



Estudio exploratorio en el tratamiento de vinazas mediante fotocatalisis solar homogénea en un reactor de película descendente

Exploring study on the treatment of vinasse by solar homogeneous photocatalysis in a falling film reactor

Lina Vanesa Isaza Jiménez, Diana Carolina Rodríguez Rivera , Fiderman Machuca-Martínez

Ingeniera Química, Escuela de Ingeniería Química, Universidad del Valle, Colombia.

RESUMEN

En este estudio se realizaron pruebas a escala laboratorio y piloto de degradación fotocatalítica de vinaza, utilizando reactivo Fenton como un posible método alternativo para la reducción de su carga orgánica. Se evaluaron los efectos de variables como pH inicial, relación $[H_2O_2]/[Fe^{+2}]$ y $[H_2O_2]$; utilizando como variables de respuesta la remoción de Carbono Orgánico Total (COT), sólidos totales y turbidez.

Para los ensayos a escala piloto, se utilizó un reactor de película descendente, radiación solar natural como fuente de fotones, peróxido de hidrógeno comercial al 50% y sulfato de hierro. Se alcanzaron disminuciones de COT de 12,53%, a relación de $[H_2O_2]/[Fe^{+2}]=15$, $[H_2O_2]=0,5$ mo/l y pH natural, con vinaza concentrada. Para los sólidos totales y turbidez, se presentaron aumentos hasta de 19,79% y 16,95% respectivamente, a las mismas condiciones y relación $[H_2O_2]/[Fe^{+2}]=20$. La variable que tuvo mayor influencia sobre el proceso fue la relación $[H_2O_2]/[Fe^{+2}]$.

Palabras clave: vinaza; fotocatalisis solar; reactores piloto; foto fenton; tratamiento de aguas.

Abstract

The purpose of this study was to carry out tests of photocatalytic degradation of vinasse using Fenton reagent at laboratory and pilot scale as a possible alternative method for the reduction of vinasse organic load. During the photocatalytic degradation were evaluated the effects of initial pH, relation $[H_2O_2]/[Fe^{+2}]$ and $[H_2O_2]$ removing Total Organic Carbon (TOC), total solids and turbidity as response variables.

For the pilot scale test were used a flat plate reactor, natural solar radiation as photons source; commercial hydrogen peroxide (50% of concentration) and ferrous sulphate. The experimental results achieved TOC reductions of 12,53% with $[H_2O_2]/[Fe^{+2}]=15$, $[H_2O_2]=0,5$ mo/l, natural pH and concentrated vinasse. The total solids and turbidity got increased until 19,79% and 16,95% respectively at the same conditions and $[H_2O_2]/[Fe^{+2}]=20$. The most incident variable in the process was the relation $[H_2O_2]/[Fe^{+2}]$.

Keywords: Vinasse; solar photocatalysis; pilot plant; foto fenton; water treatment.

Para citar este artículo: Isaza Jiménez LV, Rodríguez Rivera DC , Machuca-Martínez Fiderman. Estudio exploratorio en el tratamiento de vinazas mediante fotocatalisis solar homogénea en un reactor de película descendente. Bistua. 2011;9(2):48-54

+Autor para el envío de correspondencia y la solicitud de separatas: *Fiderman Machuca-Martínez, Universidad del Valle, Cali, Colombia.*

e-mail: fiderman.machuca@correounivalle.edu.co.

Recibido: Octubre 26 de 2010

Aceptado: Mayo 15 de 2011

49

Introducción

El gobierno colombiano afín con la normatividad ambiental estableció a partir de septiembre de 2005, que la gasolina debería tener oxigenantes para disminuir las emisiones nocivas (Quintero et al, 2008). El cumplimiento de esta normativa demandó entonces el uso de 10% de etanol en la gasolina, convirtiendo al alcohol anhidro en un producto de fabricación asociada al sector azucarero en el país.

