

CONTAMINACIÓN POR COLORANTES PROVENIENTES DE LA INDUSTRIA TEXTIL

Adriana Cortazar-Martínez,^{1*} César Abelardo González-Ramírez,¹
Claudia Coronel-Olivares,¹ José Adelfo Escalante-Lozada²,
José Roberto Villagómez-Ibarra¹

*Área académica de Química, UAEH. Ciudad Universitaria, km. 4.5, Carr. Pachuca-Tulancingo, Mineral de la Reforma, Hgo.,
e-mail: co090899@uaeh.edu.mx

¹ Instituto de Biotecnología, UNAM, Av. Universidad #2001, Col. Chamilpa C.P. 62210 Cuernavaca, Morelos, México

Resumen

La industria textil es una de las más importantes de nuestro país, sin embargo, es una de las industrias con mayor consumo de agua y las aguas residuales que se generan contienen un gran número de contaminantes de diferente naturaleza. Entre los contaminantes se destacan los colorantes. Estos compuestos se elaboran para ser altamente resistentes, incluso a la degradación microbiana, por lo que son difíciles de eliminar en las plantas de tratamiento convencionales. En este trabajo se da una breve descripción de la industria textil y de los contaminantes que se generan en los diferentes procesos, haciendo énfasis en los colorantes. Asimismo se muestran algunas tecnologías innovadoras para la remoción de colorantes en las aguas residuales.

Palabras clave: colorantes, contaminación, industria textil.

Procesos generales de la industria textil y los contaminantes que genera

Muchas actividades industriales se caracterizan por tasas de consumo de agua intensivo, además de que liberan grandes cantidades de efluentes con colorantes al ambiente (Tabla 1). Las principales fuentes emisoras de colorantes son las industrias textiles (Anjaneyulu *et al.*, 2005; Díaz, *et al.*, 2007).

Los efluentes de la industria textil se caracterizan por fluctuaciones extremas en muchos parámetros como la demanda química de oxígeno (DQO), la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), pH, color y salinidad. La composición del agua residual dependerá de los químicos y colorantes que se usen durante el proceso. Algunos de los parámetros característicos de estas aguas son los siguientes (Kuhad *et al.*, 2004; Dos Santos *et al.*, 2007, Ranganathan *et al.*, 2007):

Tabla 1. Concentraciones de color y cantidad de agua generada por algunas industrias (Anjaneyulu *et al.*, 2005)

Industria	Cantidad de agua generada (m ³ /t)	Concentración de color (unidades hazen)	Limites color usphs* (unidades hazen)
Azucarera	0.4 m ³ /t caña triturada	150-200	5-10
Pulpa y papel	175 m ³ /t de papel	100-600	0-10
Textil	120 m ³ /t de fibra	1100-1300	0-25
Curtido	28 m ³ /t	400-500	10-50
Kraft mil	40 m ³ /t	2100-2300	10-40
Cervecería	0.25 m ³ /t de cerveza producida	200-300	5-10
Destilería	12 m ³ /t de alcohol producido	200-300	5-10

*USPHS. United States Public Health Services (Servicios de Salud Pública de Estados Unidos).

- Color visible (3000-4500 unidades)
- Demanda química de oxígeno (800-1600 mg/L)
- pH alcalino (9-11)
- Sólidos totales (6000-7000 mg/L)

En la figura 1 se muestra parte del proceso que se lleva a cabo en la industria textil y los contaminantes que se genera, entre ellos los colorantes (Dos Santos *et al.*, 2007). En el proceso de teñido se generan una gran cantidad de efluentes con colorantes, ya que se requieren alrededor de 100 L de agua para procesar 1 k de tela teñida y alrededor del 30% de los colorantes se pierden debido a las ineficiencias del proceso y son descargados a los efluentes. En las industrias textiles se usa una amplia variedad de colorantes químicos en periodos cortos de tiempo y sus efluentes resultan extremadamente variados en su composición, por lo que se requiere de un tratamiento de aguas muy complejo (Nigam *et al.*, 1996; Kandelbauer *et al.*, 2005; Dias *et al.*, 2007).

Ademoroti y colaboradores (1992) realizaron un estudio de las descargas de efluentes textiles en Nigeria. Se encontró que el blanqueado, calentamiento y teñido son tres de los procesos que más consumo de agua tienen. Además,

en este estudio se evaluó la calidad del cuerpo receptor antes y después de las descargas (Tabla 2). Como puede verse, la calidad del cuerpo receptor se afecta considerablemente.

Aspectos generales sobre los colorantes

Más de 10 mil diferentes tipos de pigmentos y colorantes sintéticos son usados en diferentes industrias como la textil, la papelera, la cosmética, la farmacéutica, etc. Del 2 al 50% de estos colorantes forman parte de las aguas residuales y se consideran como contaminantes persistentes que no pueden removerse con los métodos convencionales de tratamiento de aguas. Los colorantes que se emplean en la industria textil han sido diseñados para ser altamente resistentes al lavado: agentes químicos, como los solventes, y factores ambientales, como la luz, agua y ataque microbiano; se pueden clasificar de acuerdo con su proceso de aplicación o a su clase química. Los colorantes están formados por un grupo de átomos responsables del color (cromóforos). Los grupos cromóforos más comunes son los azo (-N=N-), carbonilo (C=O), metilo (-CH₃), nitro y gru-

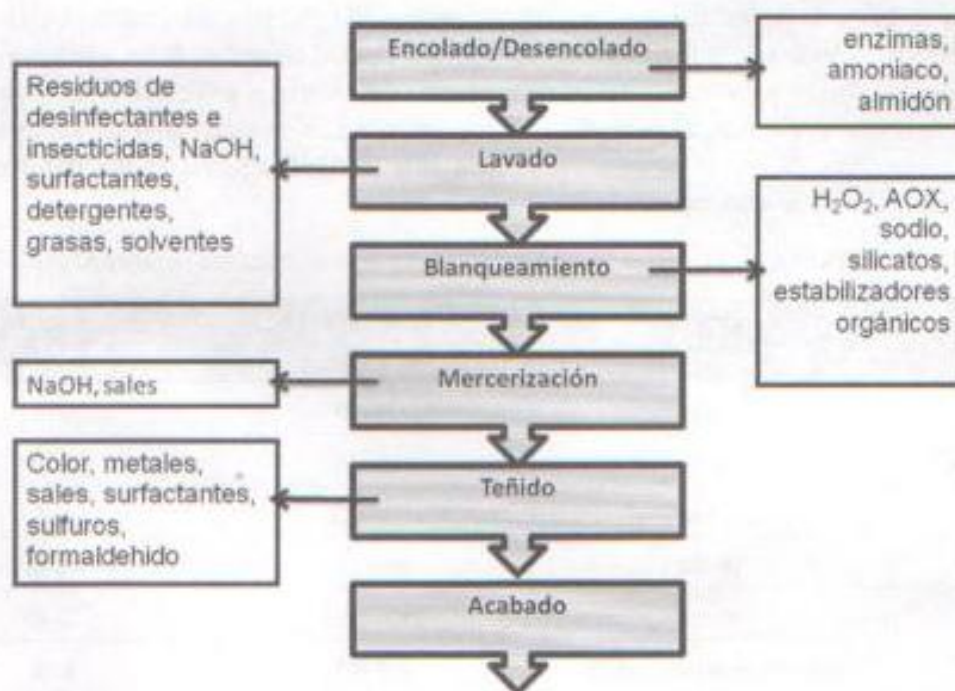


Figura 1. Principales contaminantes involucrados en algunos procesos de la industria textil del algodón (Dos Santos *et al.*, 2007).

Tabla 2. Efecto del efluente de una industria textil sobre la calidad del cuerpo receptor.

Parámetro	Calidad del cuerpo de agua	
	Antes de la descarga del efluente	Después de la descarga del efluente
Color	Claro	Azul cielo
pH	7.2	7.7
SS (mg/L)	11.3	67.6
ST (mg/L)	23.4	298.3
DO (mgO ₂ /L)	8.3	1.3
BOD (mgO ₂ /L)	2.0	98.7

Tasa de descarga: 258 L/min

pos quinoides. También pueden contener otros grupos que incrementan la intensidad del color y que pueden ser de tipo reactivo: ácidos, directos, básicos, dispersos, aniónicos, sulfuros, etc. En la Figura 2 se muestran ejemplos de algunos de los colorantes y sus grupos cromóforos. Los colorantes industriales se clasifican en: aniónicos, no iónicos y catiónicos, los dos primeros contienen cromóforos de tipo azo o antraquinona. Los azo, indigo y antraquinona son los cromóforos más utilizados en la industria textil, aunque los colorantes de tipo azo son los más utilizados con un 70%. Estos compuestos xenobióticos se caracterizan por la presencia de uno o más enlaces azo y anillos aromáticos. La razón principal por la que se les reconoce como compuestos recalcitrantes son las complejas estructuras aromáticas unidas a los enlaces azo y a su origen sintético. Los colorantes de tipo antraquinona son más resistentes a la degradación debido a que contienen estructuras aromáticas fusionadas (Kuhad *et al.*, 2004; Dias *et al.*, 2007; Dos Santos *et al.*, 2007).

Se ha reportado que el tiempo de vida media del colorante azul 19 es de 46 años a 25 °C y pH 7.0. Adicionalmente, los colorantes tienen una pobre fijación sobre las telas por lo que en las aguas residuales provenientes de este proceso se pueden encontrar concentraciones de colorante arriba de 1500 mg/L. Más del 90% de los colorantes persisten después de los tratamientos con lodos activados y son recalcitrantes a la acción de depuración de los tratamientos de aguas convencionales (Dias *et al.*, 2007).

Las aminas aromáticas que se generan de la ruptura del enlace azo son comúnmente conocidas por su potencial carcinógeno. Una amplia variedad de microorganismos en el ambiente han demostrado que son capaces de degradar colorantes. Aún así, los colorantes causan severos problemas en las plantas de tratamiento de aguas municipales, debido a que los cultivos microbianos presentes en las plantas de tratamiento convencionales son dañados por los colorantes azo (Kandelbauer y Guebitz, 2005).

Dependiendo del proceso usado y la normatividad vigente para disminuir las concentraciones límite de colorantes en los ríos (1 ppm en Reino Unido) se requiere de una reducción del 98% de la concentración del colorante. Existe una fuerte demanda de tecnologías que permitan reciclar el enorme volumen de agua que se consume durante el proceso. La degradación microbiana o enzimática podría permitir la reutilización del agua tratada, ya que las enzimas sólo atacan las moléculas del colorante, debido a su alta especificidad, dejando intactos los aditivos y las fibras (Kandelbauer y Guebitz, 2005).

Efectos de los colorantes

Los efluentes provenientes de la industria textil contienen una gran variedad de contaminantes provenientes de los diferentes procesos involucrados en la fabricación de fibras. Algunas causas de la toxicidad acuática son las sales, como el NaCl y el Na₂SO₄ (provenientes del teñido); agentes surfactantes, como fenoles, metales presentes en los co-

