

## TRATAMIENTO DE AGUAS DEL LAVADO DE IMPRESORAS DE LA INDUSTRIA PAPELERA MEDIANTE PROCESO FENTON

José A. Ríos <sup>\*†</sup>, Oscar F. Arcos J. <sup>\*</sup>, Guillermo A. Aristizábal M. <sup>\*</sup>

*\*Universidad Pontificia Bolivariana, Grupo de Investigaciones Ambientales.  
Cir. 1 #70-01, Medellín, Colombia.*

Recibido 8 Abril 2011; aceptado 10 Junio 2011  
Disponible en línea: 27 Junio 2011

**Resumen:** En el presente artículo se evaluó el desempeño del proceso de oxidación química Fenton, para el tratamiento de aguas residuales provenientes del lavado de impresoras en la industria papelera. Los parámetros controlados durante el desarrollo de este estudio fueron las dosis de reactivos, velocidad y tiempo de agitación, tiempo de reacción y pH. La efectividad del método se determinó a partir de las remociones de color y Demanda Química de Oxígeno (DQO), alcanzando un 99.36% y un 61.75% respectivamente. El agente oxidante utilizado fue Peróxido de Hidrógeno y el catalizador Sulfato Ferroso Heptahidratado. *Copyright © 2011 UPB.*

**Palabras clave:** Chemical oxidation, Fenton, Printing, Wastewater, Paper Industry, COD.

**Abstract:** In this paper was evaluated the performance of the Fenton chemical oxidation process for treatment of wastewater from washing of printers in the paper industry. The parameters taken into account during the development of this study were the doses of reagents, time and stirring speed, reaction time and pH. The effectiveness of the method was determined from the removal of color and Chemical Oxygen Demand (COD), reaching 99.36% and 61.75% respectively. The oxidizing agent used was Hydrogen Peroxide and catalyst Heptahydrate Ferrous Sulfate.

**Keywords:** Chemical oxidation, Fenton, Printing, Wastewater, Paper Industry, COD.

### 1. INTRODUCCIÓN

La industria papelera es uno de los sectores que mayor cantidad de agua consume, alrededor de 40000 galones por tonelada de papel producida en Estados Unidos ([Pokhrel y Viraraghavan, 2004](#)) y posee la mayor cantidad de contaminantes en sus efluentes ([Helmy et al., 2003](#)), destacándose los constituyentes orgánicos, los microcontaminantes tóxicos como sustancias fenólicas y

organocloradas, sulfatos, tierras arcillosas y compuestos coloreados.

La industria papelera produjo en promedio 5.5 millones de toneladas de papel por año en 1990 ([Thompson et al., 2001](#)), generando alrededor de 60 m<sup>3</sup> de aguas residuales por tonelada de papel producida ([Savant et al., 2006](#)) y aproximadamente 200 m<sup>3</sup> de dichas aguas por tonelada de pulpa producida ([Thompson et al., 2001](#)). Los contaminantes de estas aguas

---

<sup>†</sup> Autor al que se le dirige la correspondencia:  
Tel. (+574) 4488388 ext 14029  
E-mail: jose.rios@upb.edu.co (José A. Ríos).

proviene principalmente de las etapas de pulpeo, blanqueo e impresión, así como de los procesos de reciclaje y reutilización de la pulpa y el papel ([Karrasch et al., 2006](#)). Por otra parte, los colorantes y demás sustancias químicas utilizadas en la elaboración de papel generan residuos que podrían tener efectos cancerígenos y mutagénicos ([Savant et al., 2006](#); [Karrasch et al., 2006](#)), además de compuestos lipofílicos que se acumulan en las membranas celulares de los microorganismos, causando su muerte y el consiguiente desequilibrio en los ecosistemas.

Estudios previos ([Thompson et al., 2001](#)) han demostrado que en los cuerpos de agua que reciben efluentes de industrias papeleras se presenta un incremento en la demanda química y biológica de oxígeno, alcanzando valores de 3000 mg/L y en algunos casos mortalidad de peces y microorganismos ([Kovacs et al., 2002](#)).