La vinaza es uno de los principales residuos de la fabricación de etanol, produciéndose en una proporción de 1:2 a 1:10, es decir, por cada litro de alcohol se pueden obtener hasta 10 litros de vinaza concentrada (Tapia, 2009, comunicación personal). Por su alta carga orgánica, ha sido considerada como uno de los residuos con un potencial de contaminación, el cual debe ser tratado con cuidado. Por ejemplo, una destilería de 150.000 litros diarios, puede producir vinaza con la misma carga orgánica generada en una ciudad de 1 millón de habitantes (Conil, 2006), lo cual obliga a las industrias a someterla a tratamiento antes de ser vertida, o al desarrollo de alternativas para su aprovechamiento.

La fotocatalisis homogénea a pesar de ser una de las técnicas de oxidación más desarrolladas, ha sido poco estudiada para el tratamiento de vinaza cruda; por lo tanto, determinar su efectividad, podría brindar a la industria otra alternativa para disminuir la carga orgánica de dicho efluente.

Los métodos tradicionales para el tratamiento de la vinaza se clasifican en tres grandes grupos, los de uso directo, como el compostaje y la fertirrigación; los de concentración, para fabricar alimento para animales, fertilizantes y proteína celular; y los de fermentación tanto aeróbica como anaeróbica. El objetivo de dichos métodos no es específicamente reducir la carga contaminante de la vinaza sino darle un uso alternativo (García et al, 2008).

En consecuencia, se encuentra en la literatura (véase figura 1) diversos estudios para el tratamiento de la vinaza, entre los cuales se destaca la aplicación de los métodos de oxidación química, cuyo objetivo es reducir los compuestos contaminantes en especies de menor complejidad química y menor carga orgánica y así poder mejorar los tiempos de tratamiento de sistemas convencionales. La figura 1 presenta un esquema baso en el análisis de información (scopus) tipo galaxia y los principales aspectos en estudio.

En este estudio, se realizaron pruebas experimentales a escala laboratorio y piloto, con el fin de determinar la influencia de variables como el pH inicial, concentración de H_2O_2 y relación $[H_2O_2]/[Fe^{+2}]$ sobre la remoción de COT, sólidos totales y turbidez. Además, se determinó la

influencia del reactor de placa plana sobre el proceso fotocatalítico.

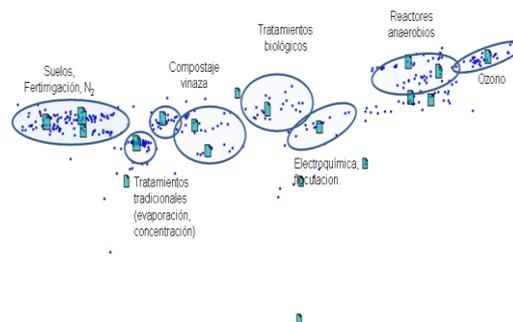


Figura 1. Principales áreas de estudio en el tratamiento de vinazas. Análisis de información sobre artículos publicados en Scopus.

EXPERIMENTAL

Caracterización de la vinaza

La vinaza utilizada para el desarrollo experimental, fue recibida de un ingenio de la región y se recolectó antes de ingresar a la planta de compostaje del Ingenio. Esta se caracterizó de manera general tal como se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Caracterización de la vinaza a 25°C

Variable	Unidades	Valor
*Brix	°Brix	19,60
Densidad	g/ml	1,08
pH		4-5
Conductividad	mS/cm	35
*Fe ⁺⁺	ppm	200
Viscosidad	cP	8,40
Turbiedad	NTU	10,640
Sólidos totales	%	19,17
Carbono Orgánico Total (COT)	ppm	74.435
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	ppm	179.750

(*) Información tomada de la planta de compostaje

Pruebas preliminares a escala laboratorio

Se evaluó la influencia del pH, $[H_2O_2]$ y relación $[H_2O_2]/[Fe^{+2}]$, en la degradación fotocatalítica de vinaza. Para esto se planteó un diseño factorial 2^3 con n=1 réplica y como variable de respuesta se tomó el porcentaje de remoción de carbono orgánico total (%RCOT) calculado mediante la siguiente ecuación:

$$\%RCOT = \frac{COT_{incial} - COT_{final}}{COT_{incial}} * 100 \quad (1)$$

En la tabla 2, se muestran las condiciones de trabajo para cada uno de los puntos del diseño, donde el pH natural de la vinaza se encuentra entre 4,3 - 4,4.