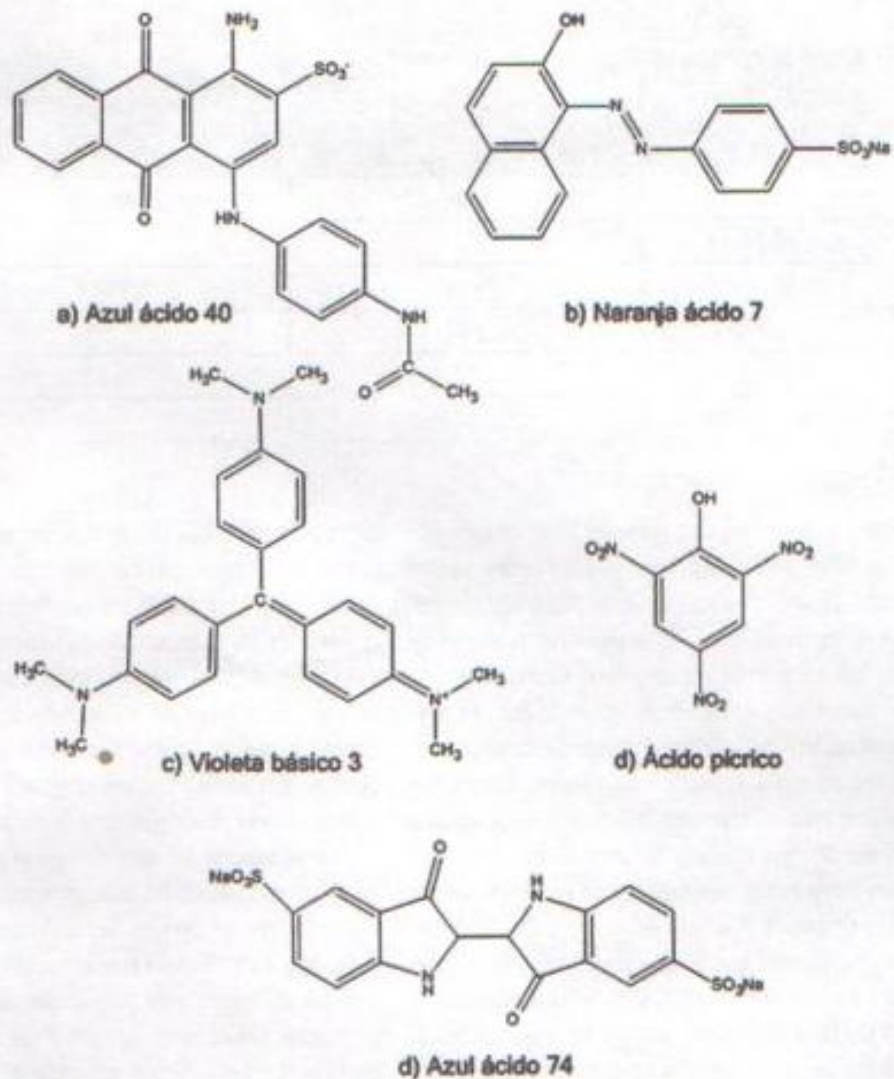


Figura 2. Ejemplo de algunos colorantes textiles y sus clases de cromóforos: (a) antraquinona, (b) azo, (c) triarilmetano, (d) nitro, (e) indigo.

colorantes; compuestos orgánicos, como solventes clorados (provenientes del lavado y la limpieza de máquinas); biocidas, como el pentaclorofenol (proveniente de fibra de lana contaminada) y aniones tóxicos, como el sulfuro (presente en algunos colorantes), entre otros (Bae *et al.*, 2005).

Aproximadamente del 10 al 15% de los colorantes son desechados en el ambiente durante el proceso de teñido de diferentes fibras (naturales y sintéticas), plásticos, piel, papel, aceites minerales, ceras e incluso en alimentos y

cosméticos. Se ha demostrado que ciertos colorantes azo pueden ser carcinogénicos y mutagénicos, además de que sus productos de degradación pueden resultar más tóxicos (Brown y De Vito, 1994; Ramsay y Nguyen, 2002; Gavril y Hodson, 2007).

Muchos colorantes contienen metales como parte de su estructura, por lo que en los efluentes textiles se puede encontrar arsénico, cadmio, cromo, cobalto, cobre, manganeso, mercurio, níquel, plata, titanio, cinc, estaño y plomo (Bae *et al.*, 2005).

Toxicidad de los colorantes

La toxicidad aguda de colorantes se puede evaluar utilizando *Daphnia magna*, *Salmonella thyphimurium*, periphiton (comunidad de algas que permanece en un solo lugar la mayor parte de su ciclo de vida), peces, ensayos en ratas e incluso monitoreos biológicos a trabajadores de la industria textil (Mathur et al., 2003; Bae et al., 2005; Chhaya et al., 2007; Dönbak et al., 2007; Kwon et al., 2008).

