



BOLETÍN DEL CENTRO DE INVESTIGACIONES BIOLÓGICAS

REMOCIÓN DE MATERIA ORGÁNICA EN AGUAS RESIDUALES DE INDUSTRIA PORCINA MEDIANTE ELECTROCOAGULACIÓN

Daisy Isea, Luís Vargas, José Durán, José Delgado, Daningd Troconis, Jesny Vera y Elaída Villalobos..... 80

CONCENTRACIÓN DE METALES PESADOS EN BIVALVOS *Anadara tuberculosa* Y *A. similis* DEL ESTERO HUAYLÁ, PROVINCIA DE EL ORO, ECUADOR

JohnnyTobar, Mery Ramírez-Muñoz, Ivís Fermín y William Senior..... 97

EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE MATERIA ORGÁNICA EN EFLUENTES DE TENERÍAS USANDO UN REACTOR POR CARGA SECUENCIAL CON BIOMASA GRANULAR

Estefanía Freytez-Boggio, María G. Pire-Sierra, Yelitza Mujica, María C. Pire-Sierra 117

INVENTARIO DE LA AVIFAUNA DE LA MICROCUENCA AGUADIAS, CUENCA ALTA DEL RÍO LA GRITA, TÁCHIRA, VENEZUELA

Luis G. Estela, Daria Pirela, Rosanna Calchi, Steffani C. Olivares y Anderson Saras 132

INSTRUCCIONES A LOS AUTORES..... 144

Vol.51, Nº2, