

Colorantes textiles una amenaza latente: La biotecnología como parte de la solución

Karina Águila-Sánchez, José Luis Torres-García, Diana Verónica Cortés-Espinosa

Centro de Investigación en Biotecnología Aplicada.
Instituto Politécnico Nacional. Ex-Hacienda
San Juan Molino Carretera Estatal, Km 1.5, 90700
Santa Inés Tecuexcomac, Tlax, México.

*Autor por correspondencia:
dcortes@ipn.mx

RESUMEN

Actualmente, la industria de la moda es una de las fuentes económicas más importantes para el desarrollo económico del país y del mundo. Para que esta industria pueda mantenerse activa, emplea la industria textil como principal fuente de manufactura. Lamentablemente, la industria textil genera gran impacto al ambiente, no solo por el consumo excesivo del recurso hídrico, sino, por los desechos y residuos que se liberan de estos procesos. Los colorantes textiles son un ejemplo de las moléculas liberadas por este sector a gran parte de los sistemas receptores como son alcantarillados, dirigiéndose hacia los diferentes cuerpos de agua como; ríos, lagos, manantiales acuíferos etc. Actualmente, se conocen los efectos tóxicos propiciados por la presencia de una amplia variedad de colorantes en los cuerpos de agua, afectando no sólo la supervivencia de especies acuáticas, sino también en animales terrestres y en el humano. Con base a esta preocupante situación, la biotecnología se convierte en la principal herramienta sostenible y amigable con el ambiente, mediante el uso de microorganismos de fácil crecimiento y adaptación a ambientes contaminados por este tipo de contaminantes tóxicos, gracias a la producción de enzimas específicas que degradan estas estructuras complejas permitiendo que los microorganismos las empleen como fuente de carbono y energía.

Palabras clave: Biorremediación, colorantes, efluentes textiles, microorganismos, toxicidad

ABSTRACT

Currently, the fashion industry is one of the most important economic sources for the economic development of the country and the world. In order for this industry to remain active, it uses the textile industry as the main source of manufacturing. Unfortunately, the textile industry generates a great impact on the environment, not only due to the excessive consumption of water resources, but also due to the waste and residues that are released from these processes. Textile dyes are an example of the molecules released by this sector to a large part of the receiving systems such as sewers, heading towards different bodies of water such as; rivers, lakes, aquifer springs, etc. Currently, the toxic effects caused by the presence of a wide variety of dyes in bodies of water are known, affecting not only the survival of aquatic species, but also terrestrial animals and humans. Based on this worrying situation, biotechnology becomes the main sustainable and environmentally friendly tool, through the use of microorganisms that are easy to grow and adapt to environments contaminated by this type of toxic pollutants, thanks to the production of specific enzymes that They degrade these complex structures allowing microorganisms to use them as a source of carbon and energy.

Keywords: Bioremediation, dyes, textile effluents, microorganisms, toxicity

Introducción

La continua industrialización además de ser parte importante en el desarrollo social y en la economía mundial ha generado grandes impactos en ambiente. De manera particular la industria textil se ha desarrollado a gran velocidad con la creación de nuevas tecnologías de impresión y teñido, lo que la convierte en la industria que más consume agua (Guo et al., 2020). Los efluentes generados por estas industrias contienen altas concentraciones de colorantes liberando entre el 10 y el 20% de estos colorantes durante el proceso de teñido. Cada año se producen más de 0.7 millones de toneladas de tintes sintéticos en todo el mundo, y los tintes azoicos representan aproximadamente el 80 % de la cantidad total de tintes orgánicos empleados en el sector textil (Yang et al. 2019).

Dichos colorantes se caracterizan por contener en su estructura molecular grupos funcionales azo (R-N=N-R'), lo que los vuelve más recalcitrantes o sea de difícil degradación. Los efectos nocivos hacia los seres vivos y el ecosistema han despertado el interés en el desarrollo de tecnologías que permitan tratar estos efluentes (Benkhaya et al. 2020). Sin embargo, el uso de tratamientos físicos y químicos son de elevado costo además de que contribuyen en gran medida en la contaminación del agua, es por ello que el uso de herramientas biotecnológicas como es la biorremediación, donde emplea microorganismos es una excelente opción para el tratamiento de este tipo de contaminación (Mustafa et al. 2021).

1.1 Industria textil

Dentro de las industrias, la textil es la que más contribuye a la contaminación del agua debido a que los procesos húmedos de desencolado, abastecimiento, blanqueo, mercerización, teñido y acabado consumen grandes cantidades de este líquido, lo que conduce a su escases y mala calidad. Como parte de la tinción de las prendas elaboradas, se recurre a la utilización de colorantes sintéticos (Amarillo anaranjado N°6 (E110), Rojo allura N°4 (E129), Azul brillante N°1 (E133) etc.) que, debido a su naturaleza química, son altamente estables a ácidos, álcalis y a la oxidación. Se ha estimado que alrededor del mundo se producen anualmente alrededor de 0.7 millones de toneladas de colorantes (Yang et al. 2019), de los cuales, más del 50% de la producción de estos tintes, son consumidos por la industria

textil (Benkhaya et al. 2020). Los procedimientos de estampado y teñidos empleados en la industria textil requieren importantes cantidades de agua que posteriormente se vierten en alcantarillas y drenajes, siendo su destino final ríos y otros sistemas acuáticos naturales con lo cual se genera un efecto perjudicial en la calidad del agua y como consecuencia también se contaminan sedimentos y suelos (Fig. 1). Se ha estimado que cerca de 280,000 toneladas de tintes textiles como el negro 21 y el azul remazol se generan anualmente a partir de efluentes industrializados; para 2025 se espera que la producción haya aumentado alrededor de 9.0 millones de toneladas (Nikolina 2019), de ahí la urgencia de emplear tratamientos biológicos para su eliminación.

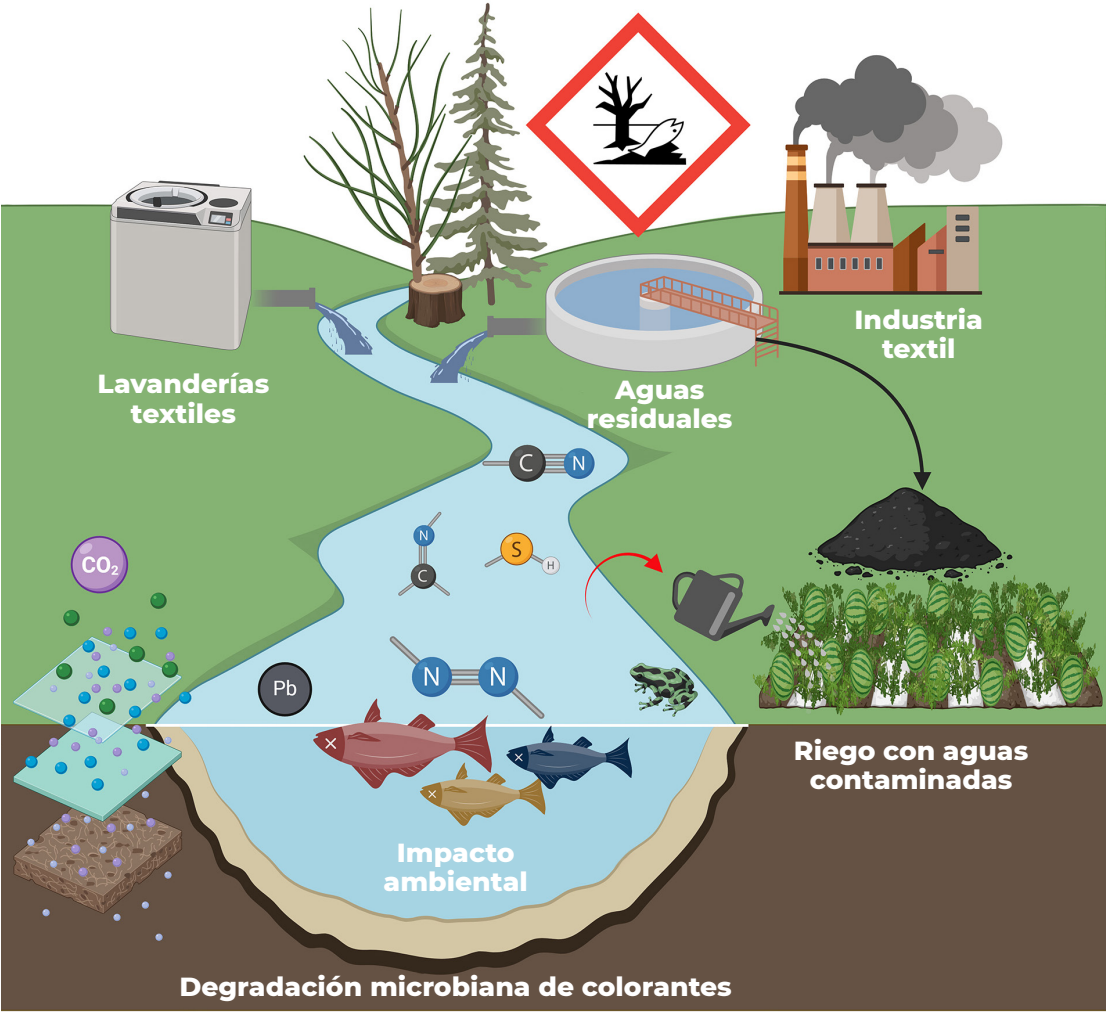


Figura 1. Destino final del agua generada por la industria textil.

1.2 Obtención de prendas y contaminación acuática

La industria textil se basa en el uso de tres tipos de fibras: 1) fibras de celulosa (algodón, rayón, lino, ramio y lyocell), 2) fibras proteicas (lana, angora, mohair, cachemira y seda) y 3) fibras sintéticas (poliéster, nylon, spandex, acetato, acrílico, ingeo y polipropileno) (El-Rahim et al. 2021). Los procesos que involucran la producción de fibra de viscosa, blanqueo, teñido, desencolado, descrudado y mercerizado producen cantidades significativas de aguas residuales alcalinas que alteran el pH de los cuerpos de agua receptores (Chen et al. 2020). La industria textil tiene como objetivo crear hilos y tejidos con los cuales se elabora una amplia variedad de productos, como prendas, artículos para el hogar, vestiduras automotrices, etc. De manera general, el proceso textil se divide en hilatura, tejeduría, tintura, acabados y confección del producto final, como se muestra en la **Figura 2**, sin embargo, algunos tipos de textiles como la mezclilla, llevan un

procesamiento adicional que consiste en el prelavado con la finalidad de darle un efecto de desteñido a las prendas que se elaboran con dichos textiles, estos procesos se realizan en lavanderías, el cual de forma general consiste en:

Pre-tratamiento: Remueve impurezas, descolado y reduce arrugas de las prendas.

Lavado: En muchos casos se emplea piedra pómez, ácido, con enzimas o blanqueador.

Teñido: Proceso utilizado para cambiar el color o tono del colorante inicial. Aporta a la prenda una apariencia de uso.

Suavizado: Este proceso tiene como finalidad disminuir la rigidez en las prendas, sin embargo, el uso en exceso genera que las prendas se oxiden, resultando en un color amarillo o café.



Figura 2. Procesos en la industria textil.

Para la obtención de las prendas que serán comercializadas, previamente pasan por un proceso de lavado. Las lavanderías tienen un impacto bastante notorio sobre los sistemas acuáticos, en este proceso se utilizan alrededor de 10 mil L de agua en cada etapa, siendo que este recurso en muchos lugares se encuentra escaso. Otra situación radica en el hecho de que estas empresas no son vigiladas por las autoridades pertinentes y eliminan sus efluentes textiles al sistema de alcantarillado municipal, donde se puede observar otro grave problema, muchas de

las plantas de tratamiento de aguas residuales municipales no cuentan con un sistema eficiente para dicho tratamiento, por lo que el agua residual es liberada a los principales ríos o cuerpos de agua transitorios, donde se puede observar claramente la coloración y mezcla del agua teñida con el agua del sistema acuático (**Fig. 2**) (Nikolina 2019).

1.3 Efluentes textiles

El agua residual producida por dichas industrias contiene altas concentraciones de colorantes azo debido a que su tasa de fijación es muy baja (Velusamy et al. 2022), los cuales además presentan la característica de ser no-biodegradables, de naturaleza tóxica representando una importante amenaza para el ecosistema (Markandeya et al. 2017). De acuerdo con Barathi et al. (2020) para la creación de 1 kg de producto textil se necesita alrededor de 200 litros de agua. Aproximadamente del 8 al 20% de los colorantes no son fijados en las fibras y son descargados a ríos y lagos acompañados de aditivos químicos posterior a las operaciones de teñido (Markandeya et al. 2017).

Con la caracterización de este tipo de efluentes, ha sido posible la identificación de diferentes compuestos químicos orgánicos e inorgánicos altamente tóxicos para los seres vivos. Se ha evidenciado, además de la presencia de colorantes, aminas cancerígenas que se producen como parte de la degradación del tinte en condiciones anaeróbicas (Velusamy et al. 2022). La descarga de efluentes textiles no tratados conduce a una reducción de la transferencia de la luz solar, alteración del pH y aumento de la demanda química de oxígeno (DQO) lo que conduce a la eutrofización del sitio (Thanavel et al. 2019).



1.4 Colorantes sintéticos empleados por la industria textil y sus efectos en la salud

Los colorantes textiles utilizados para teñir fibras se clasifican en colorantes ácidos, colorantes básicos, colorantes directos, colorantes fluorescentes, colorantes reactivos, colorantes azo y colorantes sulfurosos. Las amplias variaciones en la estructura química de los tintes textiles hacen que la degradación microbiana de dichos productos químicos no sea una tarea fácil (El-Rahim et al. 2021). Los colorantes tipo azo son los más empleados por la industria textil y contribuyen entre el 60% y el 70% de todos los colorantes producidos debido a su bajo costo, estabilidad química y versatilidad (Benkhaya et al. 2020). Otros colorantes como el azul disperso 284, rojo reactivo 195, negro directo 22, amarillo reactivo F3R, amarillo remazol y azul índigo son de los colorantes más empleados por la industria textil (Fig. 3).

Este tipo de compuestos químicos son considerados carcinogénicos y mutagénicos para las especies vegetales y animales, así como para la especie humana (Mustafa et al. 2021). Desde 1868 se han reportado diversas reacciones alérgicas a los colorantes sintéticos, como erupciones cutáneas causadas por vestir estas prendas (Markandeya et al. 2017). La ingestión de agua contaminada con tinte por parte de mamíferos da como resultado la biodegradación del enlace azo en aminas aromáticas al entrar en contacto con la bacterias anaerobias presentes en el tracto gastrointestinal (Saranraj 2013). Estas peligrosas aminas aromáticas son causantes de cáncer en vejiga, riñón e hígado (Saha y Rao 2020).

