

# REVISTA AIDIS

de Ingeniería y Ciencias Ambientales:  
Investigación, desarrollo y práctica.

## ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA DEL SISTEMA ACOPLADO FLOTACIÓN POR AIRE DISUELT (FAD)-FENTON EN EL TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL PROVENIENTE DEL PROCESO DE EXTRACCIÓN DE ACEITE DE PALMA.

Adiel Coello Calderón<sup>1</sup>  
Herbin Rivera Vazquez<sup>1</sup>  
Hugo Alejandro Nájera Aguilar<sup>2</sup>  
Nery del Carmen Rodiles Cruz<sup>3</sup>  
Jorge Arturo Velázquez Reyes<sup>1</sup>  
\*Rubén Fernando Gutiérrez Hernández<sup>1</sup>

ANALYSIS OF COUPLED SYSTEM EFFICIENCY DISSOLVED  
AIR FLOTATION (DAF) - FENTON IN WASTEWATER  
TREATMENT PROCESS FROM PALM OIL EXTRACTION

Recibido el 2 de septiembre de 2013; Aceptado el 12 de junio de 2014

### Abstract

The steady growth of the population and industrial sector demand large volumes of water in their processing of resources, it causes daily generated huge amounts of wastewater. The system Dissolved Air Flotation (DAF) coupled to a Fenton system emerges as a proposal for the treatment of industrial effluents from the process of extracting palm oil. Thereby achieving optimize and reduce both the time and the area for treatment. FAD system was operated with 4.5 atm pressure, retention time 30 min and concentration of 8 g / L of total solids (ST). Clear phase recovered was oxidized by Fenton system using 100 mL per reactor under an arrangement bifactorial (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/Mn<sup>2+</sup>) 5 x 5. The five H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> concentrations used in this design were 3000, 4500, 6000, 7500 y 9000 mg/L and the manganous sulphate concentrations tested were 1000, 1500, 2000, 2500 y 3000. Under de best conditions was achieved up to 100% removal of suspended solids (SS), 79.81% total solids (TS), 93.44% Chemical Oxygen Demand (COD) and 95.17% fats and oils (G & A).

**Keywords:** Advanced oxidation processes, Chemical oxygen demand, Wastewater treatment.

<sup>1</sup> Instituto Tecnológico de Tapachula, México.

<sup>2</sup> Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, México.

<sup>3</sup> Planta de Cría y Esterilización de Moscas de la Fruta y Parasitoides, Planta Moscafrut

\*Autor correspondiente: Departamento de Ingeniería Química y Bioquímica, Instituto Tecnológico de Tapachula, Km. 2 carretera a Puerto Madero S/N. Tapachula, Chiapas, C.P. 30700, MEXICO. E-mail: [rgutierrez@ittapachula.edu.mx](mailto:rgutierrez@ittapachula.edu.mx)

## Resumen

El crecimiento de la población así como del sector industrial demanda grandes volúmenes de agua en sus procesos de transformación. Esto provoca que se generen enormes cantidades de aguas residuales, las cuales requieren ser tratadas antes de ser vertidas a un cuerpo de agua. En este artículo se presentan los resultados obtenidos en la aplicación del sistema acoplado Flotación por Aire Disuelto-reacción de Fenton para el tratamiento de efluentes industriales provenientes del proceso de extracción de aceite de palma africana. El sistema de flotación por aire disuelto fue operado con 4.5 atm de presión, 30 min de tiempo de retención y 8 g/L de sólidos totales. La fase clara recuperada fue oxidada mediante la reacción de Fenton utilizando un reactor de 100 mL de volumen. Estas pruebas se desarrollaron siguiendo la estructura de un diseño factorial 5x5. El primer factor, concentración de  $H_2O_2$ , contó con cinco niveles (3000, 4500, 6000, 7500 y 9000 mg/L). El segundo factor, concentración de  $MnSO_4 \cdot 7H_2O$ , también contó con cinco niveles (1000, 1500, 2000, 2500 y 3000). La variable respuesta fue el porcentaje de remoción de la demanda química de oxígeno. Las pruebas de oxidación se desarrollaron en completa oscuridad y con agitación constante. Bajo las mejores condiciones de operación del sistema Fenton (6000 mg/L de  $H_2O_2$  y 2000 mg/L de  $MnSO_4$ ) y su acoplamiento con la flotación por aire disuelto se logró remover el 100% de sólidos suspendidos, 79.81% de sólidos totales, 93.44% de la demanda química de oxígeno y 95.17% de grasas y aceites.

**Palabras claves:** Demanda química de oxígeno, Procesos avanzados de oxidación, Tratamiento de aguas residuales.

## Introducción

El constante crecimiento de la población así como del sector industrial demandan grandes volúmenes de agua en sus procesos de transformación de recursos, esto provoca que día a día se generen enormes cantidades de aguas residuales. La creciente demanda de la sociedad para la descontaminación de aguas residuales de diversos orígenes, materializada en regulaciones cada vez más estrictas, ha impulsado el desarrollo de nuevas tecnologías de purificación.

Debido a que no toda el agua residual generada recibe algún tipo de tratamiento antes de su descarga sobre algún cuerpo de agua, es necesario buscar alternativas para dar solución a esta problemática. El uso de cualquier método que se utilice para su tratamiento (físico, químico o biológico) debe tomar en cuenta, fundamentalmente, la naturaleza y las propiedades fisicoquímicas de los efluentes a tratar. (Emilio *et al*, 2004).

Para los procesos biológicos aerobios, las normativas ambientales son más exigentes cada día y algunos de estos procesos son insuficientes, bien por la alta concentración de contaminantes o por la resistencia de algunos compuestos (García y Uribe, 1997). En estos casos hay que recurrir a métodos químicos que permitan la destrucción completa del contaminante, transformándolos en compuestos finales inofensivos al ambiente o bien de impacto menor (Ramalho, 1993). Los procesos acoplados, como los sistemas de flotación por aire disuelto combinado con los procesos avanzados de oxidación se han empleado debido a la demanda creciente de la sociedad por la descontaminación de aguas residuales (Borja, 1996). La creciente utilización de la flotación por aire disuelto (FAD) en todos los campos se debe a las diversas ventajas con relación al proceso de coagulación-sedimentación (Charles *et al.*, 2003). Los procesos avanzados

de oxidación implican la generación del radical libre hidroxilo ( $\cdot\text{OH}$ ) en cantidad suficiente para interaccionar con los compuestos orgánicos del medio.

Cabe mencionar que las industrias extractoras de aceites de palma africana utilizan agua en sus procesos de esterilización y clarificación (CENIPALMA, 1997; Souza, 1986) ocasionando problemas en su alta concentración de sólidos totales (ST) y suspendidos (SS), así como también una elevada concentración de grasas y aceites (GyA) y demanda química de oxígeno (DQO). Este problema es lo que permite ver a los sistemas acoplados como una alternativa prometedora para el tratamiento de este tipo de efluentes. En el presente trabajo se presentan los resultados obtenidos de la evaluación del sistema acoplado entre FAD y uno de los procesos avanzados de oxidación, el sistema Fenton.

### Metodología

El sistema de FAD fue operado bajo las condiciones reportadas por Maldonado *et al.* (2005), presión de 4.5 atm, tiempo de retención de 30 min y concentración inicial de 8 g/L de ST. La fase clara recuperada del FAD fue oxidada por medio del sistema Fenton el cual se llevó a cabo con un volumen de reacción de 100 ml y con agitación constante. A este medio de reacción se le ajustó el pH a 3 utilizando ácido sulfúrico al 20 % y se le adicionó el sulfato manganoso heptahidratado. Se permitió la homogenización del medio por cinco minutos y posteriormente se le adicionó el peróxido de hidrógeno (30% v/v), dando inicio con esto al proceso oxidativo. La reacción de oxidación se permitió por 90 min e inmediatamente después se elevó el pH del medio de reacción a 6.8 utilizando hidróxido de sodio al 5%. La eficiencia del proceso fue evaluada mediante la cuantificación de la DQO residual en el medio de reacción.

