

## DESARROLLO DE UN SISTEMA DE RECICLAJE DE AGUAS RESIDUALES TEXTILES COLOREADAS MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DE UN FOTOREACTOR SOLAR

Andrés Zaconeta Piva y Ramiro Escalera Vásquez\*

Carrera de Ingeniería de la Producción

\*Centro de Investigaciones en Procesos Industriales - CIPI

Universidad Privada Boliviana

azaconeta@upb.edu

(Recibido el 10 de noviembre 2010, aceptado para publicación el 15 de noviembre 2010)

### RESUMEN

Se ha desarrollado un sistema de reciclaje de aguas residuales provenientes de la etapa de adición de colorantes orgánicos en el proceso de teñido de jeans, a nivel de laboratorio, que consiste en dos procesos: la foto-degradación por el método foto-Fenton del color y de la materia orgánica, utilizando un foto-reactor solar tubular de sección semicircular de un solo eje y la precipitación/filtración de hierro remanente en las aguas foto-degradadas.

El colector-concentrador solar, que posee una capacidad de concentración de radiación UV-A de 2,88 soles, fue construido reciclando materiales desechados: tubos de vidrio proveniente de lámparas de Ne y tubos de desagüe sanitario de 6" (PVC), recubierto por láminas de aluminio.

Se realizaron pruebas de optimización del proceso de foto-degradación mediante un modelo estadístico factorial de multiniveles, dando como resultado concentraciones óptimas de  $\text{Fe}^{2+}$  35  $\text{mgL}^{-1}$  y de  $\text{H}_2\text{O}_2$  1400  $\text{mgL}^{-1}$ , pH óptimo entre 2,35 a 2,40 e intensidad de radiación solar UV-A integral incidente entre 50 y 70  $\text{Wm}^{-2}$  (radiación efectiva que recibe la solución entre 144 y 202  $\text{Wm}^{-2}$ ).

Aplicando las condiciones óptimas a soluciones de tinte (Negro, Azul Marino y Rojo Escarlata) preparadas en laboratorio se llegaron a porcentajes de remoción del 81%, 98% y 93% respectivamente. En cambio, en la foto-degradación de los licores reales de la industria se llegó a un porcentaje de remoción del 77% y una disminución de la DQO de 92%, reduciendo drásticamente el poder contaminante de este efluente.

Se determinaron experimentalmente las constantes cinéticas de pseudo-primer orden y tiempos medios de proceso dando los siguientes resultados en las soluciones de tinte: Negro  $k_{\text{app}}$  0,0336  $\text{min}^{-1}$  y  $t_{1/2}$  20,63 min, Azul Marino  $k_{\text{app}}$  0,0568  $\text{min}^{-1}$  y  $t_{1/2}$  12,20 min y para el Rojo Escarlata  $k_{\text{app}}$  0,0164  $\text{min}^{-1}$  y  $t_{1/2}$  42,27 min. Para el licor se obtuvo: degradación del tinte  $k_{\text{app}}$  0,0356  $\text{min}^{-1}$  y el  $t_{1/2}$  es de 19,47 min y para la disminución de la DQO  $k_{\text{app}}$  0,0196  $\text{min}^{-1}$  y  $t_{1/2}$  35,4 min. Se trataron los efluentes foto-degradados mediante la precipitación del hierro residual con soda caustica comercial (0,75  $\text{gL}^{-1}$ ) y una filtración hasta llegar a una concentración residual de hierro de 4,36  $\text{mgL}^{-1}$ . Pruebas de reutilización de los licores tratados en la etapa de adición de colorantes, a escala de laboratorio, demostraron que no existen diferencias en la calidad de los tejidos teñidos. Con estos antecedentes se puede concluir que el sistema de tratamiento y reciclaje propuesto es viable técnicamente.

**Palabras Clave:** Foto-Degradación, Tintes Industriales, Foto-Fenton, Radiación UV-A Solar.

### 1. INTRODUCCIÓN

La industria textil boliviana, especialmente la que se dedica al lavado y teñido de jeans, genera grandes volúmenes de aguas residuales, las cuales, en su mayoría, no son tratadas antes de ser desechadas, a pesar que contienen altas concentraciones de colorantes orgánicos no biodegradables, requiriéndose la remoción de las sustancias químicas que los conforman para minimizar su efecto al medio ambiente.

Específicamente, dentro del proceso productivo de teñido de jeans se encuentra la etapa de adhesión de color, la cual aporta grandes cantidades de tintes de base orgánica (grupos azo, antraquinona y ftalocianina). Los residuos líquidos provenientes de esta etapa, presentan niveles altos de contaminación con valores de DQO que oscilan entre 2500 a 4000  $\text{mgL}^{-1}$ , medidos en muestras de licores reales en este mismo estudio, los cuales exceden de sobremanera los límites permitidos por el Reglamento Ambiental para el Sector Industrial Manufacturero - RASIM (menores a 250  $\text{mgL}^{-1}$ ) [1].

Existen diversas soluciones para tratar este tipo de residuos líquidos como ser: precipitación por coagulación [2], tratamiento electroquímico [3], adsorción en lechos de carbón activado [4], fotodegradación solar mediante el proceso foto-Fenton (sales de hierro y  $\text{H}_2\text{O}_2$ ) [5], [6], [7], [8], [9] y otros. Todas las soluciones presentan diferentes ventajas y desventajas entre sí; sin embargo, la fotodegradación solar mediante Foto-Fenton posee características únicas que pueden considerarse ventajas comparativas como ser: oxidación completa de compuestos orgánicos, efectivo en sustancias no biodegradables, uso de la radiación UV como fuente de energía, y no genera residuos que deben ser posteriormente desechados.

Los principales estudios sobre el tratamiento de residuos líquidos industriales textiles mediante el uso de fotoreactores se refieren a dos métodos fotocatalíticos: el método heterogéneo que utiliza catalizadores sólidos y el proceso foto-Fenton que se considera un método homogéneo. Como ejemplo del primer método, se puede mencionar el estudio desarrollado por Julson [9], en el que se utilizaron lámparas de luz UV (20 W a 365 nm) y  $\text{TiO}_2$  como fotocatalizador, degradando la materia orgánica mediante la generación de pares electrón-hueco. Clemente y colaboradores [8] llevaron a cabo un estudio de comparación entre ambos métodos (uso de  $\text{TiO}_2$  y foto-Fenton), determinando que para tintes más complejos e.g. ftalocianina, el método foto-Fenton presenta mayor eficacia debido a que es un tratamiento más energético.