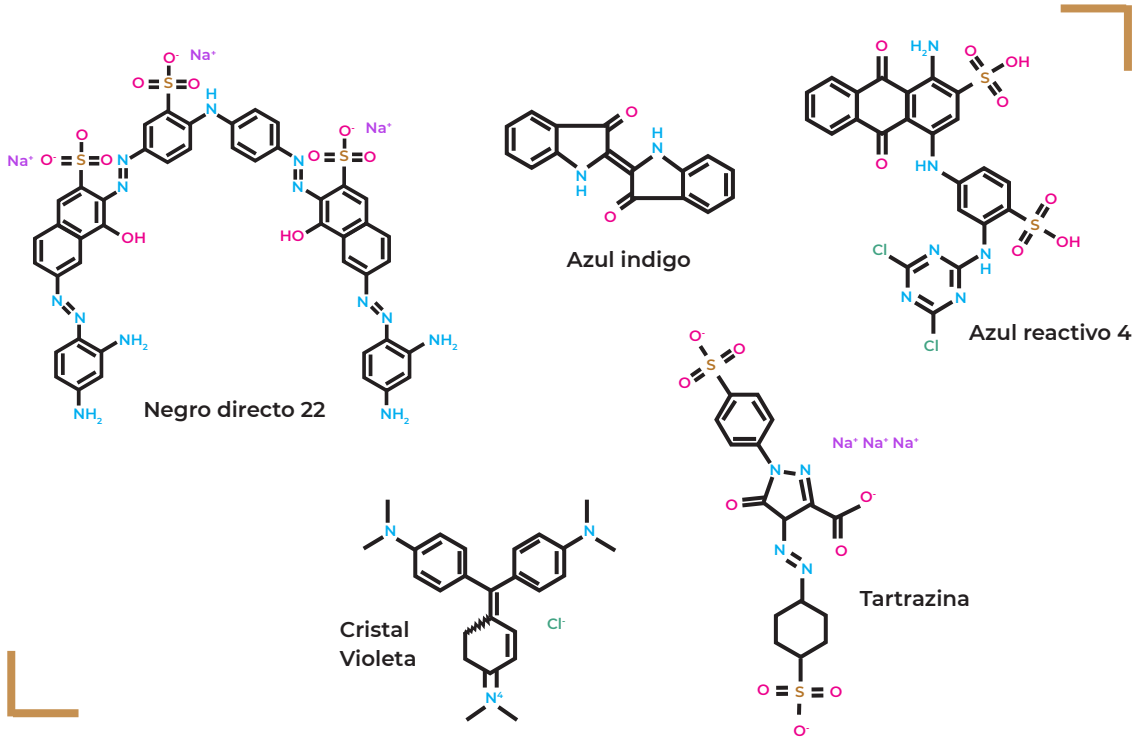


Figura 3. Estructura química de colorantes sintéticos empleados por la industria textil.

1.5 Tratamiento del agua

Actualmente se encuentran disponibles numerosas tecnologías para la biorremediación de agua residual, sin embargo, aquellos tratamientos fisicoquímicos resultan ser inviables para la eliminación del color, además de que son altamente costosos y poco eficientes debido a que generan una contaminación secundaria (Fig. 4) (Mustafa et al. 2021). Por otro lado, los tratamientos biológicos resultan ser amigables con el ambiente, económicos, eficaces y sustentables para la decoloración de aguas residuales textiles, mediante la conversión de compuestos orgánicos en productos

no tóxicos, es decir, agua y CO₂ (dióxido de carbono) (Karim et al. 2018). El proceso de biorremediación de aguas residuales textiles se puede realizar empleando varios métodos, incluyendo la decoloración bacteriana, la decoloración fúngica, fitorremediación y método enzimático, sin embargo, las bacterias son más ampliamente utilizadas debido a su naturaleza ubicua, rápida adaptación a las condiciones ambientales extremas donde se desarrollan y menor producción de lodos como parte del proceso de saneamiento (Velusamy et al. 2022).



Figura 4. Principales efectos tóxicos y tratamientos de efluentes textiles.

