesta en marcha de un cultivo de microalgas para la eliminación de nutrientes de un agua residual urbana previamente tratada anaeróbicamente», *Tesis Magistral, Universidad Politécnica de Valencia*, abril 2011.
- [33] L. F. Garcés Giraldo, y G. A. Pañuela Mesa, «Cinética de degradación y mineralización del colorante Naranja Reactivo 84 en aguas», *Rev. Lasallista de Investigación*, vol. 2, pp. 21-25, 2006.
- [34] M. D. Murcia, M. Gómez, S. Ortega, A. M. Hidalgo, E. Gómez, y J. L. Gómez, «Degradación de rojo congo en un fotorreactor tubular de tecnología excimer. Estudio cinético», *Afinidad LXXII*, vol. 72, pp. 7-13, Enero-Marzo 2015.
- [35] L. Castro Peña, y J. E. Durán Herrera, «Degradación y decoloración de agua contaminada con colorantes textiles mediante procesos de oxidación avanzada», *Tecnología en Marcha*, vol. 27, pp. 40-50, 2014.
- [36] L. F. Garcés Giraldo, M. L. Hernández Ángel, G. A. Pañuela Mesa, A. Rodríguez Restrepo, y J. A. Salazar Palacio, «Degradación de aguas residuales de la industria textil por medio de fotocátalisis», *Rev. Lasallista de Investigación*, vol. 2, pp. 15-18, 2006.

- [37] J. Carvalho Cardoso, G. Garcia Bessegato, y M. Boldrini Zanoni, «Efficiency comparison of ozonation, photolysis, photocatalysis and photoelectrocatalysis methods in real textile wastewater decolorization», *Water Research*, vol. 98, pp. 39-46, 2016.
- [38] A. Vogelpohl, y S. M. Kim, «Advanced oxidation processes (AOPS) in wastewater treatment», *J. Indus. Engin. Chem.*, vol. 10, pp. 33-40, 2004.
- [39] J. M. Poyatos, M. M., Muñio, y M. C. Almecija, (2010), «Advanced Oxidation Processes for Wastewater Treatment: State of the Art», *Water, Air, Soil, & Pollut.*, vol. 205, pp. 187, 2010.
- [40] A. Amer, H. Amin, A. El Fecky, y I. Ibrahim, « Treatment of textile wastewater using H₂O₂/UV system», *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, vol. 42, pp. 17-28, 2008.
- [41] T. Caronna, G. M. Colonna, y B. Marcandalli, « Oxidative degradation of dyes by ultraviolet radiation in the presence of hydrogen peroxide» *Dyes and Pigments*, vol. 41, pp. 211-220, 1999.
- [42] A. Kalt, y C. Galindo, «UV/H₂O₂ oxidation of azodyes in aqueous media: evidence of a structure-degradability relationship» *Dyes and Pigments*, vol. 42, pp. 199-207, 1999.
- [43] J. C. Pantoja Espinoza, J. B. Proal Nájera, M. García Roig, I. Cháirez Hernández, y G. I. Osorio Revilla, «Eficiencias comparativas de inactivación de bacterias coliformes en efluentes municipales por fotólisis (UV) y por fotocátalisis (UV/TiO₂/SiO₂). Caso: depuradora de aguas de Salamanca, España» *Rev. Mex. Ing. Quím.*, vol. 14, pp. 119-135, abril 2015.
- [44] A. I. Alvarado, D. M. Antuna, M. G. Reyes, A. García, E. C. Vázquez, L. González, J. B. Proal, y M. Quintos, «Procesos fisicoquímicos para remoción de contaminantes en el agua (Breve Revisión)», *Vid supra*, vol. 2, pp. 45-47, enero 2010.
- [45] J. R. Irigoyen, F. J. Silerio, y J. B. Proal, «Fotocátalisis heterogénea: Una breve revisión», *Vid supra*, vol. 6, pp. 87-92, 2014.