La mayoría de los estudios realizados se refieren al análisis del comportamiento de los procesos químicos en condiciones controladas como ser el uso de lámparas de UV y soluciones de tinte con agua destilada. Existen muy pocos estudios que utilizan el proceso foto-Fenton en concentradores solares operando bajo condiciones normales y comunes de radiación solar. El más relevante es el desarrollado por Pey Clemente [8], quien utilizó los procesos de fotocatalisis, tanto homogénea como heterogénea, para tratar soluciones de agua con tinte orgánico, simulando los efluentes provenientes de la industria textil. Como reactor utilizó tubos de cuarzo por tener la mejor transmitancia entre todos los materiales aunque con un alto costo.

El presente trabajo tiene por objetivo el adecuar la tecnología desarrollada por Pey Clemente a las condiciones reales de empresas dedicadas al lavado y teñido de jeans en la ciudad de Cochabamba. Comprende la optimización del proceso de fotodegradación solar mediante foto-Fenton y comprueba la viabilidad técnica de reciclar estos efluentes tratados en el teñido de prendas.

## 2. CARACTERÍSTICAS DEL FOTOREACTOR SOLAR

Se construyó un fotoreactor solar tubular de sección semicircular de un solo eje, el cual consiste de tres partes esenciales: reactor, colector/concentrador de radiación UV-A y sistema de recirculación. En este trabajo, se tuvo el propósito de generar tecnología que puede ser fácilmente implementada y que aproveche materiales o piezas comerciales o en lo posible reciclados. Así, para el reactor se utilizaron tubos de Ne de vidrio desechados de 0,04 m de diámetro, 1 m de largo y 0,8 mm de espesor, que tiene un porcentaje de transmitancia medido de  $85,1\% \pm 0,4\%$ .

Para el colector/concentrador de radiación UV-A, se utilizó un tubo de PVC de desagüe de 6", cortado axialmente por la mitad, el cual fue recubierto de una lámina de papel aluminio comercial. El porcentaje de reflectancia medido del papel aluminio fue de  $78,9\% \pm 1,1\%$ , contando con un área efectiva de  $0,118 \text{ m}^2$  y con una capacidad de poder concentrar eficazmente la radiación solar UVA desde las 10 a.m. hasta las 4 p.m.

El sistema de recirculación se construyó con accesorios de plomería, mangueras, un recipiente plástico de 10 L y una pequeña bomba sumergible de 15 W de potencia. Además, como soporte para todo el equipo se utilizaron perfiles de aluminio que aseguraban una base sólida. El fotoreactor utilizado puede operar con un volumen mínimo de efluente de 5 L y un máximo de 10 L, teniendo un volumen iluminado dentro del reactor de 1,1 L. En la Figura 1 se muestra el fotoreactor solar construido.



**Figura 1** - Fotoreactor solar tubular de sección semicircular de un solo eje.

El fotoreactor concentra 2,88 veces la intensidad de la radiación solar incidente, lo que significa que el fluido dentro del reactor recibe los fotones (radiación UV-A) en una cantidad equivalente a 2,88 soles. Este valor fue medido tomando en cuenta tres factores: la potencia que llega directamente al reactor, la potencia que es reflejada directamente por las paredes del concentrador y la potencia que logra pasar el reactor y es nuevamente reflejada al reactor [10].

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS EXPERIMENTALES

#### a) Tintes

Se utilizaron los principales tintes usados en el proceso productivo del teñido de jeans en una empresa de capacidad típica emplazada en la ciudad de Cochabamba: Negro “Reactive Black 5” (grupo azo), Azul Marino “Reactive Blue 4” (grupo antraquinona) y Rojo Escarlata “Reactive Brilliant Red K-2BP” (grupo azo). Estos tintes de base orgánica pertenecen a la familia de los colorantes sintéticos reactivos. En las Figuras 2-4 se muestran las estructuras moleculares de los tintes utilizados.

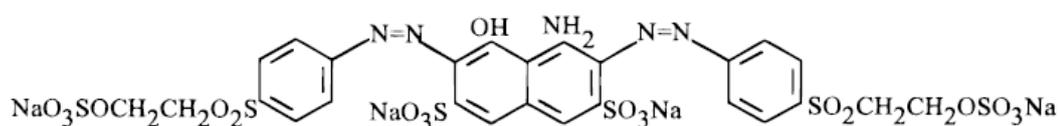


Figura 1- Estructura molecular, Reactive Black 5

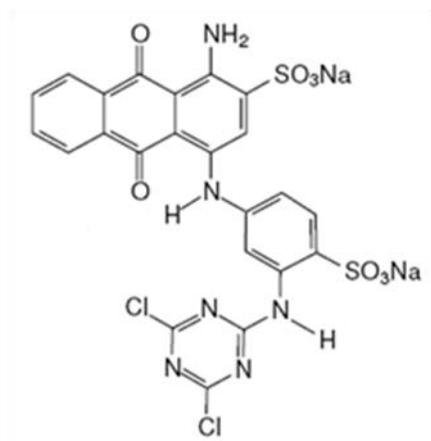


Figura 2- Estructura molecular, Reactive Blue 4.

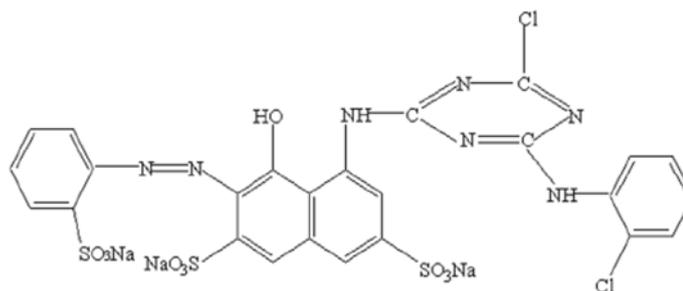


Figura 4- Estructura molecular, Reactive Brilliant Red K-2BP.

#### b) Reactivos

Como reactivos foto-Fenton se utilizaron FeSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O (pureza 98%) y H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> de 10 volúmenes (0,03 g mL<sup>-1</sup>). Para la regulación del pH de los efluentes se utilizó una solución de HCl 1M.