También se han hecho estudios para evaluar la toxicidad utilizando ensayos de Microtox, en los cuales se calcula la concentración necesaria para reducir 20% de la luminiscencia de una cepa modificada de *Vibrio fischeri* (EC_{20}) después de 5 min de incubación. Se evaluó la EC_{20} para determinar la toxicidad de dosis menores de colorante, encontrando que no solamente algunos colorantes pueden ser tóxicos, sino también sus productos de degradación (Tamsay et al., 2002). Por lo tanto, no solamente es necesario evaluar la toxicidad de los colorantes, sino también la de los subproductos generados durante la degradación de los colorantes. Las pruebas de toxicidad pueden verificar la eficiencia de enzimas o microorganismos no sólo para remover colorantes, sino para disminuir su toxicidad. La pérdida de toxicidad junto con la pérdida de color permitirán que el efluente pueda ser descargado al ambiente de manera segura (Gavril y Hodson, 2007; Ulson de Souza et al., 2007).

Las aguas residuales textiles generalmente son poco biodegradables y exhiben cinéticas de degradación lentas. Los lodos activados son muy sensibles a numerosos compuestos tóxicos. La medición de la inhibición causada por diferentes efluentes textiles sobre la biomasa nitrificante es una manera efectiva para medir el potencial inhibitorio sobre la actividad biológica y, por lo tanto, en el tratamiento biológico del efluente. Los efluentes de la industria textil tienen efectos tóxicos que pueden llegar a inhibir la biomasa nitrificante (Giordano et al., 2005).

El trabajo de Kwon y colaboradores (2008) mostró la actividad mutagénica del agua de un río cercana a una zona industrial textil, aunque aún es necesario identificar los agentes mutagénicos. También se ha reportado el efecto tóxico de efluentes textiles en hígado y testículos de ratas albinas, encontrando cambios en el contenido total de lípidos y colesterol que revelan una disminución en la fun-

ción testicular; además de alteraciones sobre la síntesis de proteínas sobre las células espermatozógenas. Asimismo, se encontró la disminución de las proteínas en el hígado como resultado de la acción necrótica del efluente con colorantes. Eso se sustenta por los daños morfológicos observados en las células del hígado (Mathur et al., 2003).

Los efluentes textiles son conocidos por ser inhibidores de algunas enzimas, incluyendo las ATPasas unidas a la membrana. Estas enzimas son responsables, entre otras cosas, del movimiento de iones a través de la membrana. En el trabajo de Chhaya y colaboradores (2007) se hicieron experimentos utilizando *Periophthalmus* (peces del fango), que es un género de pez, capaz de vivir al aire libre alimentándose de insectos y pequeños crustáceos. Este pez es miembro de la cadena alimentaria costera y, además, es consumido ocasionalmente por los pescadores locales. En este estudio se hicieron ensayos para determinar la toxicidad de los efluentes de industrias textiles y cómo afectan algunas ATPasas, encontrando una inhibición de la actividad enzimática en el hígado, el músculo y el cerebro. La disminución de la actividad enzimática de ATPasa en el cerebro podría sugerir un efecto neurotóxico debido a los efluentes.

La mayoría de las poblaciones humanas están expuestas a una variedad de tóxicos. Los monitoreos biológicos han llevado a estudiar diferentes ocupaciones para explorar sus riesgos en la salud. Dönbak y colaboradores (2007) evaluaron el posible riesgo genotóxico para los trabajadores de la industria textil, quienes se exponen a una amplia variedad de químicos, como colorantes textiles, agentes blanqueadores, ácidos, álcalis y sales. Los resultados de este estudio revelan que existe un riesgo de genotoxicidad en los trabajadores de la industria textil, por lo que recomiendan tomar medidas de protección, como el uso de máscara y guantes, para prevenir y minimizar la exposición.

No solamente los seres vivos se ven afectados por la presencia de colorantes en el agua, sino también las tierras que se riegan con esas aguas y los cultivos. Además, algunos compuestos químicos orgánicos pueden ser absorbidos y utilizados por algunas plantas, como el melón, el rábano y la papa. Los efluentes textiles pueden reducir la germinación de las semillas y el crecimiento temprano de algunos vegetales (Zhou, 2001; Rehman et al., 2008).

