

**Alternativa innovativa de un sistema de
tratamiento de efluentes vinícolas:
modelado matemático**

Innovative alternative of wineries
wastewater treatment:
mathematical modeling

Rosa Ana Rodríguez*

Marcelo Echegaray**

Carlos Palacios***

Miguel Angel Navas****

Universidad Nacional de San Juan (Argentina)

* Facultad de Ingeniería. Instituto de Ingeniería Química.
rrodri@unsj.edu.ar

** *mechega@unsj.edu.ar*

*** *cpalacios@unsj.edu.ar*

**** *mnavas@unsj.edu.ar*

Correspondencia: Rosa Ana Rodríguez . Libertador 1109(O), San Juan,
C.P. 5400 (Argentina). Tel.: 0264-4211700, Ext. 453. *rrodri@unsj.edu.ar*

Subvenciones y apoyos: Los apoyos financieros con los cuales se ha
realizado este trabajo provienen de: Proyecto FONCYT. "Gestión Tecno-
lógica de la Ecoeficiencia en la industria vitivinícola". Agencia Nacio-
nal de Promoción Científica y Tecnológica.

Resumen

Se presenta un tratamiento secundario alternativo para la depuración de efluentes líquidos de la industria vitivinícola. Para evaluar su eficiencia, se eligió como parámetro de referencia la Demanda Química de Oxígeno (DQO). El trabajo experimental se realizó en un reactor tubular constituido por un lecho fijo de grava, donde se analizó la influencia de emplear distintas granulometrías y caudales del efluente a tratar. Se observó una disminución entre el 16 y 54 % del valor de la DQO. La eficiencia del sistema mejoró al trabajar con caudales de efluentes a tratar menores y con un lecho constituido por partículas de menor tamaño. Se planteó un modelo analizándose distintas cinéticas del proceso de depuración de acuerdo a los valores experimentales obtenidos. Como resultado, se obtuvo una buena aproximación de los valores experimentales utilizando una cinética de reacción de orden seis.

Palabras claves: Demanda química de oxígeno, efluentes vinícolas, modelo matemático.

Abstract

A secondary alternative treatment for the wastewater depuration of the winery industry was evaluated. In order to determine their efficiency, oxygen chemical demands was chosen as reference parameter. The experimental work was performed in a tubular reactor consisting of a fixed bed of gravel, which analyzed the influence of using different particle sizes and flow of effluent to be treated. A decrease of oxygen chemical demands value was observed (between the 16 and 54%). Better decrease percentages of this parameter were obtained working with smaller effluents flows to try and with a bed constituted by smaller particles too. A mathematical model was developed, analyzing different kinetic of the purification process according to the experimental obtained values. As a result of this analysis, a good approach of the experimental values was obtained using a kinetics order equal to six.

Keywords: Chemical oxygen demand; mathematical model, winery wastewater.

Fecha de recepción: 1 de octubre de 2012
Fecha de aceptación: 27 de febrero de 2013

INTRODUCCIÓN

El principio que debe regir en toda actividad económica es el desarrollo sostenible. Dicho principio se fundamenta en encontrar el equilibrio adecuado entre la protección al medio ambiente, el progreso económico y el desarrollo social. El uso de los recursos del medio es sostenible cuando se realiza por debajo de su capacidad de renovación. Su objetivo principal es mejorar la calidad de vida y al mismo tiempo, proteger el medio ambiente de forma tal que las futuras generaciones, independientemente de la zona del planeta que habiten, logren su desarrollo. Este concepto de sostenibilidad no implica obtener una baja producción, sino que se basa en producir un volumen de bienes de consumo elevado teniendo presente, en las técnicas de producción y en todo momento, un destacado respeto hacia el medio ambiente [1]. La producción de vino y mosto es uno de los pilares más importantes de la economía en la región de Cuyo, Argentina. Uno de los principales problemas que el conjunto del sector vitivinícola plantea al medio ambiente es la contaminación originada por vertidos líquidos [2].

Con respecto a la generación de los efluentes líquidos de esta industria, es necesario destacar que en las bodegas, el agua es altamente utilizada en los procesos auxiliares como son las operaciones de limpieza de equipos, depósitos, conductos y pisos [3]. Esto provoca una fuerte contaminación caracterizada por:

- Elevada carga orgánica como consecuencia de la presencia de materia colorante, taninos, proteínas, ácidos orgánicos, glúcidos, microorganismos vivos o muertos, etc.
- Residuo mineral por ejemplo bitartrato de potasio
- Altos valores de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y DQO
pH ácido en bodega y básico en la zona de embotellado
- Sólidos en suspensión
- Alta biodegradabilidad
- Tierra procedente de la vendimia, que suele entrar en forma de polvo o barro
- Agentes de limpieza
- Desinfectantes como el cloro y sus compuestos [4]

Estos vertidos muestran una gran irregularidad en cuanto a caudales, composición y concentración de contaminantes, dependiendo los mismos de factores como la tecnología de vinificación utilizada, las variedades de uvas procesadas, el tamaño de la bodega, la época del año, etc. [5].

En lo referente al consumo de agua por litro de vino producido existen diferencias significativas entre diversos autores [2]. En general, se puede decir que la producción de 1 litro de vino genera entre 1-1,5 litros de efluente líquido, por lo que se puede ver la magnitud del problema [6]. Esta generación de grandes volúmenes de efluente con un alto contenido en materia orgánica requiere de procesos de depuración que permitan la reutilización del recurso con otros propósitos, el vuelco a corrientes de agua superficiales o red cloacal.

Las diferentes combinaciones de procesos y operaciones unitarias de una planta de tratamiento funcionan como un sistema, por lo que la elección del tren de tratamiento a utilizar se debe abordar desde una perspectiva global. La mayor parte de la selección de procesos se centra en la evaluación y valoración de diferentes combinaciones de procesos y operaciones unitarias y sus interacciones. En general, se combinan tratamientos primarios (tales como cribado, sedimentación, etc.) y tratamientos secundarios (lagunas de estabilización, distintos reactores biológicos, evaporadores, etc.) [7].

Actualmente, en la provincia de San Juan, el tipo de tratamiento secundario aplicado con mayor frecuencia en la región es el sistema de lagunas de aireación, el cual es utilizado por su bajo costo de construcción y operación sencilla, aunque muchas veces la eficiencia del tratamiento no es suficiente como para reducir las concentraciones de los contaminantes por debajo de los límites establecidos por la legislación vigente en la provincia de San Juan, es decir 125 mg/l para descarga aguas naturales y artificiales y entre 250-500 mg/l para descarga a drenes y suelo, de acuerdo al Decreto N° 2107 de la Ley N° 5824/87. Esta baja eficiencia en el tratamiento es debido a que las lagunas de estabilización son muy sensibles a la variación de los parámetros de operación. Por otra parte, el consumo energético para producir la aireación es elevado y además, se generan lodos secundarios los cuales deben ser gestionados en forma adecuada [8].

Debido a los inconvenientes presentados por el proceso convencional, es que se estudió otra alternativa de tratamiento secundario teniendo como objetivo su viabilidad tanto técnica como económica, para el tratamiento de aguas residuales proveniente de la industria vinícola, a fin de disminuir las concentraciones de contaminantes por debajo de los límites establecidos por la legislación.

El sistema planteado para la depuración de efluentes líquidos de bodegas es una técnica capaz de tratar, de forma natural, aguas de alta carga orgánica, con una instalación extremadamente simple en su construcción y mantenimiento, además de su bajo costo debido a la sencillez de los elementos constructivos y a los bajos consumos energéticos.

A fin de evaluar la eficiencia del tratamiento planteado, se construyó un reactor experimental para el análisis de la influencia de las distintas variables de proceso sobre la eficiencia del mismo, tales como la granulometría del lecho y el caudal del efluente líquido a depurar. Por otra parte, se ha propuesto un modelo matemático del proceso de depuración empleado. Dicho modelo fue validado con datos experimentales obteniendo una buena aproximación de los mismos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Efluentes líquidos utilizados en los ensayos experimentales del tratamiento

Para llevar a cabo este estudio se utilizaron efluentes provenientes de una pequeña bodega, situada en el departamento Chimbas de la provincia de San Juan, Argentina. Se escogió esta bodega debido a que tiene una producción promedio de las bodegas pequeñas de San Juan y está situada en una localidad densamente poblada, alrededores de la capital provincial. El clima es desértico y la principal actividad económica es la agricultura, la cual se lleva a cabo en las afueras del departamento. Cabe destacar que la Argentina es un país federal en el cual las provincias adhieren a la legislación nacional y se dictan decretos reglamentarios, esta legislación es válida para toda la provincia.