#### c) Determinación de la concentración de tinte

Se desarrolló un método espectrofotométrico para determinar la concentración de tinte presente en las soluciones, utilizando un espectrofotómetro Shimadzu UV-1601 y celdas de cuarzo de 1 cm de paso de luz. Los pasos seguidos para el desarrollo del método fueron los siguientes:

- Se midieron los espectros de absorbancia de soluciones de los tres tintes comerciales de 0,25 g L<sup>-1</sup> de concentración en agua destilada. Se determinaron las longitudes de onda en las cuales se producen los picos de absorbancia: 585 nm para el tinte Negro; 610 nm para el Azul Marino y 485 nm para el Rojo Escarlata.
- Se generaron curvas de calibración (absorbancia vs. concentración) para cada tinte en el intervalo de 0 y 0,25 g L<sup>-1</sup>. En la Figura 5 se presentan las curvas para cada tinte.

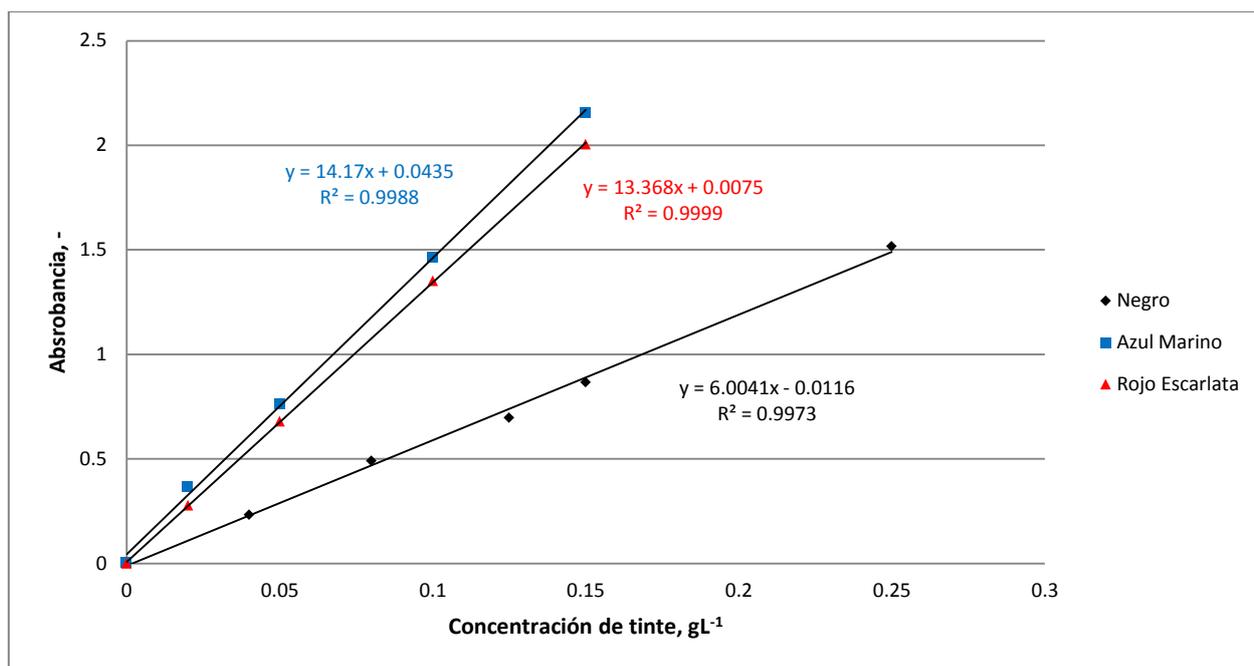


Figura 5 - Curvas de calibración Absorbancia vs Concentración de tinte.

Para la determinación de la concentración de tinte presente en los licores reales, se utilizó el patrón construido para el tinte Negro, debido a que los espectros de absorbancia del licor y de la solución de tinte puro presentan fuertes similitudes en el intervalo de longitudes de onda donde se generan los picos.

#### d) Determinación de la demanda química de oxígeno (DQO) y la concentración de hierro

Para poder medir la disminución de la DQO en la fotodegradación de los licores provenientes de la etapa de teñido, se utilizó el método oficial descrito en la 20ava edición del *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* [11], además, se corroboraron los resultados enviando muestras al Centro de Aguas y Saneamiento Ambiental de la Universidad Mayor de San Simón. Para la concentración de hierro total residual en los efluentes fotodegradados, se utilizó el método espectrofotométrico con o-fenantrolina como cromógeno, también descrito en el *Standard Methods* [11].

#### e) Optimización del proceso de fotodegradación

Previamente a tratar los licores reales de la industria, se procedió a optimizar las condiciones para llevar a cabo la fotodegradación de los contaminantes orgánicos. Para esto, se utilizaron soluciones de tinte Negro con agua de pozo profundo típico en una concentración de  $0,15 \text{ g L}^{-1}$ , concentración superior a las registradas en los licores ( $0,09$  a  $0,13 \text{ g L}^{-1}$ ). Como variables independientes se tomaron la concentración de  $\text{Fe}^{2+}$  y la relación Fenton ( $\text{mg L}^{-1} \text{ Fe}^{2+}/\text{mg L}^{-1} \text{ H}_2\text{O}_2$ ). Las demás variables, se mantuvieron constantes en los valores óptimos determinados en pruebas preliminares: pH 2,30 a 2,40, intensidad de radiación UV 40 a  $75 \text{ W m}^{-2}$  (desde 10:00 a 14:30), temperatura 20 a  $47 \text{ }^\circ\text{C}$ . Como variables de respuesta, se definieron el tiempo de proceso y el porcentaje de remoción de contaminante.

Se utilizó un diseño factorial de multiniveles con la ayuda del programa STATGRAPHICS Centurion XV.I. Se determinaron tres niveles para las dos variables analizadas: concentración de  $\text{Fe}^{2+}$  20, 25 y  $30 \text{ mg L}^{-1}$  y relación Fenton 25, 30 y 35. Las pruebas se realizaron por duplicado para lograr una mayor solidez estadística contando con 18 corridas experimentales. En la Tabla 1 se presenta las combinaciones resultantes del diseño experimental.

Con este método, se determinó como concentración óptima de  $\text{Fe}^{2+}$  de  $35 \text{ mg L}^{-1}$  y una relación Fenton de 40, lo que se traduce en una concentración de  $\text{H}_2\text{O}_2$  de  $1400 \text{ mg L}^{-1}$ .