Las aguas residuales de la industria papelera se caracterizan por su intenso color, particularmente las provenientes de la impresión ([Savant et al., 2006](#)). Dicho color se debe principalmente a los colorantes orgánicos sintéticos utilizados en la elaboración de diversos tipos de papel y cartón ([Martínez y Brillas, 2009](#)).

Los compuestos coloreados que son descargados en cuerpos de agua disminuyen su capacidad de reoxigenación y bloquean el paso de la luz solar, impidiendo que las plantas realicen la fotosíntesis y afectando la actividad biológica de los organismos presentes ([Eyvaz et al., 2009](#); [Pearcea et al., 2003](#)).

Por otra parte, el color presente en los efluentes de las industrias papeleras impide su recirculación y reutilización ([Tarlan et al., 2002](#)) en otras partes del proceso de elaboración de papel, inclusive después de haberle removido los otros contaminantes presentes. Esto induce a que las empresas consuman cantidades considerables de agua y a que descarguen sus efluentes coloreados en ríos y quebradas, provocando el detrimento de éstos.

Para disminuir el impacto ambiental causado por los efluentes industriales y en particular por aquellos que contienen colorantes y contaminantes orgánicos como los de la industria papelera, se han desarrollado diferentes estrategias de solución ([Zabala y Rodríguez, 2005](#); [Susial et al., 2005](#)), entre las cuales cabe mencionar la búsqueda de materias primas

alternativas, así como la caracterización y el pretratamiento de las mismas. Igualmente, se han desarrollado diversos métodos de remoción de color ([Helmy et al., 2003](#); [Tarlan et al., 2002](#)), para tratar el agua y permitir su reutilización y en otros casos su disposición final en cuerpos de agua con el mínimo impacto al medioambiente.

Entre los métodos tradicionales para la remoción de color en aguas residuales se encuentran los tratamientos biológicos ([Helmy et al., 2006](#); [Tarlan et al., 2002](#); [Gurбуza et al., 2009](#); [Goncalves et al., 2009](#)), los cuales se basan en la capacidad que poseen ciertos microorganismos de degradar la materia orgánica, sin embargo no han mostrado ser eficientes ([Kang et al., 2000](#); [Gözmen et al., 2009](#); [Arslan et al., 2008](#)), desempeñándose mejor en la disminución de la DQO que en la eliminación de color, debido a la naturaleza de los colorantes, los cuales en ocasiones son resistentes a la biodegradación ([Helmy et al., 2006](#); [Lina et al., 2004](#); [Zhou et al., 2008](#)).

Existen además otros métodos de remoción de color basados en las propiedades físicas y electroquímicas de los colorantes, entre éstos se encuentran la coagulación y electrocoagulación ([Kalyania et al., 2009](#); [Gad-Allah et al., 2009](#)), los procesos de fotocatalisis ([Doan et al., 2009](#); [Sadik, 2007](#); [Xu et al., 2009](#)), la adsorción en materiales como carbón activado ([Walker y Weatherley, 2001](#); [Chatterjee et al., 2009](#); [Karima et al., 2009](#)), la radiación con microondas (Yang et al., 2009) y la decoloración de efluentes sobre lechos empacados ([Rodríguez et al., 2006](#)). Los principales inconvenientes que presentan estos métodos son, en unos casos, su elevado costo y en otras ocasiones, su baja eficiencia.

De esta forma, se ha vuelto conveniente la utilización de métodos de oxidación ([Kang et al., 2000](#); [Gözmen et al., 2009](#); [Arslan et al., 2008](#); [Sadik, 2007](#); [Hammami et al., 2007](#)) para la remoción de color y disminución de la DQO de aguas residuales. En el caso particular de la industria papelera, dada la naturaleza y la estructura química de los colorantes, la oxidación química ha demostrado tener una alta eficiencia a costos razonables ([Medialdea et al., 2005](#)), destacándose la tecnología Fenton.