El tratamiento primario de los efluentes líquidos generados se realiza mediante el uso de una criba de limpieza manual que remueve la mayor parte de los sólidos gruesos, seguido por un decantador rectangular que retiene los sólidos sedimentables disminuyendo también la carga orgánica de los efluentes.

El parámetro analizado en el proceso de depuración fue la DQO, ya que este parámetro es representativo de la contaminación orgánica del efluente. Dicho parámetro se determinó utilizando un Digestor Reactor Block 200 Hach y posteriormente usando un espectrofotómetro DR2010 Hach [9].

Descripción del reactor utilizado

El estudio se realizó en un reactor a escala de laboratorio representado en la figura 1. Éste consiste en un tubo vertical de acrílico transparente, de 11cm de diámetro y 100 cm de altura de lecho. El efluente a tratar se coloca en un depósito y a través de un conducto el efluente es distribuido uniformemente en la parte superior del lecho. Por debajo del distribuidor se encuentra la zona de depuración, consistente en un lecho de gravas de 100 cm de altura y de granulometría determinada. De esta forma, el efluente desciende a través del lecho de grava y es colectado por la parte inferior del reactor para su posterior análisis.

En la parte superior del distribuidor se coloca un lecho de arena de 10 cm cuya función es permitir la difusión del oxígeno a medida que el efluente desciende a través del lecho.

Las características del relleno son de fundamental importancia en la eficiencia del tratamiento por cuanto deberá proveer una adecuada superficie de contacto, resistencia mecánica como así también ser inerte químicamente. En todo momento, el lecho de gravas se mantiene no saturado de agua y con oxígeno que entra, por difusión, desde la superficie, lo cual posibilita que las aguas residuales se depuren en condiciones aerobias [10].

Experiencias realizadas

En este estudio se analizó la influencia del caudal y granulometría del lecho en la eficiencia del sistema depurador.

El parámetro seleccionado para cuantificar la eficiencia del tratamiento bajo distintas condiciones de operación es la DQO. En los ensayos se utilizaron dos granulometrías diferentes para la grava de la zona de depuración y dos caudales diferentes del efluente a tratar. Se usaron gravas (minerales arenisca, cuarzo y cuarcita) de granulometrías: G1 (12.7-25.4 mm) y G2 (2.4 - 4.7 mm); y los caudales: C1 (1 l/h) y C2 (0,5 l/h). Se calculó la porosidad utilizando la siguiente expresión [11]; [12]:

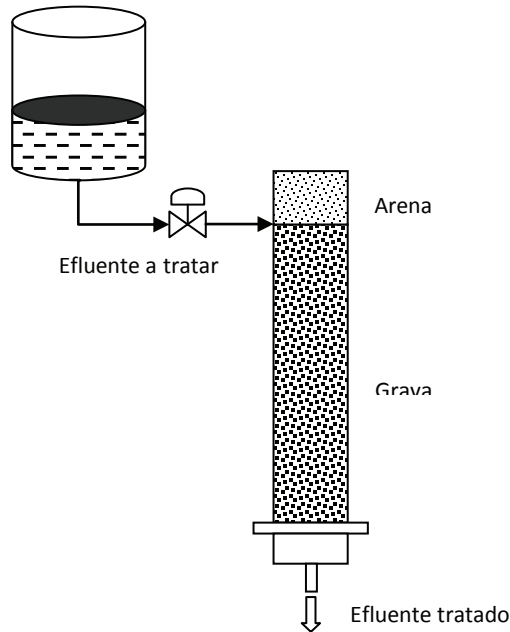


FIGURA 1. ESQUEMA DEL REACTOR

$$\varepsilon = 1 - \frac{r}{r_s} \quad (1)$$

ε : Porosidad

r : peso específico absoluto, g/ml

r_s : peso específico aparente del material seco, g/ml

Los pesos específicos introducidos en esta expresión se determinaron experimentalmente de acuerdo a la Norma ASTM D7370 - 09 [9]. Los valores de porosidad obtenidos fueron 0.550 y 0.487, para la grava de granulometría G1 y G2 respectivamente.

Descripción del modelo adoptado

Teniendo en cuenta los valores obtenidos en la reducción del valor de DQO del efluente que pasó por el lecho del reactor, se pretende arribar a un modelo que describa este proceso, para lo cual se plantearon distintas alternativas con cinéticas de diferentes órdenes. Posteriormente, a través de un análisis estadístico se determinó el modelo que mejor se ajusta a los resultados obtenidos.