TABLA 1- CONCENTRACIÓN  $\text{Fe}^{2+}$  Y  $\text{H}_2\text{O}_2$ 

Concentración $\text{Fe}^{2+}$ ( $\text{mgL}^{-1}$ )	Relación Fenton $\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2$	Concentración $\text{H}_2\text{O}_2$ ( $\text{mgL}^{-1}$ )
20	25	500
20	30	600
20	35	700
25	25	625
25	30	750
25	35	875
30	25	750
30	30	900
30	35	1050

#### 4. RESULTADOS OBTENIDOS

##### a) Fotodegradación en condiciones óptimas de soluciones de tinte Negro, Azul Marino y Rojo Escarlata

Determinadas las dosis óptimas de reactivos para la fotodegradación, se procedió a tratar soluciones de los tres tintes analizados, obteniendo las curvas de porcentaje de remoción de contaminante en función del tiempo de la Figura 6.

En la fotodegradación de la solución de tinte Azul Marino, se obtuvo un porcentaje de remoción del 98,35% en dos horas de tratamiento. Para el tinte Rojo Escarlata, se llegó a 93,63% en dos horas y cuarenta y cinco minutos. Finalmente, para el tinte Negro se obtuvo un porcentaje de remoción del 81,51% en dos horas y cuarenta y cinco minutos.

Se puede observar que en los primeros 10 minutos se produce la remoción del 50% aproximadamente, debido a la alta concentración inicial de iones  $\text{Fe}^{2+}$  y  $\text{H}_2\text{O}_2$ . En este primer periodo, prevalece la reacción Fenton ( $\text{Fe}^{2+} + \text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow \text{Fe}^{3+} + \text{OH}^- + \text{OH}^\bullet$ ), sin contar significativamente con la fotocatalisis ( $\text{Fe}^{3+} + h\nu \rightarrow \text{Fe}^{2+}$ ). Después de este periodo, comienza la fotodegradación por foto-Fenton propiamente dicha, en la que el hierro oxidado a  $\text{Fe}^{3+}$  vuelve a ser reducido a  $\text{Fe}^{2+}$  por la absorción de fotones provenientes de la radiación UV, lo cual permite la reacción continua con el  $\text{H}_2\text{O}_2$  generando radicales oxidrilo que oxidan la materia orgánica en agua y  $\text{CO}_2$  como productos finales.

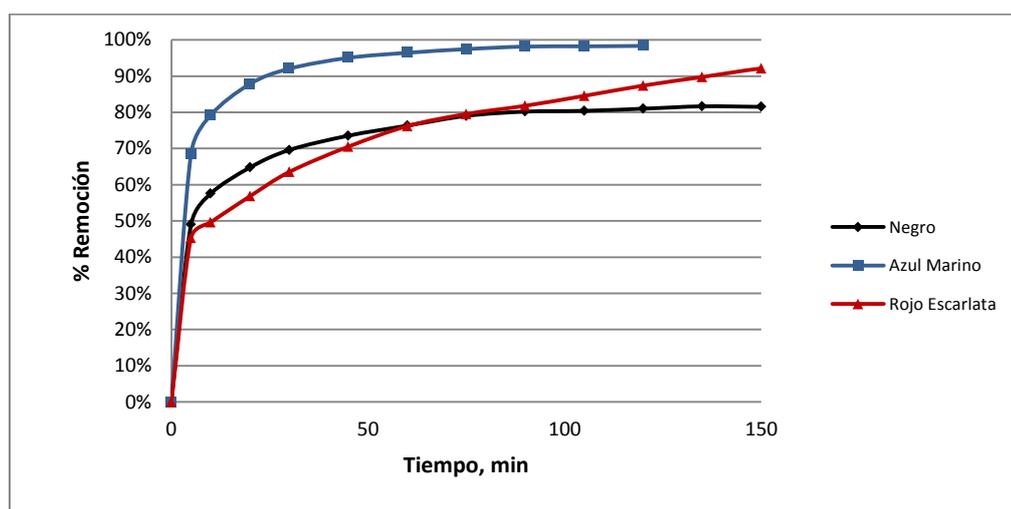


Figura 6 - Porcentaje de remoción vs tiempo transcurrido, soluciones de tinte.

##### b) Eficacia del proceso sin radiación UV

Para poder determinar la influencia de la radiación UV-A en el proceso de fotodegradación por foto-Fenton, se realizó una experiencia en la que se prescindió de la radiación solar. Se utilizó una solución de tinte Negro ( $0,15 \text{ g L}^{-1}$ ) en las condiciones óptimas determinadas. La curva de porcentaje de remoción resultante se presenta en la Figura 7.

En los primeros minutos, existe una rápida remoción de la concentración del contaminante incluso sin radiación, de la misma manera que en el caso de experiencias realizadas con radiación UV-A solar, aunque los valores son inferiores (menores al 40%, en comparación al 50%), debido a que la presencia de radiación UV-A induce a la mayor generación de radicales oxidrilo. En esta experiencia, se obtuvo un porcentaje de remoción de contaminante del 58,47% en dos horas y quince minutos, valor mucho menor al registrado con radiación UV-A solar (81,51%).