1.6 Biotecnología ambiental para la degradación de colorantes en efluentes textiles

La aplicación de microorganismos (bacterias, levaduras, hongos) en los sistemas de tratamiento de agua residual es ampliamente utilizado debido a su capacidad para producir enzimas extracelulares que les permiten convertir estos compuestos complejos en más simples. Sin embargo, se ha demostrado que con el uso de consorcios microbianos es posible obtener una completa mineralización de los contaminantes a causa de una integración catabólica. Se he demostrado que géneros bacterianos como *Klebsiella* , *Pseudomonas*, *Desulfovibrio*, *Bacillus*, *Sphingomonas*, *Streptococcus*, *Escherichia*, *Aeromonas*, *Proteus*, *Schewanella*, *Alcaligenes* y *Citrobacter* decoloran eficazmente las aguas residuales textiles (Fig. 5) (Mustafa et al. 2021), debido a que utilizan los colorantes presentes en los efluentes como fuente de carbono y nitrógeno, generando productos finales no tóxicos. La decoloración bacteriana está basada en la presencia de enzimas, azorreductasas, lacasas y oxigenasas, las cuales tienen potencial de degradación a través de la ruptura reductora de los enlaces azo por degradación anaeróbica y, finalmente, la transformación biológica de aminas aromáticas en condiciones aeróbicas (Kumar et al. 2016). Las enzimas oxidorreductasas bacterianas son importantes para la degradación de los tintes textiles. La importancia de aislar bacterias presentes en los efluentes textiles radica en la adaptación de estas a este tipo de sistemas ambientales contaminados, gracias a la producción de las enzimas necesarias para la descomposición de los colorantes (Mustafa et al. 2021).

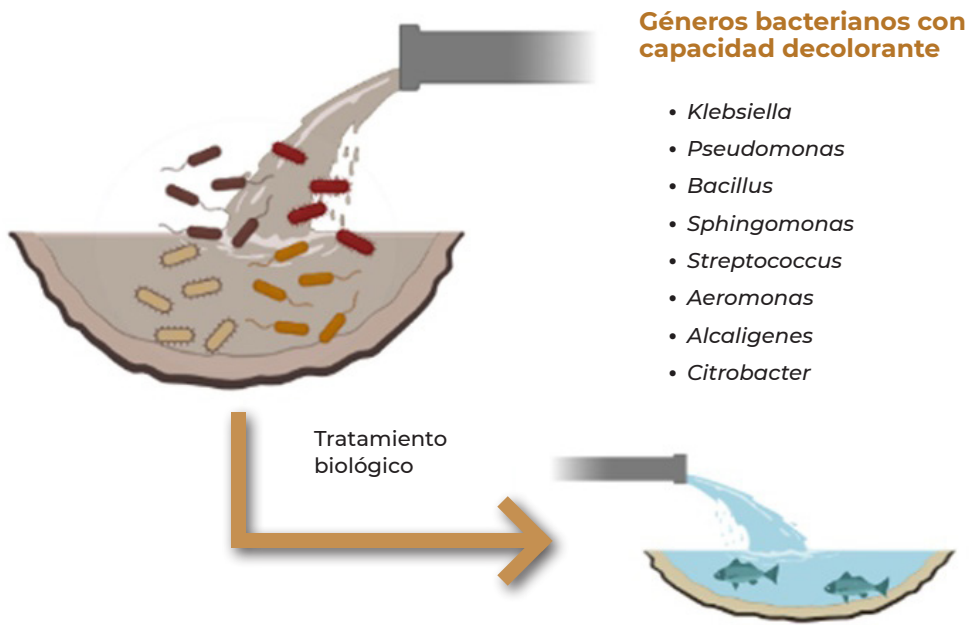


Figura 5. Géneros bacterianos con capacidad para decolorar agua residual textil.

Conclusiones

El uso de colorantes textiles ha sido una práctica fundamental en la industria de la moda y la producción de textiles durante siglos, proporcionando una amplia gama de colores y diseños que satisfacen las demandas estéticas del mercado. Sin embargo, esta práctica también plantea serias preocupaciones sobre la salud humana y el ambiente. Es imperativo que la industria textil adopte prácticas más seguras y sostenibles en el uso de colorantes naturales no tóxicos para los ecosistemas y el mismo humano. Sin embargo, esto se pronostica como un desarrollo lento, por lo que es de suma importancia implementar estrategias de biorremediación mediante el uso de microorganismos aplicados en efluentes industriales textiles capaces de degradar este tipo de contaminantes y lograr mitigar el impacto de esta industria al día de hoy.