Basado en lo anterior, en este proyecto se empleó la tecnología Fenton para el tratamiento de aguas residuales provenientes del proceso de impresión

en una empresa papelera, removiendo el color y la carga orgánica expresada en términos de DQO, con un consumo moderado de reactivos.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1 Toma de muestras

El agua residual proveniente del lavado de impresoras fue facilitada por una empresa papelera localizada en Antioquia, Colombia. De acuerdo con información de la compañía, los principales componentes de las aguas tintas son colorantes de carácter orgánico.

El agua problema presentaba un pH neutro, una tonalidad violeta oscura y presencia de sólidos suspendidos. Su alcalinidad total fue de 680.39 mg CaCO<sub>3</sub>/L, siendo los sólidos totales de 2420 mg ST/L, y la DQO de 3738.7 mgO<sub>2</sub>/L. (Parámetros medidos en el laboratorio del Grupo de Investigaciones Ambientales, GIA, de la Universidad Pontificia Bolivariana).

Para el desarrollo de la experimentación se realizó un muestreo por un período de tres días no consecutivos, recogiendo una cantidad de 10 litros por día. Antes de realizar cada muestreo el tanque de almacenamiento era homogenizado durante 10 minutos con el fin de asegurar que las propiedades del agua sean las mismas en cada punto.

### 2.2 Método de cuantificación de color

Debido a que actualmente los métodos de cuantificación de color de aguas se limitan a determinar dicha propiedad en aguas con tonalidades amarillas y ocres, se adaptó un estudio realizado por investigadores de la Universidad del Norte de Bangkok, Tailandia ([Chantaraporn et al., 2010](#)); quienes propusieron una metodología para determinar el color en aguas residuales con tonalidades oscuras de la industria textil.

Basándose en esta investigación, se construyó una curva de verificación que permite cuantificar la remoción de color en las aguas tintas provenientes del proceso de impresión en la industria papelera.

Para construir la curva de verificación se realizaron diluciones de la muestra inicial de agua

residual a la longitud de onda propuesta en el artículo de Chantaraporn et al. que corresponde a 545 nm. En la [Tabla 1](#), se muestran los datos de dilución y en la [Figura 1](#) se puede observar la curva obtenida:

Tabla 1. Datos para la construcción de la curva de verificación

Dilución (%)	Muestra	Abs 545 (nm)
100	1	1.077
50	2	0.55
40	3	0.417
30	4	0.296
20	5	0.194
10	6	0.097
9	7	0.087
7	8	0.052
5	9	0.048

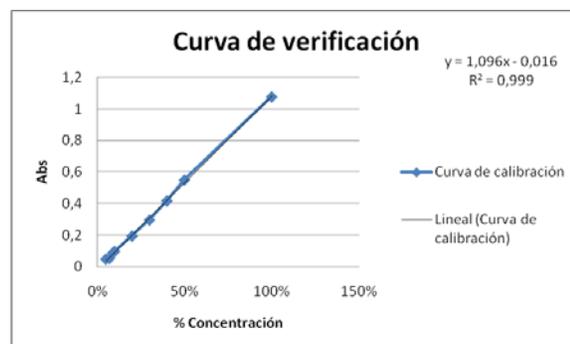


Fig. 1. Curva de verificación a 545nm para las aguas coloreadas

Los resultados obtenidos al realizar la curva de verificación ([Figura 1](#)) muestran una dependencia lineal de la absorbancia con la concentración de las aguas tintas, elemento importante para tomar la decisión de cuantificar la remoción de color.

### 2.3 Proceso Fenton

El proceso Fenton fue realizado en el laboratorio de la empresa papelera. Los parámetros de operación fueron: dosis de Peróxido de Hidrógeno al 30% v/v (oxidante) y dosis de Sulfato Ferroso Heptahidratado (catalizador).

Se realizó un diseño de experimentos (5 dosis de catalizador x 5 dosis de oxidante) y los demás parámetros se fijaron con base en estudios anteriores ([Xiang y Xia, 2009](#)) y ensayos preliminares: pH 2, 10 minutos de agitación a 100 rpm y un tiempo total de reacción de 2 horas. Al agua tratada se le analizaron dos propiedades:

DQO y color, las cuales fueron las variables de respuesta.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las dosis de catalizador y oxidante utilizadas durante la experimentación fueron determinadas mediante ensayos previos.