### Diseño Experimental

Las pruebas de oxidación se llevaron a cabo siguiendo la estructura de un diseño factorial de 5x5, dando un total de 25 tratamientos diferentes, los cuales fueron realizados por triplicado. El factor uno, concentración de  $\text{H}_2\text{O}_2$ , fue evaluado con cinco niveles (3000, 4500, 6000, 7500 y 9000 mg/L de  $\text{H}_2\text{O}_2$ ). El segundo factor, concentración de sulfato manganoso heptahidratado, también contó con cinco niveles (1000, 1500, 2000, 2500 y 3000 mg/L). El análisis de varianza se realizó después de transformar a los datos mediante la transformación de rangos (Conover e Iman, 1981).

### Métodos Analíticos

**Demanda Química de Oxígeno:** Se siguió el micro método colorimétrico usando dicromato de potasio como agente oxidante. Las muestras se digestaron a 150°C (digestor de DQO FE/400) durante 2 horas y posteriormente se leyó su absorbancia a 600 nm en un espectrofotómetro (UV-Vis, Spectronic 21D), con base a la norma oficial mexicana NMX-AA-030-1981.

**Sólidos Totales:** Se determinaron tomando 2 ml de muestra representativas de agua residual. Los crisoles fueron secados a una temperatura de 103-105°C hasta peso constante. El incremento de peso en el crisol representó el contenido de sólidos totales con base a la norma oficial mexicana NMX-AA-020-1980.

**Sólidos Suspendidos Totales:** Se determinaron tomando muestras representativas de agua. Se utilizaron crisoles Gooch y filtros millipore de 1.2  $\mu\text{m}$ . los cuales fueron secados de 103-105°C hasta el peso constante. El incremento en el peso del crisol junto con el filtro representó el contenido de los sólidos suspendidos totales con base a la norma oficial mexicana MNX-AA-034-1981.

**pH:** Se determinó directamente de la muestra utilizando un phmetro (Hanna instruments , pH 211), con base a la norma oficial mexicana NMX-AA-008-1980.

**Grasas y Aceites:** se usó el equipo Soxhlet de extracción, empleando hexano como disolvente. El matraz fue secado a una temperatura de 103-105°C hasta peso constante. El incremento de peso en el matraz representó el contenido de grasas y aceites. Como referencia se utilizó a la norma oficial mexicana NMX-AA-005-1980.