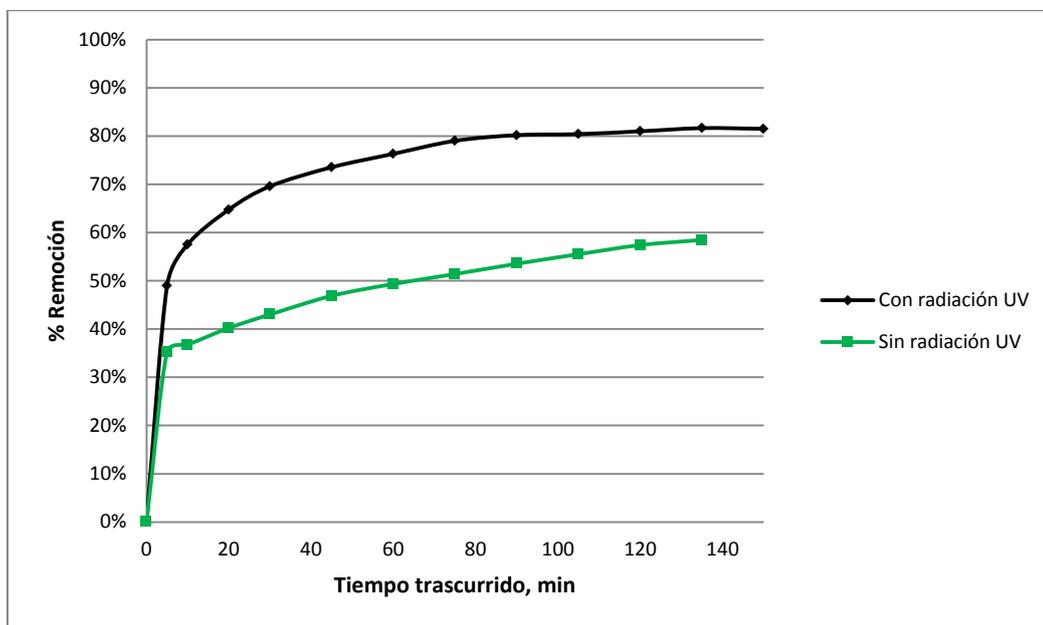


Figura - Degradación tinte Negro, con y sin radiación UV.

### c) Fotodegradación de los licores provenientes de la etapa de teñido

Se recolectaron los efluentes provenientes de la salida de la etapa de teñido. Estos residuos líquidos presentan una fuerte coloración mayormente oscura. Antes de proceder a tratar los efluentes, se reguló el pH hasta el valor óptimo, sin contar con otro proceso previo ya sea físico o químico. En esta experiencia, se mantuvieron las condiciones óptimas determinadas, registrando la disminución de la concentración del contaminante y la disminución de la DQO. En la Figura 8 se presenta la curva del porcentaje de remoción del contaminante en función del tiempo.

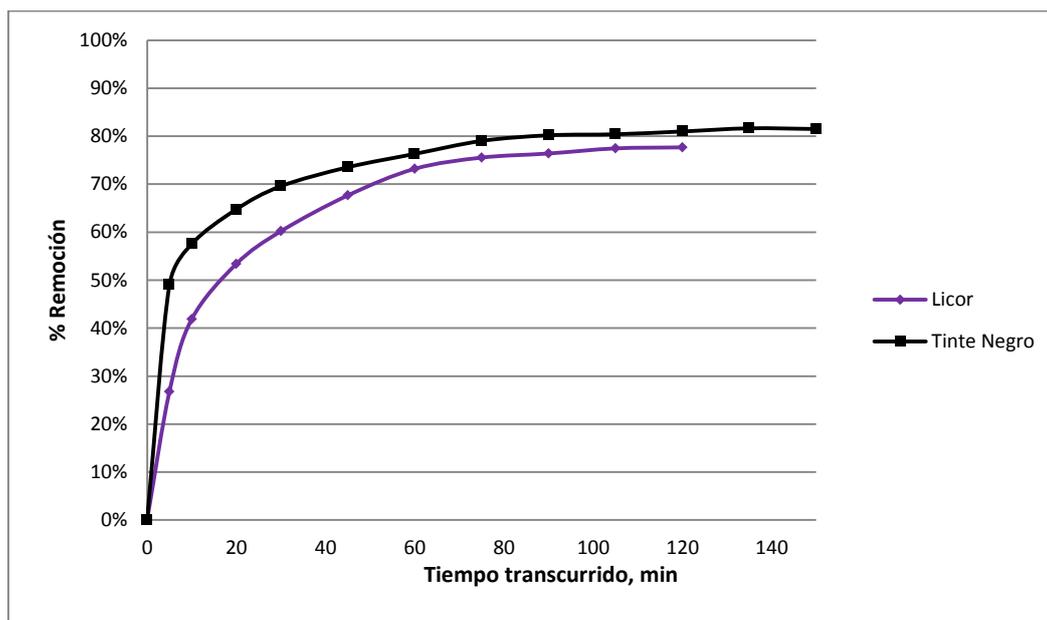
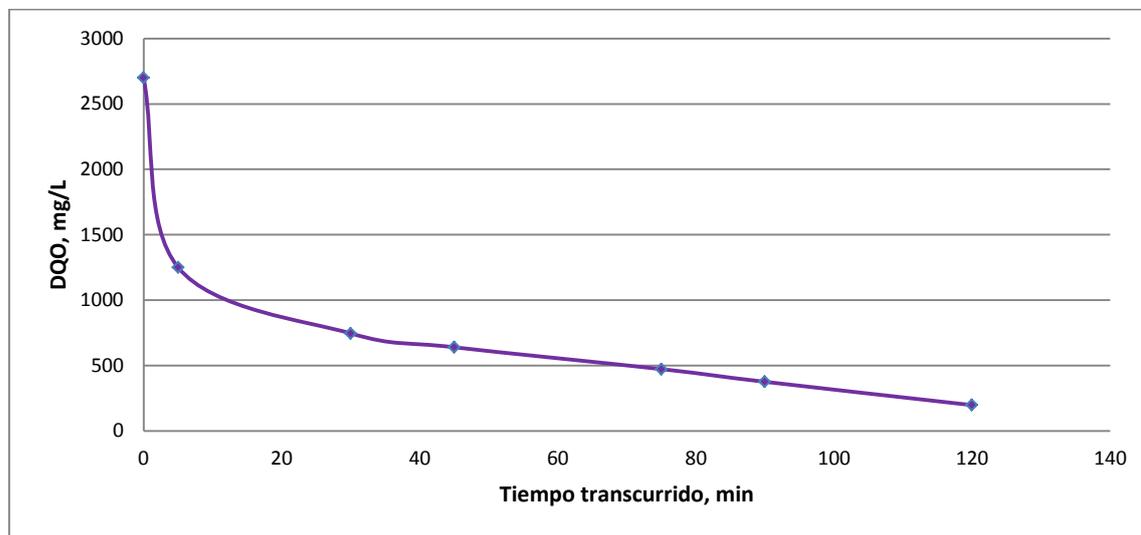


Figura 3- Fotodegradación del licor proveniente de la etapa de teñido.

Se puede observar la similitud en el comportamiento del proceso con la fotodegradación realizada para la solución de tinte Negro, aunque con un porcentaje de remoción menor pero en un intervalo de tiempo más corto. Se obtuvo un porcentaje de remoción del 77,68% en dos horas de tratamiento, valor menor al registrado para la solución de tinte Negro (81,51%). Este comportamiento se debe a que el tinte Negro es utilizado en la mayoría de los tipos de teñido en concentraciones altas respecto a los demás tipos de tinte.