Inicialmente, el agua presentó una absorbancia a 545 nm de 2.95, después de un proceso de dilución de 1/10 y una DQO de 1214.22 mgO<sub>2</sub>/L.

#### 3.1. Remoción de color

La [Figura 2](#) muestra la apariencia inicial del agua a tratar generada en el proceso de lavado de impresoras en la empresa papelera.



Fig. 2. Muestra de agua residual sin tratar

El diseño de experimentos mostró que las mayores remociones de color se alcanzaron con dosis cercanas a 1000 ppm de catalizador y dosis bajas de oxidante (entre 0.5 y 2.5 mL), por lo tanto, se planificó el ensayo con la intención de abarcar las diferentes dosis de reactivos que entregaron los mejores resultados en los ensayos anteriores.

En las [Tablas 2](#) a la [6](#) se presentan los resultados de color y DQO obtenidos después de realizar el tratamiento Fenton:

Tabla 2. Resultados proceso Fenton con 500 ppm de Sulfato Ferroso

H2O2 (mL)	DQO (mgO <sub>2</sub> /L)	ABS (545nm) Color
0.5	781.14	0.018
1	772.39	0.027
1.5	754.89	0.013
2	768.01	0.036
2.5	763.64	0.009

Tabla 3. Resultados proceso Fenton con 1000 ppm de Sulfato Ferroso

H2O2 (mL)	DQO (mgO <sub>2</sub> /L)	ABS (545nm) Color
0.5	658.65	0.031
1	636.78	0.051
1.5	461.79	0.023
2	363.36	0.019
2.5	321.80	0.023

Tabla 4. Resultados proceso Fenton con 1500 ppm de Sulfato Ferroso

H2O2 (mL)	DQO (mgO <sub>2</sub> /L)	ABS (545nm) Color
0.5	667.40	0.064
1	516.47	0.053
1.5	356.80	0.038
2	315.24	0.031
2.5	297.74	0.014

Tabla 5. Resultados proceso Fenton con 2000 ppm de Sulfato Ferroso

H2O2 (mL)	DQO (mgO <sub>2</sub> /L)	ABS (545nm) Color
0.5	573.34	0.11
1	450.86	0.045
1.5	315.24	0.043
2	267.12	0.037
2.5	229.94	0.039

Tabla 6. Resultados proceso Fenton con 2500 ppm de Sulfato Ferroso

H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (mL)	DQO (mgO <sub>2</sub> /L)	ABS (545nm) Color
0.5	608.34	0.105
1	404.92	0.08
1.5	372.11	0.044
2	278.06	0.057
2.5	221.19	0.038

Desde el punto de vista cualitativo los mejores resultados en cuanto a color se presentaron con una dosis de catalizador de hierro de 500 ppm, obteniéndose un agua transparente y libre de sólidos suspendidos para las 5 dosis de oxidante.

A medida que se aumentaba la dosis de catalizador, el agua tratada adquiría una tonalidad amarilla como consecuencia de la presencia de hierro en exceso; sin embargo, en todos los casos el agua resultante era transparente. Por otra parte, para dosis superiores a 2000 ppm de catalizador, hubo presencia de sólidos suspendidos en las aguas.

A continuación en las [Figuras 3](#) a la [7](#) se pueden observar las muestras tratadas y apreciar la diferencia en la tonalidad del agua a medida que la dosis de oxidante aumenta.



Fig. 3. Muestras después del tratamiento Fenton con 500 ppm de catalizador

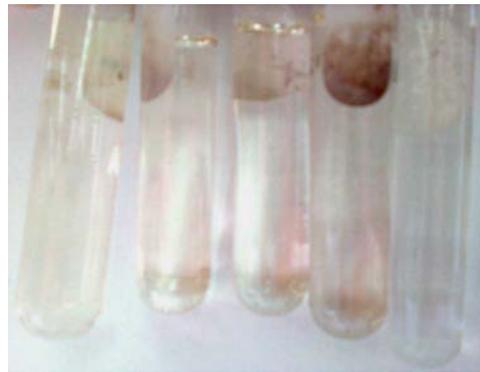


Fig. 4. Muestras después del tratamiento Fenton con 1000 ppm de catalizador

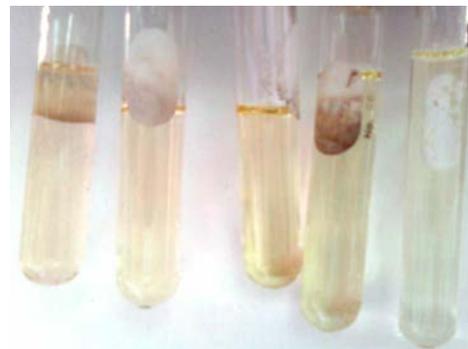


Fig. 5. Muestras después del tratamiento Fenton con 1500 ppm de catalizador



Fig. 6. Muestras después del tratamiento Fenton con 2000 ppm de catalizador

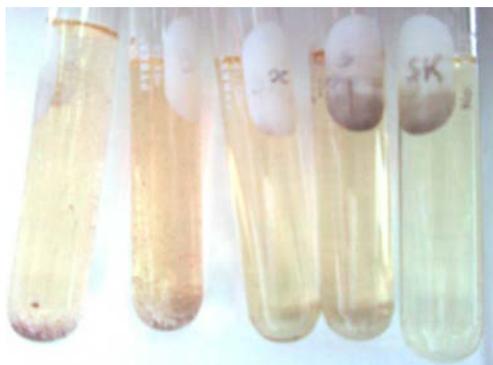


Fig. 7. Muestras después del tratamiento Fenton con 2500 ppm de catalizador

Cuantitativamente, se observa una disminución en el valor de la absorbancia a 545 nm (color) de aproximadamente 330 veces el valor inicial, partiendo de una absorbancia inicial de 2.95 hasta un mínimo de 0.009, siendo éste el mejor resultado de este ensayo, obtenido a una concentración de 500 ppm de catalizador y 2.5 mL de oxidante. Además, se observa que no hay una variación considerable en la remoción de color, a medida que se agrega oxidante, debido a que con la primera dosis adicionada se alcanza un valor de remoción lo suficientemente alto.

En la [Figura 8](#) se observa que con las dosis bajas de catalizador (sal de hierro) se obtienen mayores valores de remoción, es decir menor intensidad de color.

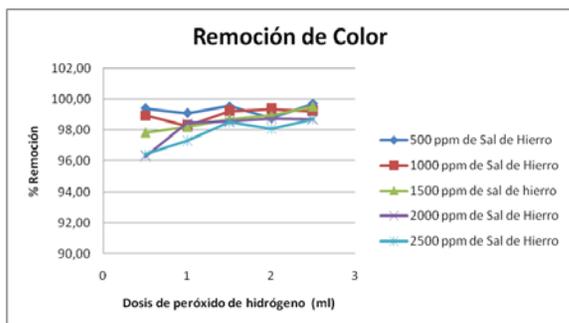


Fig. 8. Porcentaje de remoción de color para el proceso Fenton

Como se aprecia en la figura anterior la remoción de color se encuentra por encima del 96%, alcanzando un valor máximo de 99.69% para una dosis de 500 ppm de catalizador y 2.5 mL de oxidante. Sin embargo, para la misma dosis de catalizador y 0.5 mL de oxidante se logra una remoción de 99.39%, concluyendo que no es necesario un incremento de cinco veces la dosis de oxidante para un aumento aproximado de 0.3 puntos porcentuales.

### 3.2. Remoción de DQO

Los resultados de DQO presentados en las [Tablas 2 a la 6](#) muestran que para una concentración de 2500 ppm de catalizador se obtiene una disminución de aproximadamente 2 veces respecto al valor inicial y se presenta variación de este resultado con la adición de oxidante hasta una disminución de 5.5 veces la DQO inicial. Lo obtenido para la DQO difiere de lo ocurrido con el color, puesto que se consiguieron disminuciones mayores, con dosis más altas de catalizador y oxidante.

A continuación en la [Figura 9](#) se presenta los resultados de remoción de DQO para las diferentes concentraciones de catalizador y oxidante.