Tabla 2. Condiciones experimentales para las pruebas preliminares.

Punto Experimental	Factores y niveles		
	pH	[H ₂ O ₂]/[Fe ⁺²] (mol/mol)	[H ₂ O ₂] (mol/l)
(1)	3.2	15	0.5
a	natural	15	0.5
b	3.2	20	0.5
ab	natural	20	0.5
c	3.2	15	1
ac	natural	15	1
bc	3.2	20	1
abc	natural	20	1

La elección de los niveles para cada una de las variables de entrada, se hizo tomando como referencia el estudio realizado por Beltrán de Heredia y mediante pruebas experimentales, se acotaron los rangos en los que se encuentran los valores de concentración de H₂O₂ y relación [H₂O₂]/[Fe⁺²] disponibles en la literatura (Beltrán de Heredia et al, 2005).

Los valores de pH elegidos, se mantuvieron constantes durante las pruebas experimentales, utilizando soluciones de NaOH y H₂SO₄ a una concentración de 2M.

La temperatura se mantuvo entre 25 y 40 °C para evitar la descomposición del H₂O₂, finalmente, la radiación acumulada que cada muestra recibió, dependió del tiempo requerido para el consumo total del H₂O₂ adicionado, considerando que cuando el ORP registraba una señal de 300 mv (previa calibración de la medida con soluciones de peróxido).

Pruebas a escala piloto

Se desarrollaron dos diseños experimentales: El primero, fue un diseño factorial 2² con n=1 réplica, para evaluar la influencia de la [H₂O₂] y relación [H₂O₂]/[Fe⁺²] sobre el % RCOT, el porcentaje de remoción de sólidos totales (%RST) y la disminución de la turbidez (% RT), trabajando con vinaza a pH natural.

El cálculo de remoción sólidos totales y turbidez se realizó con las siguientes ecuaciones:

$$\%RST = \frac{Sol.Tot_{iniciales} - Sol.Tot_{finales}}{Sol.Tot_{iniciales}} * 100 \quad (2)$$

$$\%RT = \frac{Turbidez_{incial} - Turbidez_{final}}{Turbidez_{incial}} * 100 \quad (3)$$

Los niveles

planteados para cada uno de los factores del diseño inicial fueron:

En el segundo diseño, se evaluó la influencia de diluir la vinaza y la relación [H₂O₂]/[Fe⁺²], en la degradación fotocatalítica de este efluente, trabajando a pH natural (4,3 - 4,4) y [H₂O₂]=0,5 mol/l. Para esto se planteó un diseño factorial 2² con n=1 réplica. Como variable de respuesta se tomó el % RCOT, % RST y % RT. En la tabla 4 se muestran las condiciones de trabajo para cada uno de los puntos del diseño.

Tabla 3. Condiciones experimentales para las pruebas piloto, diseño inicial.

Punto experimental	Factores y niveles	
	[H ₂ O ₂] (mol/l)	[H ₂ O ₂]/[Fe ⁺²] (mol/mol)
1	0.5	15
A	1	15
B	0.5	20
AB	1	20

Tabla 4. Condiciones experimentales para las pruebas piloto, segundo diseño.

Punto experimental	Factores y niveles	
	Dilución	[H ₂ O ₂]/[Fe ⁺²] (mol/mol)
1	Sin dilución	15
A	Dilución 1:1	15
B	Sin dilución	20
AB	Dilución 1:1	20

Las principales características del sistema son: **Pruebas preliminares** Cantidad de vinaza = 15 L, reactor: consiste en una lámina de vidrio de dimensiones 1 X 1,25 metros con un ángulo de inclinación de 6°. Al reactor fue acoplado un sistema de enfriamiento, manteniendo el recipiente recolector del fluido sumergido en agua a 10°C, medidor de pH y temperatura, sensor de ORP, radiómetro, bomba magnética.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Influencia de la variación de pH inicial, concentración de H₂O₂ y relación [H₂O₂]/[Fe⁺²] sobre la remoción de Carbono orgánico total (COT).

El análisis de varianza indica, que la variable con mayor influencia sobre la remoción de carbono orgánico total, es el pH; el comportamiento del

51

%RCOT con relación al pH y las demás variables analizadas se puede ver en las figuras 3 y 4.

Los mayores %RCOT, se alcanzaron a pH natural; la remoción máxima fue 13,4% a $[H_2O_2]=0,5 \text{ mol/l}$ y $[H_2O_2]/[Fe^{+2}]=20$. Aún así, hay una notable diferencia entre ambas figuras; en la figura a pH=3,2 los %RCOT mejoran empleando $[H_2O_2]/[Fe^{+2}]=15$ y $[H_2O_2]=0,5 \text{ mol/l}$, mientras que en la figura a pH natural la concentración de peróxido y relación tienen menor influencia, pues los %RCOT obtenidos a diferentes condiciones de operación, son muy similares.

Dicha similitud de resultados a pH natural y que el máximo % RTOC obtenido fuera de 13,4%, indican que la reacción fotocatalítica estuvo limitada por algunos factores; entre ellos, posiblemente se encuentra el apantallamiento por sólidos, reflejado en la turbidez y color de la vinaza (Hernández et al, 2008); que impiden el paso de la radiación solar y por ende la reducción de los iones férricos a iones ferrosos, encargados de la producción de radicales OH.

Adicionalmente, algunos compuestos responsables del color como las melanoidinas y los caramelos,

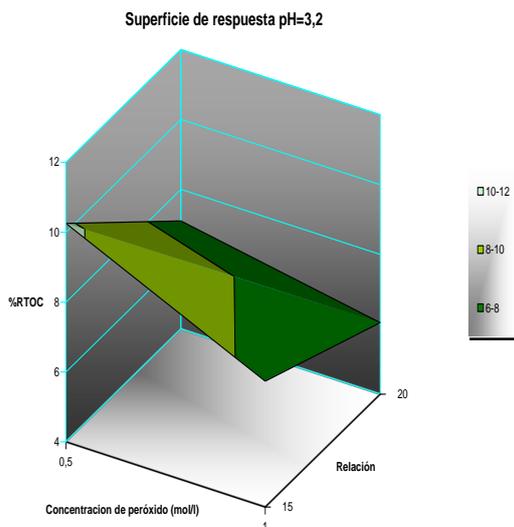


Figura 3. Superficie de respuesta %RTOC a pH=3,2.

pueden resultar recalcitrantes a la biodegradación (Hernandez et al, 2008); explicando así, el efecto negativo que tiene el color de la vinaza para ser tratada mediante Foto-Fenton.

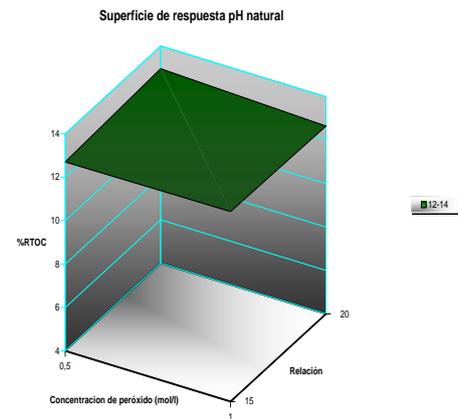
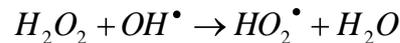


Figura 4. Superficie de respuesta %RTOC a pH natural

Otro de los factores limitantes de la reacción y posible causa del bajo %RCOT, es el empleo de una dosis excesiva de H_2O_2 . Una $[H_2O_2]=1 \text{ mol/l}$ en vez de mejorar los %RCOT, pudo afectar negativamente la velocidad de reacción, pues el peróxido que no está siendo consumido por los iones ferrosos, tiende a recombinarse con radicales OH tal como se muestra en la siguiente reacción:



(4)

El radical perhidroxilo (HO_2^\bullet) formado por esta recombinación en medio ácido, no sólo podría reducir la eficiencia del proceso por ser menos reactivo que el OH., sino que también puede reducir la eficiencia al consumir iones ferrosos, disminuyendo la cantidad de Fe^{+2} disponible para la formación de OH.

Finalmente, las pruebas realizadas a pH=3,2, requirieron menor radiación acumulada para su desarrollo. De esta manera se confirma que a pH cercano a 3, el proceso Fenton resulta ser más eficiente (Scheuneman, 2005), pero en el caso de la vinaza, esta eficiencia se ve representada en términos de velocidad de reacción, más no respecto a la reducción de COT.

Igualmente se ratifica, que sin importar el pH y la concentración de H_2O_2 , la relación $[H_2O_2]/[Fe^{+2}]=15$ resulta ser la más apropiada en términos de velocidad de reacción en las condiciones estudiadas (Beltran de Heredia et al, 2005), por la presencia de una mayor cantidad de Fe^{+2} en el proceso.

Es importante resaltar que las pruebas que recibieron mayor radiación no presentaron los mejores %RCOT. Esto se debe, posiblemente, a que la necesidad de recibir mayor radiación está relacionada directamente con el empleo de dosis bajas de Fe^{+2} para el consumo del H_2O_2 y con el pH.

52

Pruebas a escala piloto

Durante el desarrollo del primer diseño experimental planteado para la escala piloto, las pruebas a $[H_2O_2]=1 \text{ mol/l}$, presentaron un aumento instantáneo de temperatura al adicionar el peróxido, ocasionando su descomposición y la formación de gran cantidad de espuma que no permitió continuar con el desarrollo de las pruebas.

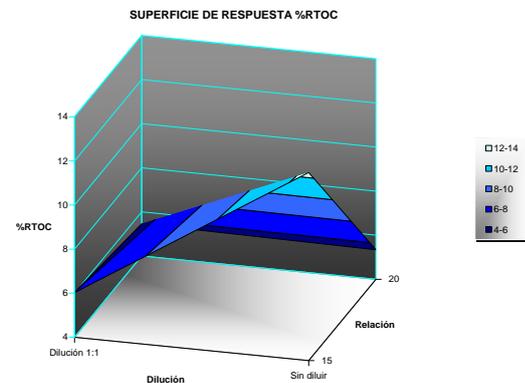
Se evaluaron alternativas como la dosificación de la cantidad de peróxido, con el fin de controlar el aumento de temperatura pero esto no permitió realizar el seguimiento de la reacción con el ORP.

Otra alternativa evaluada fue disminuir la concentración de peróxido a $0,25 \text{ mol/l}$; sin embargo, no se obtuvo reducción del COT.

Teniendo en cuenta lo descrito anteriormente, se planteó el segundo diseño factorial 2², trabajando a pH natural (4,3–4,4) con $[H_2O_2]=0,5 \text{ mol/l}$ y diluciones al 50%, con el fin de disminuir la carga orgánica, turbidez y contenido de sólidos del efluente, favoreciendo así la reducción de COT.

El comportamiento de los %RCOT, %AST y %AT con la relación $[H_2O_2]/[Fe+2]$ y la dilución se muestran en las figuras 5, 6 y 7.

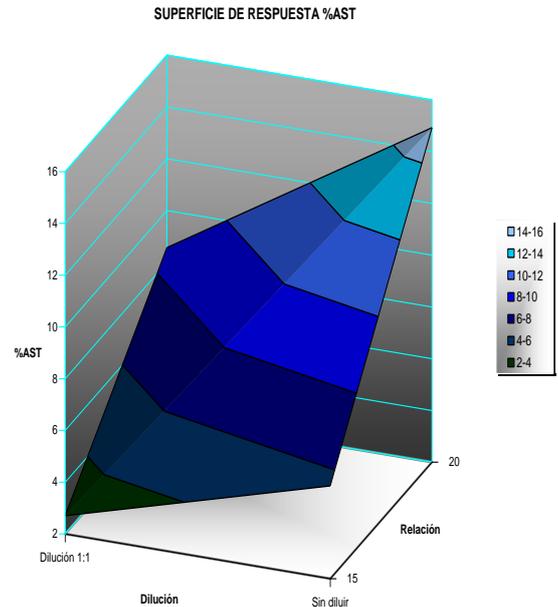
En el análisis de varianza para el %RCOT la variable más influyente fue la relación $[H_2O_2]/[Fe+2]$. El mayor %RCOT fue 12,53, este se alcanzó a $[H_2O_2]/[Fe+2]=15$ y sin diluir; evidenciándose repetibilidad respecto a los mayores porcentajes de remoción obtenidos en las pruebas



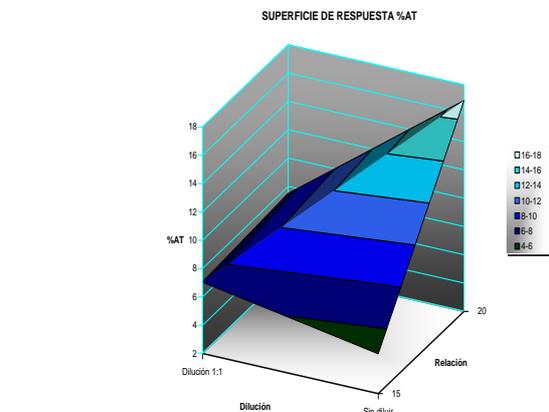
preliminares a escala piloto

Figura 5. Superficie de respuesta para %RCOT.

Figura 6. Superficie de respuesta para %AST.



Aunque en el reactor de película descendente el efecto de apantallamiento no es tan fuerte, debido a que la película de fluido que atraviesa el plano colector no es muy gruesa (Misnaza et al, 2009), esto no se vio reflejado en los %RCOT obtenidos; por lo tanto, para el caso de la vinaza se puede decir que el efecto de los sólidos, reflejado en la turbidez y color característicos de este efluente, podrían afectar el proceso



fotocatalítico, a pesar de las ventajas presentadas al trabajar en dicho reactor.

Figura 7. Superficie de respuesta para %AT

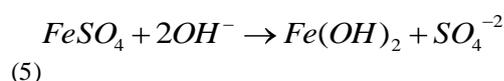
Las pruebas con vinaza diluida presentaron los menores %RCOT, esto probablemente está relacionado con la inestabilidad y reactividad del peróxido de hidrógeno al contacto con la luz (Martinez et al, 2001), pues la posibilidad de que el peróxido se descomponga, se mantiene al trabajar con el efluente diluido, ya que se disminuyen los sólidos totales y la turbidez del mismo, facilitando así la penetración de la radiación solar.

53

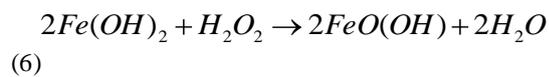
Para el análisis de varianza del %AST se obtuvo que la variable de mayor influencia fue la relación $[H_2O_2]/[Fe^{+2}]$. El mayor %AST fue 19,79 a $[H_2O_2]/[Fe^{+2}]=20$ y sin diluir.

El aumento de los sólidos totales podría deberse principalmente a la adición de Fe_2SO_4 a la vinaza, el cual puede disociarse e intervenir catalizando la reacción Fenton o aprovechar la tendencia de los OH a reaccionar con las diferentes sales inorgánicas de la vinaza, para producir precipitados inestables de óxidos e hidróxidos, (Brunatti et al, 2009).

Respecto a la formación de hidróxidos, una de las reacciones entre el Fe_2SO_4 con los iones OH se presenta a continuación:



A partir de ésta, se produce $Fe(OH)_2$ el cual puede reaccionar con H_2O_2 , dando como resultado la producción y precipitación de un hidróxido insoluble posiblemente como hidróxido de hierro (III), según la siguiente reacción:



Este precipitado se caracteriza por su color marrón anaranjado, lo que se evidenció al finalizar las pruebas, pues generalmente la vinaza tratada a diferencia de la inicial, era de color marrón claro. También, existe la posibilidad de que se forme $Fe(OH)_3$, caracterizado por presentar al igual que el hidróxido de hierro (III) un color rojizo, (Besoin, 2005). Todos estos productos intermedios, pueden convertirse en factores limitantes del proceso, reduciendo la eficiencia de remoción de COT.