Igualmente, se midió la disminución de la demanda química de oxígeno en función del tiempo, Figura 9.



**Figura 4-** Disminución de la DQO, licor proveniente de la etapa de teñido.

La disminución de DQO sigue el mismo comportamiento que la disminución de la concentración del contaminante, dando como resultado una disminución del 92,67% en dos horas de tratamiento. Con este proceso se logra reducir la DQO desde  $2700 \text{ mg L}^{-1}$  hasta  $198 \text{ mg L}^{-1}$  ingresando a los límites permitidos por el RASIM [1] (menor a  $250 \text{ mg L}^{-1}$ ).

#### d) Análisis de la Cinética del Proceso

En el estudio cinético del proceso de fotodegradación por foto-Fenton, se aproximó el conjunto de reacciones que suceden utilizando el modelo cinético de primer orden, como se describe en la ecuación (1),

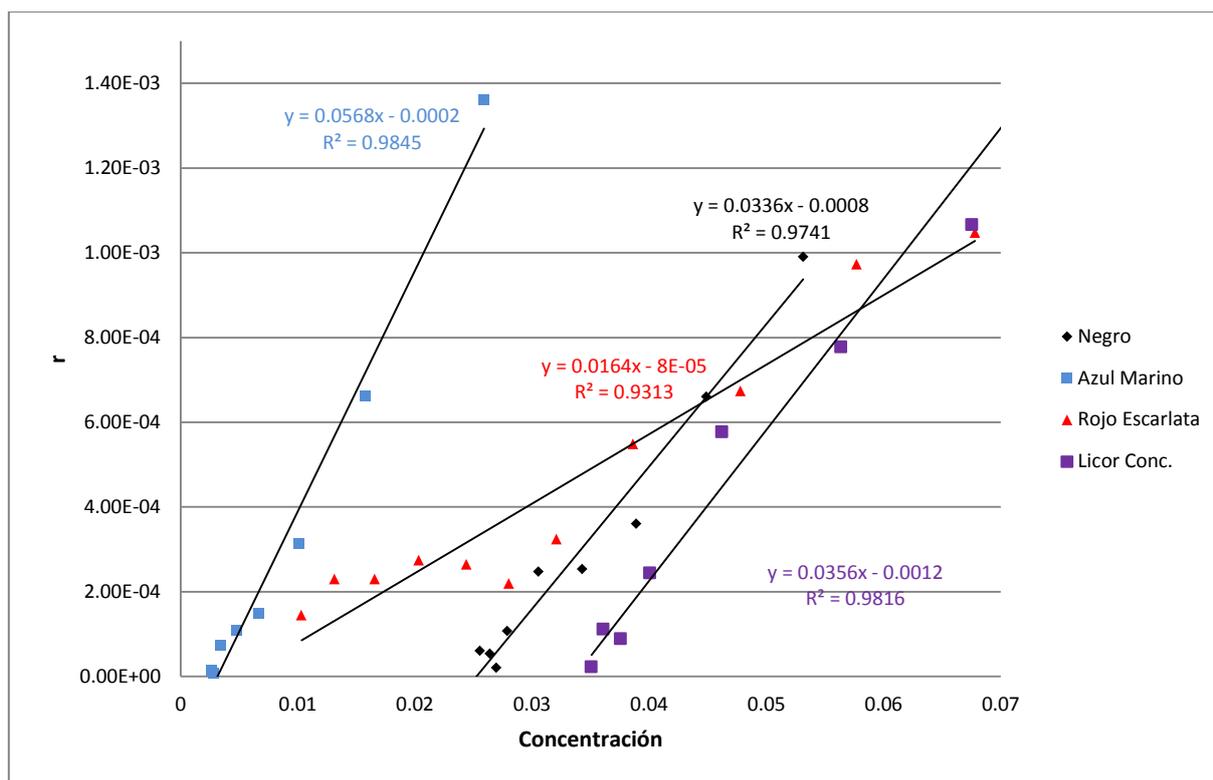
$$r = \frac{dC}{dt} = -k_{app}C \quad (1)$$

donde  $r$  es la velocidad de reacción, [ $\text{mgL}^{-1}\text{min}^{-1}$ ];  $t$  es el tiempo, [min];  $k_{app}$  es la constante cinética aparente de primer orden, [ $\text{min}^{-1}$ ] y  $C$  la concentración, [ $\text{mg L}^{-1}$ ].

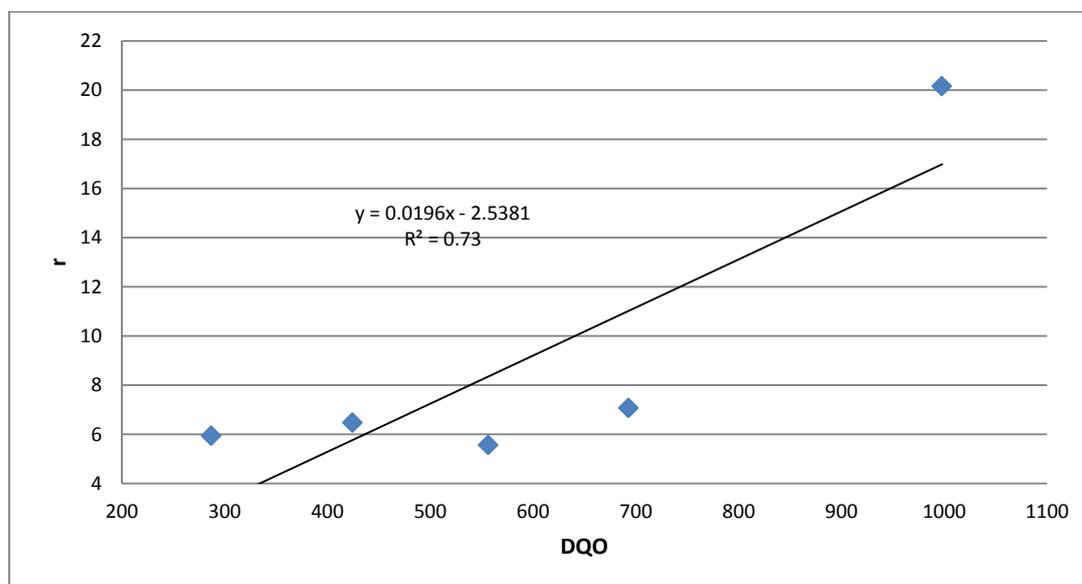
Además se definió el tiempo medio de proceso,  $t_{1/2}$ , como el tiempo en el que la concentración de contaminante se reduce a la mitad de la concentración inicial,  $C_0$  o la disminución del DQO llega a la mitad, relación (2).