En términos generales la cinética de remoción del contaminante puede escribirse como [13]:

$$\frac{dC}{dt} = -k \cdot C^n \quad (2)$$

Donde C es el valor de DQO, t el tiempo, n es el orden de la reacción y k la constante de velocidad de reacción.

Separando variables e integrando la ecuación 2 entre los valores de entrada y salida al reactor se obtiene:

$$\int_{C_0}^{C_e} \frac{dC}{C^n} = \int_0^{tr} -k \cdot dt \quad (3)$$

Donde C_0 y C_e son los valores de DQO a la entrada y a la salida del reactor, respectivamente. En donde tr es el tiempo de retención hidráulico que puede expresarse como:

$$tr = \frac{\varepsilon \cdot L \cdot A}{Q} \quad (4)$$

ε : porosidad del lecho

L: longitud del lecho (m)

A: sección transversal del reactor (m²)

Q: caudal volumétrico del efluente (m³/min)

Se empleó el software de cálculo Mathcad 14, para obtener las constantes de velocidad de reacción para distintos órdenes. Con el objetivo de determinar el orden de reacción, utilizando el modelo, se calculó la DQO de salida del reactor para cada una de las experiencias realizadas, utilizándose distintos órdenes. Posteriormente, se calculó la función objetivo definida como:

$$F.O. = \sum / C_e \text{ calculado} - C_e \text{ experimental} / \quad (5)$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La tabla 1 muestra los valores de DQO obtenidos de entrada y salida del reactor para los distintos caudales y granulometrías empleadas. A partir de ellos se determinaron eficiencias de remoción que varían entre el 16 y 54 %. Ésta se incrementa al disminuir el caudal y el tamaño de partícula de la grava utilizada en el lecho del reactor.

TABLA 1. VALORES DE DQO OBTENIDOS

DQO (mg/l)	Caudal 1 l/h (C1)		Caudal 0.5 l/h (C2)	
	G1	G2	G1	G2
Entrada	238	282	240	353
Salida	199	162	177	163

La disminución en los valores de DQO es mayor a medida que aumenta el tiempo de contacto entre el efluente y el aire al disminuir el caudal y al aumentar la superficie de contacto cuando se disminuye el tamaño de las partículas de grava.

En cuanto al modelo planteado, de acuerdo a los cálculos realizados, el orden de reacción que minimiza la función objetivo utilizado fue 6. Si bien la literatura existente generalmente, establece una cinética de primer orden para este tipo de proceso, los resultados obtenidos en las desviaciones respecto de los valores experimentales no fueron satisfactorios (Figuras 2 a 5). Utilizando los distintos órdenes para calcular el valor de DQO de salida (C_e), se puede observar en las figuras 2 y 3, que el orden tres aproxima más a los valores experimentales obtenidos cuando el lecho estuvo constituido por partículas de mayor tamaño (G1) [14].

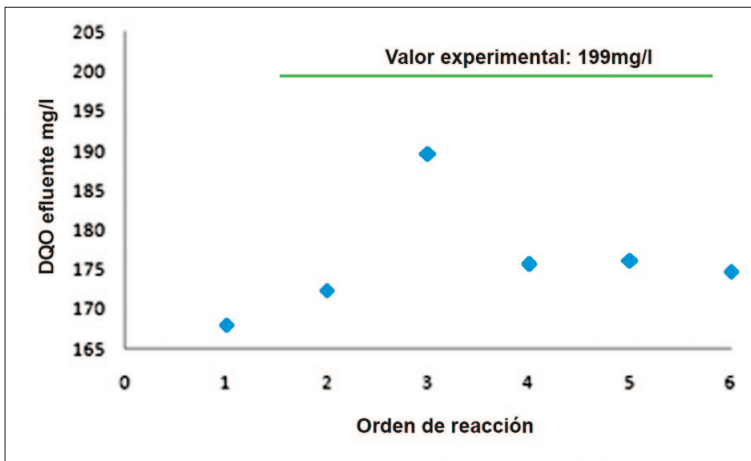


FIGURA 2. VALORES DE DQO OBTENIDOS CON EL MODELO (G1C1)