Métodos convencionales para el tratamiento de aguas residuales con colorantes

Existen muchos métodos que se utilizan para el tratamiento de aguas residuales con colorantes. En la Tabla 3 se muestra un cuadro sinóptico con los métodos que se han utilizado para el tratamiento de las aguas residuales de la industria textil. La mayoría de estas tecnologías se aplica de manera eficiente y se encuentran disponibles comercialmente, aunque muchas son altamente específicas, con costos elevados, no se aplican para una amplia variedad de colorantes y no resuelven el problema de la decoloración (Kuhad *et al.*, 2004; Arjaneyulu *et al.*, 2005).

Se ha reportado el efecto negativo de la presencia de colorantes en el agua y el suelo, encontrando que tienen efectos adversos sobre los seres vivos. También es importante considerar que algunos subproductos que se forman en la degradación de estos compuestos pueden resultar más nocivos que el colorante.

El diseño de colorantes menos tóxicos es una opción para hacer el proceso de teñido menos agresivo para el ambiente; sin embargo, es necesario efectuar más estudios sobre estos nuevos colorantes y sus posibles productos de degradación.

La eliminación de los colorantes de los efluentes de la industria textil representa un gran reto ambiental, ya que las

Tabla 3. Métodos utilizados para el tratamiento de efluentes con colorantes.

MÉTODOS FÍSICOS	MÉTODOS QUÍMICOS	MÉTODOS BIOLÓGICOS
<ul style="list-style-type: none"> ❖ Adsorción: su eficiencia y costo varía dependiendo de los materiales utilizados, los cuales van desde carbón activado, sílica, residuos agroindustriales, entre otros. ❖ Intercambio iónico: es eficiente para colorantes catiónicos y aniónicos, pero los solventes que se utilizan son caros y sólo tienen aplicaciones específicas. ❖ Filtración por membrana: se utiliza para remover colorantes que se encuentran en bajas concentraciones, pero tiene altos costos y requiere de un pretratamiento. 	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Electroquímico: es un método eficiente, genera menos residuos tóxicos, pero los costos de electricidad son altos. ❖ Oxidación: se puede utilizar ozono, reactivo de Fenton, hipoclorito de sodio, entre otros. Su eficiencia es variable y pueden generar subproductos tóxicos. ❖ Coagulación: se realiza en un periodo corto de tiempo y tiene bajos costos de inversión. Sin embargo, no es eficiente para algunos tipos de colorantes y se genera una gran cantidad de residuos (lodos). 	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Biosorción: no se ha empleado para tratar grandes volúmenes de agua. Ocasiona problemas en cuanto a la disposición de la biomasa con los colorantes adsorbidos. ❖ Biodegradación: se han desarrollado consorcios y sistemas combinados aeróbicos/anaeróbicos, así como células inmovilizadas. Es necesaria más información fisiológica y genética. Se requiere una larga fase de aclimatación. ❖ Métodos enzimáticos: se han utilizado enzimas como lacasas y peroxidasas. Requiere tiempos cortos de contacto. Aún se necesitan más estudios para su aplicación a gran escala.

Conclusiones

Debido a la ineficiencia en los procesos de la industria textil, cierto porcentaje de colorantes se desechan en los efluentes. La contaminación ocasionada por los efluentes de la industria textil es un problema de interés tanto por el tipo de componentes y su dificultad en el tratamiento, así como por los efectos genotóxicos, mutagénicos y neurotóxicos sobre los seres vivos.

estructuras químicas de las moléculas de colorantes están diseñadas para resistir la exposición solar o el ataque químico, por lo que resultan también resistentes a la degradación microbiana. Es por ello hay un creciente interés en la investigación y desarrollo de nuevas tecnologías que logren una mayor eficiencia en el tratamiento de los efluentes de la industria textil.