$$t_{1/2} = -\frac{\ln \frac{C}{C_0}}{k_{app}} \quad (2)$$

Se construyó una gráfica de  $r$  vs *concentración* para las pruebas realizadas tanto con las soluciones de tinte como también para las de licores. En la Figura 10 se presenta el análisis cinético para las fotodegradaciones de las soluciones de tinte Negro, Azul Marino y Rojo Escarlata. Del análisis cinético, se obtiene la constante cinética aparente  $k_{app}$  y el tiempo medio de proceso  $t_{1/2}$ . Los valores resultantes son: Negro  $k_{app}$   $0,0336 \text{ min}^{-1}$  y  $t_{1/2}$  20,63 min, Azul Marino  $k_{app}$   $0,0568 \text{ min}^{-1}$  y  $t_{1/2}$  12,20 min y para el Rojo Escarlata  $k_{app}$   $0,0164 \text{ min}^{-1}$  y  $t_{1/2}$  42,27 min. De igual manera, se construyó las gráficas para la fotodegradación de los efluentes provenientes de la etapa de teñido, analizando además la disminución del DQO, Figuras 11.



**Figura 5** - Gráfica de  $r$  en función de la concentración, Tintes y Licor.



**Figura 6**- Gráfica de  $r$  en función del DQO, Licor.

La constante  $k_{app}$  resultante para la disminución de la concentración del tinte en la fotodegradación de los licores, es de  $0,0356 \text{ min}^{-1}$  y el  $t_{1/2}$  es de 19,47 min. Valores muy similares a los obtenidos para la fotodegradación de una solución de tinte Negro. Los resultados obtenidos para la disminución del DQO en el tratamiento de los licores, es  $k_{app} 0,0196 \text{ min}^{-1}$  y  $t_{1/2}$  35,4 min. La correlación en la cinética de pseudo-primer orden respecto a la disminución del DQO es baja, así, los datos sólo deben ser tomados como referenciales. Para contar con una mejor correlación y, por ende, con constantes cinéticas más sólidas, es necesario realizar un seguimiento a mayor profundidad sobre la disminución del DQO, tomando una mayor cantidad de puntos.

En el estudio realizado por Torrades *et al.* [11], se presenta valores de  $k_{app}$  igual a  $0,0829 \text{ min}^{-1}$  y  $t_{1/2}$  de 8,36 min según un modelo cinético de pseudo-primer orden, para procesos de fotodegradación de tintes mediante foto-Fenton midiendo la disminución del DQO. En el estudio de Torrades, se utilizaron soluciones preparadas de tinte con agua destilada además del uso de lámparas de UV (350 nm), obteniendo mejores resultados tanto en las constantes cinéticas aparentes como en los tiempos medio de proceso.

#### e) Adecuación de los efluentes tratados para el reciclaje

Después de haber realizado la fotodegradación de los licores, se obtuvo un residuo libre de color y con un DQO dentro de los límites permitidos, Figura 12.



**Figura 7-** Muestras del proceso de fotodegradación por foto-Fenton, Licor.

Esta agua presenta una fuerte concentración de hierro, resultado de la incorporación de  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  ( $37,3 \text{ mg L}^{-1}$ ). Para poder precipitar el hierro como  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  se procedió a agregar soda cáustica comercial ( $\text{NaOH}$ ) en una concentración de  $0,75 \text{ g L}^{-1}$ , valores determinado mediante la optimización en pruebas de jarra. Después de añadir  $\text{NaOH}$ , se procedió a esperar 15 min para la formación de flóculos, para después filtrar el líquido en un filtro simple de arena, ver Figura 13.



**Figura 8 -** Adecuación de los efluentes fotodegradados.

Las características del agua resultante de la adecuación son: pH 7,42 y concentración de hierro  $4,36 \text{ mg L}^{-1}$ . Además de estar libre de cualquier coloración ya sea producto de la presencia de tintes o de hierro.

#### f) Pruebas de teñido con agua reciclada

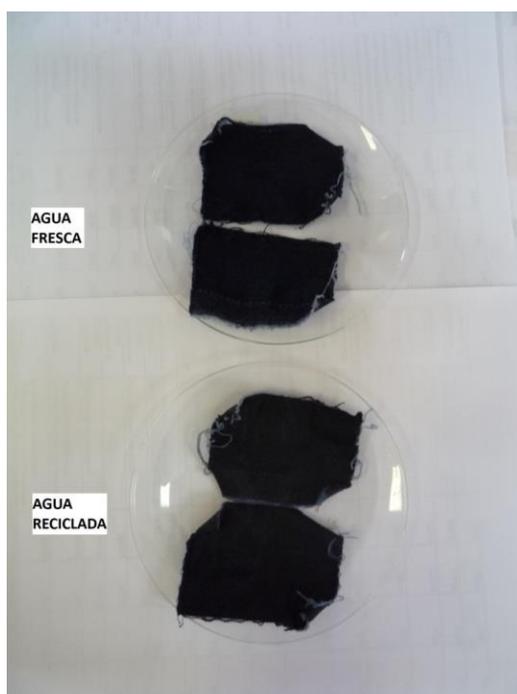
Una vez concluido el proceso de tratamiento y adecuación de los efluentes contaminados provenientes de la etapa de teñido, se procedió a simular esta etapa utilizando agua fresca y reciclada, con la finalidad de poder comparar su efecto en la calidad de los tejidos. Para estas pruebas, se utilizaron pedazos de tejido de jean previamente desgomado que

fueron puestos en contacto con los licores frescos y reciclados en un rotavapor que hace las veces de un fulón de teñido. Las condiciones en las que se llevó a cabo la prueba son las mismas que las utilizadas en la industria, Tabla 2.