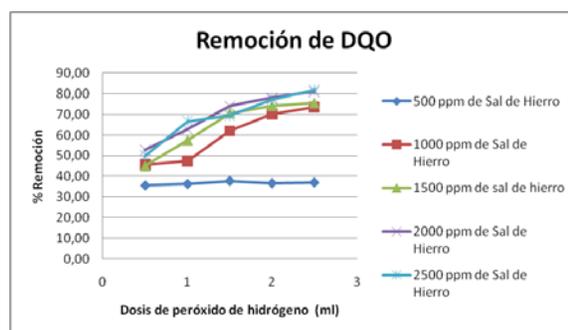


Fig. 9. Porcentaje de remoción de DQO para el proceso Fenton

Como se aprecia en la figura anterior, la remoción de DQO a 500 ppm de catalizador se encuentra alrededor del 35%, siendo prácticamente constante para todas las dosis de oxidante; además es significativamente inferior a las demás dosis de sal de hierro.

Se observa también que a partir de 1000 ppm de catalizador la remoción de DQO supera los 45 puntos porcentuales y se incrementa a medida que las dosis de oxidante y catalizador aumentan, alcanzando un máximo de 81.78% para la muestra tratada con 2500 ppm de sal de hierro y 2.5 mL de Peróxido de Hidrógeno al 30% v/v.

### 3.3. Punto óptimo de operación

Con el fin de determinar el punto óptimo de operación se evaluaron los resultados obtenidos de las remociones de color y DQO.

Al evaluar los resultados de color se tuvo en cuenta el aspecto cualitativo (apariencia), el cual

fue verificado desde el punto de vista cuantitativo (absorbancia a 545 nm).

Como se observa en los datos presentados anteriormente, los mejores resultados para los dos parámetros evaluados (remoción de color y DQO) se alcanzaron a diferentes dosis de catalizador y oxidante, por esta razón fue necesario determinar un punto de equilibrio en el cual las remociones de color y DQO fueron altas con dosis de reactivos moderadas.

Los resultados obtenidos muestran que para cualquier dosis de catalizador y de oxidante, se obtienen remociones de color superiores al 96%, por lo tanto la dosis óptima para este parámetro sería la menor, en este caso 500 ppm de catalizador y 0.5 ml de oxidante, puesto que se obtiene una remoción alta con un menor consumo de reactivos, es decir, un menor costo de operación.

En el caso de la DQO, los resultados fueron diferentes dependiendo de las dosis de oxidante y de catalizador; siendo la muestra tratada con 500 ppm de sal de hierro la que menores remociones presentó, por lo tanto, no fue tenida en cuenta y se analizó el comportamiento de la dosis siguiente, es decir, 1000 ppm.

Para la muestra tratada con 1000 ppm de catalizador se obtienen remociones de DQO superiores al 45%, las cuales se incrementan al aumentar la dosis de oxidante, alcanzando un máximo de 73.5% con 2.5 ml de peróxido.

Teniendo en cuenta que con 1000 ppm de catalizador se obtuvo remociones de color superiores al 98% y remociones de DQO cercanas al valor máximo obtenido (82%), se determinó que la dosis de catalizador óptima es 1000 ppm. Se descartan además las dosis superiores de sal de hierro, debido a la coloración amarilla que generan en las aguas al final del tratamiento ([Ver Figuras 3 a la 7](#)).

En cuanto a la dosis de oxidante, se encontró que con 2 ml se alcanzan remociones de color de 99% y remociones de DQO de 70%, satisfaciendo la necesidad de remociones altas, con un consumo moderado de reactivos.

En ese orden de ideas, se establece como punto óptimo de operación una dosis de sal de hierro (catalizador) de 1000 ppm y una dosis de Peróxido de Hidrógeno 30% v/v (oxidante) de 2

ml. La [Figura 10](#) presenta una comparación de la muestra tratada con los parámetros óptimos y el agua problema.



Fig. 10. Comparación de las muestras problema y tratada con parámetros óptimos.

#### 4. CONCLUSIONES

Con este trabajo se ha buscado adaptar e implementar un método de oxidación química (Fenton) al tratamiento de efluentes provenientes del lavado de impresoras en la industria papelera.