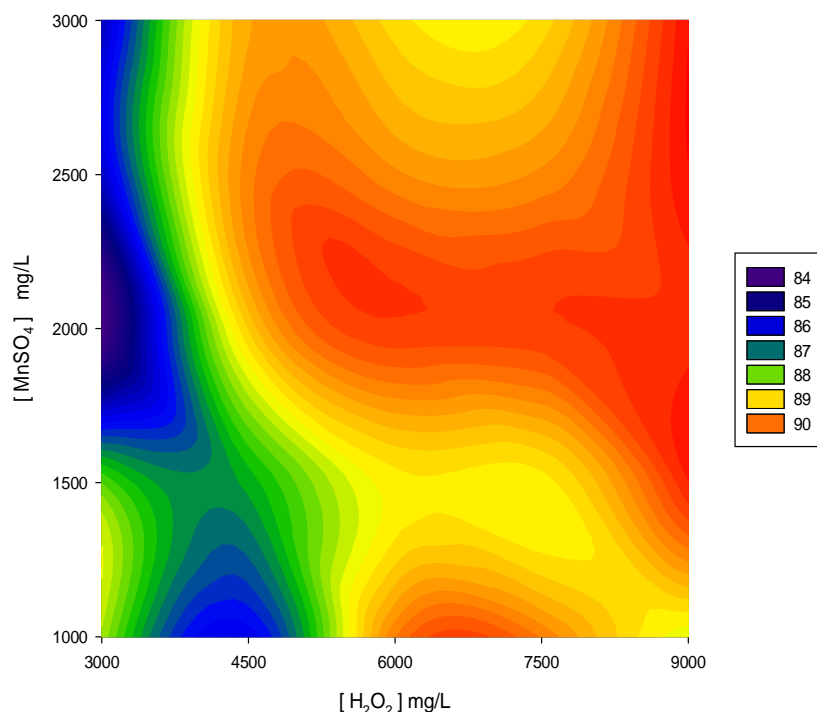
## Resultados

Como resultado de la FAD, se logró reducir la DQO de 12500 a 8300 mg/L. Esta fue la concentración inicial de DQO en el sistema Fenton. Los resultados del proceso oxidativo mediante la reacción Fenton se presentan en la Tabla 1. El análisis de varianza de estos resultados (Tabla 2) permite ver que tanto la concentración del  $\text{H}_2\text{O}_2$  como la del  $\text{MnSO}_4$  tienen influencia significativa en la oxidación de la muestra ( $p < 0.0001$  y  $p = 0.010283$ , respectivamente). Por otro lado, también se observa la interacción significativa entre los factores evaluados ( $p = 0.006586$ )

En la figura 1 se presentan los datos de porcentaje de remoción de la DQO logrado mediante la reacción Fenton. Como se observa en esta figura, los valores más altos, indicados con las zonas de color rojo, se presentan cuando el sistema fue operado con una dosis de 9000 mg/L de  $\text{H}_2\text{O}_2$ . Un porcentaje superior al 90 % de remoción se logró con una dosis de  $\text{MnSO}_4$  de 1500, 2000, 2500 y 3000 mg/L. Con una dosis de 1000 mg/L, la eficiencia de remoción no alcanzó el 90%. Debido a la interacción existente entre los factores, también se logró un porcentaje superior al 90% cuando el sistema fue operado con 6000 mg/L de  $\text{H}_2\text{O}_2$  y 2000 mg/L de  $\text{MnSO}_4$ .

**Tabla 1.** DQO residual en mg/L después del proceso oxidativo

[MnSO <sub>4</sub> ] mg/L	[H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ] mg/L				
	3000	4500	6000	7500	9000
1000	824.05	1128.74	744.41	810.20	924.46
	1164.83	1194.45	824.05	779.04	970.69
	964.11	1148.38	979.85	827.51	980.56
1500	900.22	1031.79	886.37	855.21	824.05
	1233.93	1128.74	993.73	977.27	782.50
	908.17	1007.30	931.21	947.64	737.49
2000	1786.90	848.28	789.42	817.12	768.65
	1319.49	841.34	858.67	775.57	841.36
	914.75	1046.37	754.80	675.16	756.81
2500	1582.31	751.34	924.46	772.15	775.57
	1043.08	876.08	817.12	768.65	810.20
	937.79	934.50	837.90	744.41	709.79
3000	1249.92	851.75	837.90	789.42	792.88
	1444.52	941.77	993.73	955.62	723.64
	891.72	852.92	934.50	758.26	779.59



**Figura 1.-** Porcentaje de remoción de DQO bajo la condiciones evaluadas en el proceso oxidativo

**Tabla 2.-** Análisis de variancia realizado con un nivel de significancia  $\alpha=0.05$

Fuente de Variación	S.C.	G. L.	M. C.	F	p
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	14084.5	4	3521.1	17.5719	<0.0001
MnSO <sub>4</sub>	2964.9	4	741.2	3.6991	0.010283
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> *MnSO <sub>4</sub>	8073.9	16	504.6	2.5183	0.006586
Error	10019.2	50	200.4		
Total	35142.5	74			

Características del efluente en un acoplamiento de Floculación por Aire Disuelto (FAD)- Sistema Fenton

De acuerdo a los resultados presentados en la figura 1, y buscado generar un proceso económico, se decidió trabajar bajo las condiciones siguientes: 6000 mg/L de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y 2000 mg/L de MnSO<sub>4</sub>.