Referencias

- Ademoroti, A., O. Ukponmwan, A. Omode. 1992. Studies of textile effluent discharges in Nigeria. *Int. J. Environ. Stud.* 39:291-296.
- Anjaneyulu, Y. N., Sreedhara-Chary, S. Suman-Raj. 2005. Decolorization of industrial effluents—available methods and emerging technologies—a review. *Reviews Rev. Environ. Sci. Technol.* 4:245-273.
- Bae, J., H. Freeman, S. Kim. 2006. Influences of New Azo Dyes to the Aquatic Ecosystem. *Fibers and Polymers.* 7:30-35.
- Brown, A., C. DeVito. 1993. Predicting azo dye toxicity. *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.* 23:249-324.
- Chaya, J., J. Thaker, R. Mittal, S. Nuzhat, P. A. Mansuri, R. Kundu. 2007. Influence of Textile Dyeing and Printing Industry Effluent on ATPases in Liver, Brain, and Muscle of Mudskipper, *Periophthalmus dipe*. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 58:793-800.
- Dias, A., A. Sampaio, R. Bezerra. 2007. "Environmental Applications of Fungal and Plant Systems: Decolorization of Textile Wastewater and Related Dyestuffs". En *Environmental Bioremediation Technologies* (Editores Singh S.N. & Tripathi R.D.), Springer Berlin Heidelberg. 445-463.
- Dönbak, L., E. Rencuzogullari, M. Topaktas, G. Sahin. 2006. A Biomonitoring Study on the Workers from Textile Dyeing Plants. *Genetika.* 42:613-618.
- Dos-Santos, A., F. Cervantes, I. Van-Lier. 2007. Review paper on current technologies for decolorization of textile wastewaters: Perspectives for anaerobic biotechnology. *Bioresour. Technol.* 98:2369-2385.
- Gavril, M., P. Hodson. 2007. Investigation of the Toxicity of the Products of Decoloration of Amaranth by *Trametes versicolor*. *J. Environ. Qual.* 36:1591-1598.
- Giordano, A., S. Grilli, L. De Florio, D. Mattioli. 2005. Effect of Selected Textile Effluents on Activated Sludge Nitrification Process. *J. Environ. Sci. Health.* 40:1997-2007.
- Giorgi, A., L. Malacalza. 2002. Effect of an industrial discharge on water quality and periphyton structure in a pampean stream. *Environ. Monit. Assess.* 75: 107-119.
- Kandelbauer, A., G. M. Guebitz. 2005. "Bioremediation for the decolorization of textile dyes—a review". In: *Environmental Chemistry*. (Editores: Lichtfouse, E., Dudd, S., Robert, D. Springer, Berlin. 269-288.
- Kuhad, C., N. Sood, K. Tripathi, A. Singh, P. Ward. 2004. Developments in microbial methods for the treatment of dye effluents. *Adv. Appl. Microbiol.* 56:185-213.
- Kwon, J., H. Lee, J. Kwon, K. Kim, E. Park, M. Kang, Y. Kim. 2008. Mutagenic activity of river water from a river near textile industrial complex in Korea. *Environ. Monit. Assess.* 142:289-296.
- Mathur, N., R. Krishnatrey, S. Sharma, K. Sharma. 2003. Toxic Effects of Textile Printing Industry Effluents on Liver and Testes of Albino Rats. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 71:453-457.
- Nigam, P., I. Banat, D. Singh, R. Marchan. 1996. Microbial process for the decolorization of textile effluent containing azo, diazo and reactive dyes. *Process Biochem.* 31:435-442.
- Ramsay, J., T. Nguyen. 2002. Decoloration of textile dyes by *Trametes versicolor* and its effect on dye Toxicity. *Biotechnol. Lett.* 24: 1757-1761.
- Ranganathan, K., S. Iyapaul, D. Sharma. 2007. Assessment of water pollution in different bleaching based paper manufacturing and textile dyeing industries in India. *Environ. Monit. Assess* 134:363-372.
- Rehman, A., H. Bhatti, H. Rehman. 2008. Textile Effluents Affected Seed Germination and Early Growth of Some Winter Vegetable Crops: A Case Study. *Water Air Soil Pollut.* 198:155-163.
- Ulson de Souza, S., E. Forgiarini, A. Ulson de Souza. 2007. Toxicity of textile dyes and their degradation by the enzyme horseradish peroxidase (HRP). *J. Hazard. Mat.* 147:1073-1078.
- Zhou, Q. 2001. Chemical Pollution and Transport of Organic Dyes in Water-Soil-Crop Systems of the Chinese Coast. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 66:784-793.