En general, al implementar el método Fenton las dosis bajas de catalizador favorecieron los resultados de remoción de color; siendo 1000 ppm la cantidad límite, puesto que con dosis superiores a ésta, se presenta una acumulación de hierro, causando una coloración amarilla en el agua tratada.

Al evaluar el parámetro de remoción de color para el método Fenton, se encontró que con las mínimas dosis de peróxido se alcanzaban las mayores remociones de color, mostrando una independencia de la efectividad del método con el aumento en la dosis de oxidante. Caso contrario ocurre con la remoción de DQO, la cual se ve favorecida al incrementar la cantidad de peróxido.

El método Fenton demostró ser efectivo en el tratamiento de aguas residuales del proceso de impresión en la industria papelera, alcanzando remociones de color superiores al 99% y de DQO superiores al 70%.

Cualitativamente, las aguas tratadas con el método Fenton presentan una apariencia incolora, inodora, sin sólidos suspendidos y que cumplen las exigencias de la empresa para su reutilización,

como ausencia de color, baja carga orgánica y sin presencia de sólidos.

El tratamiento de este tipo de aguas mediante el método Fenton resultó ser efectivo con una dosis de oxidante (peróxido de hidrógeno) de 1% del volumen total del agua a tratar y 1 g/L de catalizador (sulfato de hierro heptahidratado), es decir, que dosis bajas de reactivos consiguen remociones altas de color y DQO, cumpliendo con el objetivo de este trabajo.

## REFERENCIAS

- Arslan, I., B. Gursoy y J. Schmidt (2008). Advanced oxidation of acid and reactive dyes: Effect of Fenton treatment on aerobic, anoxic and anaerobic processes. *Dyes and Pigments*. **78**:117-130.
- Chantaraporn, A.B., et al. (2010). Electrocoagulation of blue reactive, red disperse and mixed dyes, and application in treating textile. *Journal of environmental management*. **91**:918-926.
- Chatterjee, S., et al. (2009). Congo red adsorption from aqueous solutions by using chitosan hydrogel beads impregnated with nonionic or anionic surfactant. *Bioresource Technology*. **100**:3862-3868.
- Doan, H., A. Weli y J. Wu (2009). A combined photocatalytic and electrochemical treatment of wastewater containing propylene glycol methyl ether and metal ions. *Chemical Engineering Journal*. **151**:51-58.
- Eyvaz, M., et al. (2009). The effects of alternating current electrocoagulation on dye removal from aqueous Solutions. *Chemical Engineering Journal*. 1-7.
- Gad-Allah, T., et al. (2009). Treatment of synthetic dyes wastewater utilizing a magnetically separable photocatalyst (TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub>/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>): Parametric and kinetic studies. *Desalination*. **244**:1-11.
- Goncalves, C., et al. (2009). Biological treatment of olive mill wastewater by non-conventional yeasts. *Bioresource Technology*. **100**:3759-3763.
- Gözmen, B., et al. (2009). Oxidative degradations of reactive blue 4 dye by different advanced oxidation methods. *Journal of Hazardous Materials*. **168**:129-136.
- Gurбуza, F., H. Ciftci y A. AKCIL (2009). Biodegradation of cyanide containing effluents by *Scenedesmus obliquus*. *Journal of Hazardous Materials*. **162**:74-79.
- Hammami, S., et al. (2007). Oxidative degradation of direct orange 61 by electro-Fenton process using a carbon felt electrode: Application of the experimental design methodology. *Journal of electroanalytical Chemistry*. **610**:75-84.
- Helmy, S., S. Rafie y M. Ghaly (2003). Bioremediation post-photo-oxidation and coagulation for black liquor effluent treatment. *Desalination*. **158**:331-339.
- Kalyania, K., N. Balasubramaniana y C. Srinivasakannan (2009). Decolorization and COD reduction of paper industrial effluent using electro-coagulation. *Chemical Engineering Journal*. **151**:97-104.
- Kang, S., C. Liao S. Po (2000). Decolorization of textile wastewater by photo-fenton oxidation. *Technology*. *Chemosphere*. **41**:1287-1294.
- Karima, A., et al. (2009). Removal of Basic Red 46 dye from aqueous solution by adsorption onto Moroccan clay. *Journal of Hazardous Materials*. **168**:304-309.
- Karrasch, B., et al. (2006). Effects of pulp and paper mill effluents on the microplankton and microbial self-purification capabilities of the Biobío River, Chile. *Science of the Total Environment*. **359**:194-208.
- Kovacs, T., P. Martel y R. Voss (2002). Assessing the biological status of fish in a river receiving pulp and paper mill effluents. *Environmental Pollution*. **118**:123-140.
- Lina, S., R. Juangb y Y. Wang (2004). Adsorption of acid dye from water onto pristine and acid-activated clays in fixed beds. *Journal of Hazardous Materials*. **113**:195-200.
- Martínez, C. y E. Brillas (2009). Decontamination of wastewaters containing synthetic organic dyes by electrochemical