Bajo estas condiciones se llevó a cabo todo el tren de tratamiento y los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 3. En esta tabla se puede observar que el porcentaje de remoción logrado únicamente por el sistema Fenton, de ST fue del 60.61%, los SS se reducen en un 100%, la DQO se remueve en un 90.12%, mientras que para las GyA se da una remoción del 89.13%. En una combinación del sistema FAD-Fenton acoplado con las mejores condiciones se logró una remoción de 79.81% en ST, una remoción exitosa del 100% para SS, la DQO mostró una remoción de 93.44% y GyA el 95.17%.

**Tabla 3.-** Características del agua residual tratada previo y posterior al tratamiento acoplado entre el sistema Flotación por Aire Disuelto y la reacción Fenton

Parámetros	Muestra Cruda (mg/L)	Después FAD (mg/L)	% Remoción	Después Fenton (mg/L)	% Remoción	% Remoción FAD-Fenton
Sólidos Totales	8000	4100	49	1500	60.61	79.81
Sólidos Suspendedos	4440	320	93	0	100	100
DQO	12500	8300	33.6	761.74	90.12	93.44
Grasas y Aceites	11150	4950	55.6	500	89.13	95.17

## Conclusiones

El análisis del acoplamiento del sistema FAD-Fenton para el tratamiento de los efluentes industriales provenientes del proceso de extracción de aceite de palma africana permite concluir que:

- Los mejores resultados del sistema Fenton se obtuvieron trabajando el reactor a una concentración de 6000 mg/L de  $H_2O_2$  y 2000 mg/L de  $MnSO_4$ .
- En la combinación de este sistema fue posible la remoción al 100 % de SS, 79.81% de ST, 93.44% de DQO y 95.17% GyA.
- Con este sistema acoplado se logró una reducción considerable de la alta carga orgánica presente en este tipo de efluentes industriales y así la disminución en contaminación de ríos cercanos a la industria.

## Bibliografía

- Borja, R. (1996) Anaerobic Treatment of Palm Oil Mill Effluent in a Two-Stage Up Flow Anaerobic Sludge Blanket, *Journal of Biotechnology*, **45**, 125-135.
- CENIPALMA (Centro de Investigación en Aceite de Palma) (1997) *Boletín Técnico no 11* "manejo de efluentes de plantas extractoras" Santa Fe de Bogotá, D.C.
- Charles, P.E., Valentine, G.E., Brandon, M.S., Pierce, E. (2003) Recent Advances and Applications of Dissolved Air Flotation for Industrial Pretreatment, *Memorias Técnicas The Industrial Water/Wastewater Program North Carolina AWWA/WEA Conference*, Environmental Treatment Systems, Inc. 17 de noviembre, Greensboro, North Carolina Smyrna Georgia, 1-10.
- Conover, W., Iman, R. (1981) Rank transformations as a bridge between parametric and nonparametric statistics, *Amer Statist*, **35**(3), 124-125.
- Emilio, C. A., Ferreira, R., Gestar, R., Litter, M.I. (2004) Degradación por fotocátalisis heterogénea y combinaciones con reacciones foto-Fenton, unidad de actividad química, Comisión Nacional de Energía Atómica, Buenos Aires Argentina.
- García, J. A., Uribe, L. D. (1997) Manejo de Efluentes de Plantas Extractoras: 2. Diseño de lagunas de Estabilización, Cenipalma, *Boletín Técnico No. 11*, Bogotá, Colombia.
- Ramalho, R.S. (1993) *Tratamiento de aguas residuales*, Reverte, Barcelona, España.
- Ruiz, J.L.; Moreno, J.J.; Oseki, A.E., Gutiérrez, H.R.G. (2005) Evaluación de un sistema combinado (físico-químico) para el tratamiento de las aguas residuales con alta carga orgánica provenientes del proceso de extracción del aceite de palma. *Tesis de Licenciatura en Ingeniería Química, Instituto Tecnológico de Tapachula*, México.
- Souza, M.E. (1986) Criteria for the utilization, design and operation of UASB reactors, *Waters Sci Technol*, **18**(12), 55-69.