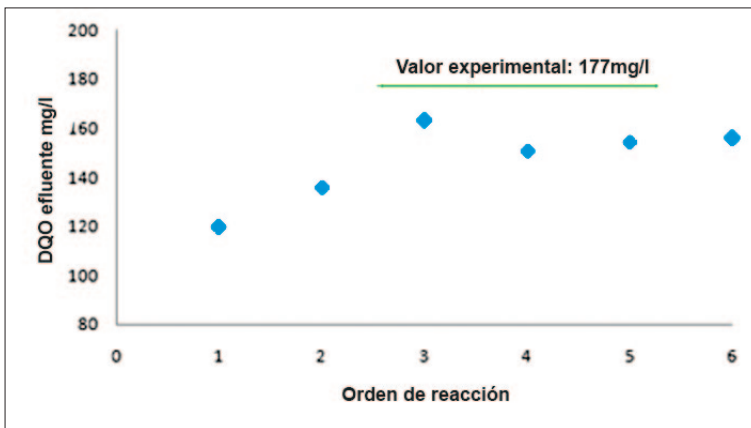


FIGURA 3. VALORES DE DQO OBTENIDOS CON EL MODELO (G1C2)

Sin embargo, cuando el lecho está constituido por partículas menores, los valores calculados teniendo en cuenta una cinética de quinto y sexto orden aproximan mejor a los valores experimentales (figuras 4 y 5). Si se compara el valor calculado con el experimental gráficamente, considerando una cinética de primer orden, se puede observar que los valores obtenidos aplicando el modelo no aproximan el valor experimental obtenido.

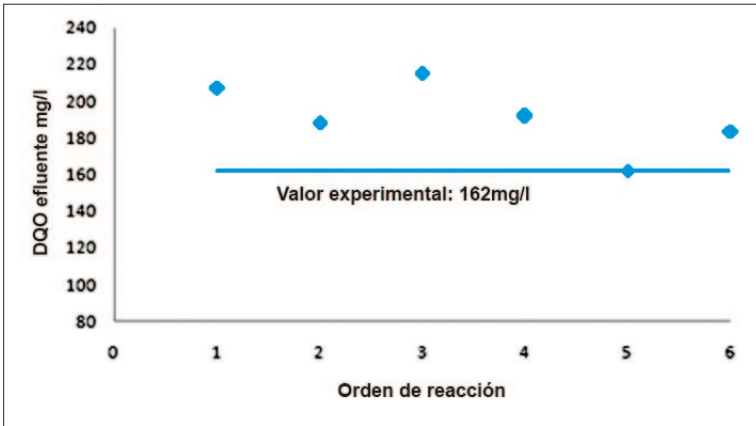


FIGURA 4. VALORES DE DQO OBTENIDOS CON EL MODELO (G2C1)

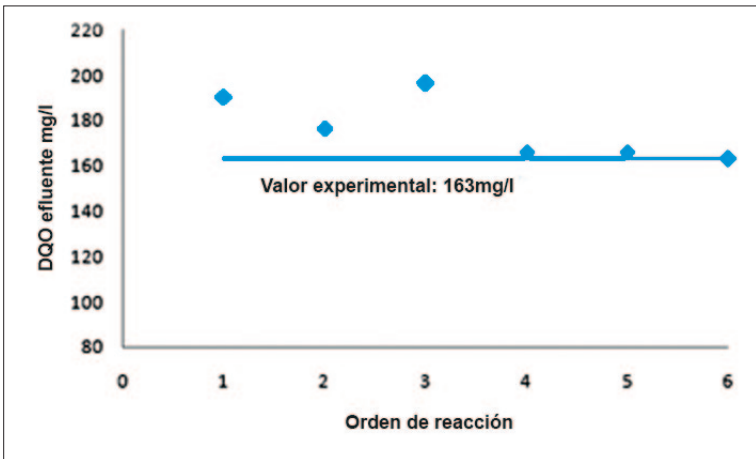


FIGURA 5. VALORES DE DQO OBTENIDOS CON EL MODELO (G2C2)

Empleando el software Mathcad 14 se obtuvieron los perfiles de DQO a lo largo del lecho del reactor para los distintos órdenes de reacción propuestos y los diferentes caudales y granulometrías. En las figuras 6 y 7 se muestra como varía la DQO desde la entrada al lecho hasta la salida en la parte inferior para el caso de la grava con granulometría G1 y para el caudal C1 adoptando en el modelo la cinética de primer y sexto orden.

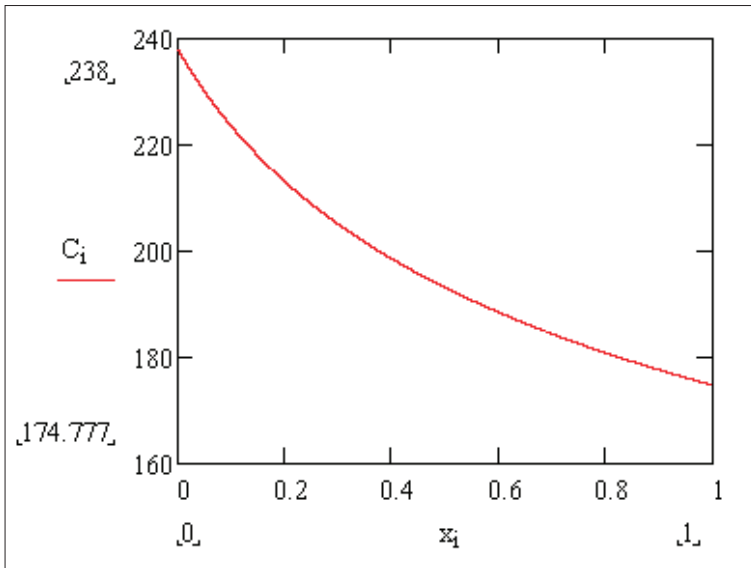


FIGURA 6. VALORES DE DQO A LO LARGO DEL REACTOR PARA G1C1 Y UTILIZANDO EN EL MODELO UNA CINÉTICA DE ORDEN 6.

CONCLUSIONES

Teniendo en cuenta los resultados experimentales, se observa que el proceso de depuración utilizado reduce apreciablemente los valores de DQO del efluente de bodega, variando entre 16 y 54 %. Se observó que si el lecho está constituido por partículas de menor tamaño, para ambos caudales de trabajo, la eficiencia del sistema de depuración aumenta, obteniéndose los mejores resultados para la granulometría G2 (2.4 - 4.7 mm). La reducción en los valores de DQO fueron mayores para valores de caudal más chicos, en nuestro caso, se obtuvieron mejores resultados para un caudal de 0.51/h.

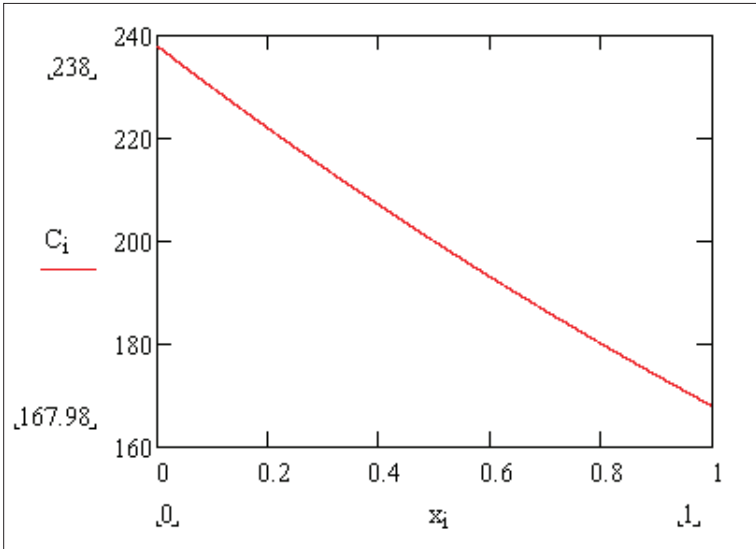


FIGURA 7. VALORES DE DQO A LO LARGO DEL REACTOR PARA G1C1 Y UTILIZANDO EN EL MODELO UNA CINÉTICA DE PRIMER ORDEN.

Para vuelcos en cursos naturales de agua, la DQO máxima permitida por la reglamentación vigente en nuestro país es igual a 125 mg/l, teniendo en cuenta sólo este parámetro, los efluentes vitivinícolas sometidos a este tratamiento no podrían tener esta disposición final. Sin embargo, podrían ser volcados a drenes o desagües, como así también podrían usarse para riego, ya que en este caso la DQO máxima permitida por la reglamentación es de 250-500 mg/l. Este último destino, provee una alternativa de reutilización para estos efluentes líquidos.