Por su parte, tanto la presencia del Fe_2SO_4 como la formación de dichos hidróxidos, puede afectar directamente la turbidez del efluente, pues a mayor cantidad de sólidos suspendidos mayor turbidez. Al igual que para el análisis de sólidos totales, la variable con mayor influencia sobre el %AT es la relación $[H_2O_2]/[Fe^{+2}]$, presentándose los mayores aumentos (%AT=16,95) con $[H_2O_2]/[Fe^{+2}]=20$ y sin diluir.

Adicionalmente, como la dilución utilizada no mejoró el %RCOT del proceso Foto-Fenton, se realizó una prueba a escala laboratorio con el mismo montaje de las pruebas preliminares, utilizando vinaza previamente tratada mediante electrocoagulación (vinaza EC), con el fin de reducir el apantallamiento producido por los sólidos presentes en este efluente.

Las condiciones de operación se muestran en la tabla 5. En el desarrollo experimental no aumentó notablemente la temperatura durante el agregado de H_2O_2 , normalmente se alcanzaban temperaturas hasta de 40°C, pero con la vinaza EC la temperatura máxima alcanzada fue 30°C. La muestra recibió 8,8 $W/m^2 \cdot h$ de radiación acumulada y su %RCOT fue 26,68.

Tabla 5. Condiciones de operación para tratamiento de Vinaza EC

%Sólidos Totales inicial	4,63
COT inicial(ppm)	10.430
Concentración de H_2O_2 (mol/l)	0.50
$[H_2O_2]/[Fe^{+2}]$	15
PH contante durante toda la prueba	4.30

Los resultados obtenidos indican que la presencia de sólidos, es una limitante del proceso Fenton, al ser estos la principal causa de la alta carga orgánica de la vinaza, los problemas de apantallamiento y la exotermia de la reacción (Saint et al, 2004).

A pesar de la reducción COT, se presentó un cambio de la coloración del efluente después del tratamiento, pues se obtenía vinaza de color marrón oscuro. El oscurecimiento puede depender de las sustancias fenólicas, es decir de oxidaciones especialmente de leucoantocianos y catequizas (De la Rosa, 1997), sustancias que están incluidas en el grupo de los taninos, uno de los principales compuestos de la vinaza.

Igualmente, el %RCOT mejora posiblemente por la ausencia de muchas reacciones no deseadas como la recombinación de OH con H_2O_2 y Fe^{+2} , la formación de complejos de Fe^{+2} y la reacción de estos con H_2O_2 que genera lodos.

CONCLUSIONES

El tratamiento de vinaza concentrada mediante fotocatalisis homogénea a escala piloto, dio como resultado un porcentaje máximo de remoción de COT de 12,53, el cual se obtuvo a pH natural (4,3 – 4,4), $[H_2O_2]=0,5$ mol/l y $[H_2O_2]/[Fe^{+2}]=15$.

Los mejores resultados a escala laboratorio se obtuvieron a pH natural (4,3 – 4,4), la remoción máxima fue 13,4% a $[H_2O_2]=0,5$ mol/l y $[H_2O_2]/[Fe^{+2}]=20$. Trabajar a pH=3,2, aumenta la velocidad de reacción pero no mejora los %RCOT. La concentración de peróxido es un factor limitante del proceso Fenton, ya que a concentraciones mayores de 0,5 mol/l no se puede controlar la exotermia de la reacción y se presenta la descomposición del peróxido.

54

La relación $[H_2O_2]/[Fe^{+2}]$ es el factor que tiene mayor influencia sobre la remoción de carbono orgánico total a escala piloto. Los mejores resultados se obtuvieron con vinaza concentrada a $[H_2O_2]/[Fe^{+2}]=15$, pH natural (4,3 – 4,4) y $[H_2O_2]=0,5$ mol/l.

La cantidad de sólidos y la turbidez aumentan después de realizar el tratamiento a escala piloto. Los mayores aumentos fueron %AST=19,79 y %AT=16,95 respectivamente y se obtuvieron con vinaza concentrada a $[H_2O_2]/[Fe^{+2}]=20$, $[H_2O_2]=0,5$ mol/l y pH natural (4,3 – 4,4).