Agradecimientos

Al Instituto Politécnico Nacional por el apoyo brindado a través del proyecto de Desarrollo Tecnológico e Innovación 20232836, y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca otorgada No. 1147157 a la alumna KAS.

Barathi S, Karthik C, SN. Padikasan IA (2020) Biodegradation of textile dye reactive blue 160 by *Bacillus firmus* (Bacillaceae: Bacillales) and non-target toxicity screening of their degraded products. *Toxicol Rep* 7: 16–22.

Benkhaya S, M'rabet S, el Harfi A (2020) Classifications, properties, recent synthesis and applications of azo dyes. In *Heliyon* 6 (1). Elsevier Ltd.

Chen F, Zhu J, Yang Y, Wang L (2020) Assessing environmental impact of textile production with water alkalization footprint. *Sci. Total Environ* 719.

El-Rahim WMA., Moawad H, Azeiz AZA, Sadowsky MJ (2021) Biodegradation of azo dyes by bacterial or fungal consortium and identification of the biodegradation products. *Egypt J Aquat Res* 47(3): 269–276.

Guo G, Hao J, Tian F, Liu C, Ding K, Xu J, Zhou W, Guan Z (2020) Decolorization and detoxification of azo dye by halo-alkaliphilic bacterial consortium: Systematic investigations of performance, pathway and metagenome. *Ecotoxicol Environ Saf* 204.

Karim ME, Dhar K, Hossain MT (2018) Decolorization of textile reactive dyes by bacterial monoculture and consortium screened from textile dyeing effluent. *J. Genet. Eng. Biotechnol* 16 (2): 375–380.

Kumar SS, Shantkriti S, Muruganandham T, Muruges E, Rane N, Govindwar SP (2016) Bioinformatics aided microbial approach for bioremediation of wastewater containing textile dyes. *Ecol. Inform* 31: 112–121.

Markandeya SP, Mohan D (2017) Toxicity of disperse dyes and its removal from wastewater using various adsorbents: A Review. *Res J Environ Toxicol* 11(2): 72–89.

Mustafa G, Tariq Zahid M, Ali S, Zaghum Abbas S, Rafatullah M (2021) Biodegradation and discoloration of disperse blue-284 textile dye by *Klebsiella pneumoniae* GM-04 bacterial isolate. *J King Saud Univ Sci* 33(4).

Nikolina S (2019). *Environmental impact of textile and clothes industry*. Members' Research Service.

Saha P, Rao KVB (2020). Biotransformation of Reactive Orange 16 by alkaliphilic bacterium *Bacillus flexus* VITSP6 and toxicity assessment of biotransformed metabolites. *Int J Environ Sci* 17(1): 99–114.

Saranraj P (2013) Bacterial biodegradation and decolourization of toxic textile azo dyes. *Afr J Microbiol Res* 7(30): 3885–3890.

Thanavel M, Kadam SK, Biradar SP, Govindwar SP, Jeon BH, Sadasivam SK (2019) Combined biological and advanced oxidation process for decolorization of textile dyes. *SN Applied Sciences*, 1(1).

Velusamy K, Periyasamy S, Kumar PS, CFC Jayaraj T, Gokulakrishnan M, Keerthana P (2022) Transformation of aqueous methyl orange to green metabolites using bacterial strains isolated from textile industry effluent. *Environ Techno Inno* 25.

Yang HY, Liu J, Wang YX, He CS, Zhang LS, Mu Y, Li W. H. (2019). Bioelectrochemical decolorization of a reactive diazo dye: Kinetics, optimization with a response surface methodology, and proposed degradation pathway. *Bioelectrochemistry*, 128: 9–16.