En cuanto al modelo planteado, si bien la literatura existente establece una cinética de primer orden para este tipo de proceso, los resultados obtenidos en las desviaciones respecto de los valores experimentales, no fueron satisfactorios [15]. La incapacidad de los modelos tradicionales de primer orden para representar este fenómeno puede ser atribuido a suposiciones tales como: a) la concentración del contaminante es limitada y los catalizadores están en exceso, b) se supone que el flujo de contaminantes a través del reactor es flujo pistón ideal [15]. La suposición básica de modelos de primer orden a menudo no ajustan con las condiciones de operación complejas de

este tipo de depurador debido a que este sistema involucra un gran número de procesos físicos, químicos y biológicos [16]. Esto llevó a analizar en el modelo cinéticas de diferente orden. Se obtuvo un buen ajuste de los valores experimentales adoptando una cinética de reacción de orden 6.

Este estudio de investigación ha sido realizado teniendo en cuenta sólo un contaminante de los efluentes vitivinícolas, la DQO. Con el objetivo de asegurar que la tecnología planteada resulte adecuada para reducir la carga contaminante de los efluentes provenientes de esta industria, se deberá ampliar dicha investigación considerando los demás contaminantes presentes en este tipo de efluentes. Este trabajo es de fundamental importancia debido a que la obtención de la cinética de depuración debe ser incluida en el diseño del depurador, a fin de obtener las dimensiones adecuadas del mismo para alcanzar los límites establecidos por la ley.

REFERENCIAS

- [1] R. Rodríguez y S. Udaquiola, "Evaluación medioambiental de la industria del vino. Alternativas para alcanzar una producción limpia", *Ingeniería Química*, vol. 35, pp.5-12, Jun. 2009.
- [2] P. Oliver et al., "Minimización del consumo de agua en la industria vitivinícola", *ASADES*, vol. 20, 2007.
- [3] J. Hidalgo Togoeres, *Tratado de enología*, Madrid, España, Ed. Mundi-Prensa, 2003, pp.1345-1350.
- [4] R. Rodríguez et al., "Cleantechology in the wine production industry", en *XVI Congresso Brasileiro de Engenharia Química, III Congresso Brasileiro de Termodinámica Aplicada - CBTERMO*, 2006.
- [5] P. Oliver et al., "Water use optimization in batch process industries. P1. Design of the water network", *Journal of Cleaner Production*, vol. 16, 2008, pp. 1275-1286.
- [6] R.W. Crites y G. Tchobanoglous, *Sistemas de Manejo de Aguas Residuales para Núcleos Pequeños y Descentralizados*, McGraw Hill, New York, 2000.
- [7] Metcalf and Eddy Inc., *Ingeniería de las aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización*, Madrid, España, 3ª ed, Mc Graw-Hill, 1998, pp.550-560.
- [8] R. Droste, *Theory and Practice of water and wastewater treatment*, Willey & Sons, New York, 1997, pp. 219-234.

- [9] *Standard Methods for the examination of water and wastewater*, 20th Edition, American Public Health Association, 1998.
- [10] N. Ugarte et al., "Parámetros de diseño para el tratamiento biológico aerobio de efluentes de la industria vitivinícola", *AVERMA*, vol. 4, 2000.
- [11] A. López y M. Vidal, "Efecto de la aplicación de soluciones cálcicas sobre la conductividad hidráulica y propiedades químicas del suelo", *Agroquímica*, vol. 44, pp. 49-60, 2000.
- [12] J. González et al., "Caracterización de propiedades intrínsecas acústicas de materiales porosos mediante métodos indirectos", *37º Congreso Nacional de Acústica y Encuentro Ibérico de Acústica - Tecniacústica*, Gandía, España, Oct. 2006.
- [13] J. Lara Borrero, "Depuración de aguas residuales municipales con humedales artificiales", Tesis de Maestría en Ingeniería y Gestión Ambiental, Inst. Catalán de Tecnología, Univ. Politécnica de Cataluña, Barcelona, 1999.
- [14] G. Siracusa y A. D. La Rosa, "Design of a constructed wetland for wastewater treatment in a Sicilian town and environmental evaluation using the energy analysis", *Ecological Modelling*, 197, 2006, pp. 490 - 497.
- [15] C. Mitchell y D. McNevin, "Alternative analysis of BOD removal in subsurface flow constructed wetlands employing Monod kinetics", *Water Research*, vol. 35, No 5, 2001, pp. 1295-1303.
- [16] J. Garcia et al., "Initial contaminant removal performance factors in horizontal flow reed beds used for treating urban waste water", *Water Research*, vol. 38, No 7, 2004, pp. 1669-1678.