REFERENCIAS BIBLIOGRFICAS

Quintero, R; Cadena, S; Briceño, C. (2008).

Proyectos de investigación sobre uso y manejo de vinazas [en línea]. Colombia [citado en 2008-05-14].

www.cengicana.org/Portal/SubOtrasAreas/Etanol/Presentaciones/ProyectosInvestigacionSobreUsoManejo%20Vinaza.pdf

Tapia, R. (2009) Ingeniero Destilería del Ingenio Incauca S.A. Entrevista efectuada 10 de agosto de 2009.

Conil, P. (2006). Manejo de vinazas: Metanización y compostaje, Aplicaciones Industriales. *Nota técnica técnicaña*. 10, 17: 25-28.

García, Á, Rojas, C. (2008). *Posibilidades de uso de la vinaza en la agricultura de acuerdo con su modo de acción en los suelos [en línea]. Colombia [citado en 2008-05-13].*

www.tecnicana.com/imagenes_cont/sitio/documentos/Posibilidades.pdf?PHPSESSID=5d08a17159a69abcca0024fe5012744d.

Beltran de Heredia, J, Dominguez, J.R., Partido, E. (2005). *Physico-chemical treatment for depuration of wine distillery wastewaters (vinasses)*. *Water science and technology*. 51, 1: 159-166.

Jimenez, B. (2001). La contaminación ambiental en México: causas, efectos y tecnología apropiada. México D.F: Limusa, 117-125.

Hernández, M., Barrera, C., Cañizares, P., Roa, G., Sáez, C. (2008). Procesos de oxidación avanzada para el tratamiento de efluentes de la industria de fermentación. *Memorias del Congreso Internacional de Ciencias Ambientales*. México.

Scheuneman, R. (2005). Regeneração de areia de fundição através de tratamento químico via processo fenton. Florianópolis, 2005, 58-85 p. Tesis

(Magíster en Ingeniería Química). Universidade Federal de Santa Catarina. Centro Tecnológico.

Misnaza, O.J., Ortiz, M. (2009). Degradación de una mezcla de pesticidas (Diuron y 2-4D) en un reactor de película descendente mediante el proceso de foto-fenton. Cali, Trabajo de grado (Ingeniero Químico). Universidad del Valle. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Química.

Albarrán Zavala, E. (2008). El potencial redox y la espontaneidad de las reacciones químicas. *Lat. Am. J. Phys. Educ.* 2, 3 : 340.

Martínez, E.C., López, G.D. (2009) Tratamiento químico de contaminantes orgánicos - El proceso Fenton [en línea]. Santa Fe (Argentina): Grupo Fenton -Tratamiento Químico de Efluentes, Ingar-Instituto de Desarrollo y Diseño (Conicet/UTN). Enero 2001 [citado en 2009-03-12]. Disponible en internet en: http://www.fundacionypf.org.ar/premios/Fenton_papar.pdf.

Brunatti, C; Martín, A.M. La solubilidad de los compuestos iónicos [en línea]. Argentina [citado en 2009-10-25]. Disponible en Internet: <http://materias.fi.uba.ar/6305/download/EQUILIBRIO%20DE%20PRECIPITACION.pdf>

Besoain, E. (1995). Mineralogía de las arcillas de suelos: Centro interamericano de documentación e información agrícola (CIDIA). Costa Rica., 1995. p. 954.

Saint, A. I., Mota, J. (2004). Desarrollo de una red neuronal para estimar el oxígeno disuelto en el agua a partir de instrumentación de E.D.A.R. *En: Jornada de Automática*. (2004: España). Memorias de Jornada de Automática. España.

De Rosa, T. (1997). Tecnología de los vinos blancos. España: Mundi-Prensa. p. 34.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad del Valle (Colombia) y la EPFL-DDC (Suiza) a través del proyecto Sustainable Biofuels from Agricultural Residues in North-Andean countries el apoyo financiero para el desarrollo del presente trabajo.