- methods: A general review. *Applied Catalysis B: Environmental*. **87**:105-145.
- Medialdea, J., C. Arnáiz y E. Díaz (2005). Permanganato potásico: un potente y versátil oxidante. *Ingeniería Química*. **430**:129-135.
- Pearcea, C., J. Lloyd y J. Guthrie (2003). The removal of color from textile wastewater using whole bacterial cells: a review. *Dyes and Pigments*. **58**:179-196.
- Pokhrel, D y T. Viraraghavan (2004). Treatment of pulp and paper mill wastewater-a review. *Science of the Total Environment*. **333**:37-58.
- Rodríguez, S., E. Rosales y M. Sanromán (2006). Decolourization of synthetic dyes by *Trametes hirsute* in expanded-bed reactors. *Chemosphere*. **62**:1558-1563.
- Sadik, W. (2007). Effect of inorganic oxidants in photodecolourization of an azo dye. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*. **191**:132-137.
- Savant, D., R. Abdul-Rahman y D. Ranade (2006). Anaerobic degradation of adsorbable organic halides (AOX) from pulp and paper industry wastewater. *Bioresource Technology*. **97**:1092-1104.
- Susial, P., et al. (2005). Tratamiento por coagulación de aguas con cola de almidón. *Ingeniería Química*. **423**:136-146.
- Tarlan, E., F. Dilek y U. Yetis (2002). Effectiveness of algae in the treatment of a wood-based pulp and paper industry wastewater. *Bioresource Technology*. **84**:1-5.
- Thompson, G., et al. (2001). The treatment of pulp and paper mill effluent: a review. *Bioresource Technology*. **77**:275-286.
- Walker, G. y L. Weatherley (2001). COD removal from textile industry effluent: pilot plant studies. *Chemical Engineering Journal*. **84**:125-131.
- Xiang, J y H. Xia (2009). Treatment of water-based printing ink wastewater by Fenton process combined with coagulation. *Journal of Hazardous Materials*. **162**: 386-390.
- Xu, Y., et al. (2009). Degradation of dye wastewater in a thin-film photoelectrocatalytic (PEC) reactor with slant-placed TiO<sub>2</sub>/Ti anode. *Chemical Engineering Journal*. **150**:302-307.
- Zabala, A. y J. Rodriguez (2005). Papel y sostenibilidad: una pareja con futuro. *Ingeniería Química*. **423**:81-85.
- Zhou, Y., Z. Liang y Y. Wang (2008). Decolorization and COD removal of secondary yeast wastewater effluents by coagulation using aluminum sulfate. *Desalination*. **225**:301-311.

## SOBRE LOS AUTORES

### José A. Ríos.

Docente investigador de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Pontificia Bolivariana. Ingeniero Mecánico de la Universidad Pontificia Bolivariana. Áreas de interés investigativo: Ambiental, tratamiento de aguas.

### Oscar F. Arcos J.

Estudiante de Ingeniería Química de la Universidad Pontificia Bolivariana.

### Guillermo A. Aristizábal M.

Estudiante de Ingeniería Química de la Universidad Pontificia Bolivariana.