**TABLA 2 - CONDICIONES PARA LA SIMULACION DE LA ETAPA DE TEÑIDO**

CARACTERÍSTICA	VALOR
Tinte Negro 0,94%	0,0300 g
Tinte Azul Marino 0,354%	0,0111 g
Tinte Amarillo Oro 0,03%	0,0008 g
Volumen Agua	100 ml
Temperatura	90 °C
Tiempo	40 min
Sal 0,03%	0,0008 g

El tipo de teñido que se utilizó es el “Azul Noche”, un tipo de teñido muy común y solicitado. Los tejidos tratados tanto con licor de agua fresca como con el licor de agua reciclada, se presentan en la Figura 14. Se puede observar que no existe diferencia en la tonalidad y homogeneidad del color y tampoco en la textura.



**Figura 9-** Adecuación de los efluentes fotodegradados.

## 5. CONCLUSIONES

- Las concentraciones óptimas para fotodegradar los efluentes provenientes de la etapa de teñido, son de  $35 \text{ mg L}^{-1}$  para el  $\text{Fe}^{2+}$  y de  $1400 \text{ mg L}^{-1}$  para el  $\text{H}_2\text{O}_2$ . El pH es crítico para el proceso foto-Fenton, siendo indispensable trabajar en pH entre 2,30 a 2,40.
- Alrededor del 50% de la remoción de los contaminantes sucede en los 10 primeros minutos del proceso, pero se necesita de un tiempo de tratamiento entre 2 a 3 horas para poder llegar a porcentajes altos de remoción. Este tiempo depende directamente de la intensidad de radiación UV-A, siendo mejor trabajar con intensidades entre 40 a  $70 \text{ Wm}^2$  (medio día).

- (c) Las constantes cinéticas aparentes y tiempos medio de proceso para las fotodegradaciones de las soluciones de tinte son: Negro  $k_{app}$   $0,0336 \text{ min}^{-1}$  y  $t_{1/2}$  20,63 min, Azul Marino  $k_{app}$   $0,0568 \text{ min}^{-1}$  y  $t_{1/2}$  12,20 min y para el Rojo Escarlata  $k_{app}$   $0,0164 \text{ min}^{-1}$  y  $t_{1/2}$  42,27 min. Mientras que para la fotodegradación del licor se obtuvo: disminución de la concentración de tinte  $k_{app}$   $0,0356 \text{ min}^{-1}$  y el  $t_{1/2}$  es de 19,47 min y para la disminución del DQO  $k_{app}$   $0,0196 \text{ min}^{-1}$  y  $t_{1/2}$  35,4 min.
- (d) La concentración óptima de NaOH para remover el hierro residual en los efluentes tratados, es de  $0,75 \text{ g L}^{-1}$ , obteniendo agua con una concentración final de hierro de  $4,36 \text{ mg L}^{-1}$  y pH de 7,42. Esta agua resulta apropiada para poder ser reutilizada en la etapa de teñido sin afectar la calidad de las prendas.
- (e) Con los antecedentes anteriores, se puede concluir que el sistema de reciclaje de aguas residuales coloreadas procedentes de la etapa de teñido, es viable técnicamente. El proceso global involucra la fotodegradación de la materia orgánica mediante el fotoreactor cilindro-parabólico que concentra la radiación solar UV-A y la remoción del hierro remanente por precipitación y filtración.

## 6. AGRADECIMIENTOS

El presente estudio fue realizado dentro de la línea de investigación de desarrollo de procesos de foto-oxidación solar que es ejecutada conjuntamente por el Centro de Investigaciones en Procesos Industriales (CIPI) y el Centro de Investigaciones Ópticas (CIO) de la Universidad Privada Boliviana.

Los autores agradecen al Dr. Omar Ormachea, Director del CIO, por sus valiosos consejos en la construcción del fotoreactor, en la ejecución de las pruebas experimentales y en la discusión de los resultados. Por otra parte, se desea agradecer la colaboración económica recibida del Centro de Promoción de Tecnologías Sostenibles - CPTS, a través de su Programa de Becas, que permitió afrontar los gastos de investigación.

## 7. REFERENCIAS

- [1] RASIM, *Reglamento Ambiental para el Sector Industrial Manufacturero*, Decreto Supremo N° 26736
- [2] Salas Colotta G., *Tratamiento Físico-Químico de Aguas Residuales de la Industria Textil*, Facultad de Química e Ingeniería Química, Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
- [3] M. C. Gutiérrez y M. Crespi. *Reciclado de Aguas Residuales Textiles Decoloradas con Técnicas Electroquímicas*, Boletín Intexter (U.P.C.) 2001 N° 120.
- [4] Empresa Andaluza Gedar, *Gestión de Aguas y Residuos - Opciones de Tratamiento de Aguas Residuales Mediante Carbón Activo*. Boletín N° 40802.
- [5] L. F. Garcés y M. L. Hernández. "Comparación de los tratamientos con  $\text{TiO}_2$  y  $\text{FeCl}_3$  para aguas residuales coloreadas textiles." *Revista Lasallista de Investigación*, Julio-Diciembre año/vol 3. Número 002. Antioquia, Colombia. pp. 25-33 ISSN (Versión Impresa): 1794-4449.
- [6] P. K. Sanjay and G. P. Vishwas. *Development of Photocatalysis Reactor for Degradation of Organic Compounds Using Solar Radiation and Artificial UV Radiation*, Environmental Material Unit, National Environmental Engineering Research Institute (NEERI), Nehru Marg-400 020, India.
- [7] Texto colectivo elaborado por la Red CYTED VIII-G, *Eliminación de contaminantes por Fotocatálisis Heterogénea*, Impreso en La Plata, Argentina por Grafica 12 y 50 ISBN: 987-43-3809-1, 2001.
- [8] C. J. Pey. "Aplicación de procesos de oxidación avanzada (fotocatálisis solar) para tratamiento y reutilización de efluentes textiles." Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Ingeniería Textil y Papelera (DITEXPA).
- [9] A. J. Julson. "Photocatalytic Decolorization of Organic Dyes in Titanium Dioxide-Air System." North Carolina State University, Department of Chemical and Biomolecular Engineering, Enero 2005
- [10] R. Escalera y O. A. Ormachea. *Remoción de Arsénico (V) Asistida por Oxidación UV Solar en un Foto-Reactor Tubular de Sección Circular*, Investigación & Desarrollo #9, pg. 58, 2009.
- [11] American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 20<sup>th</sup> Edition*, Washington, EEUU, 1998.

- [12] F. Torrades et al. "Fenton an photo-Fenton oxidation of model mixture of dyes-overall kinetic analysis." Department d'Enginyeria Química, ETSEIA de Terrasa, Universitat Politècnica de Catalunya, 1 de Octubre de 2008.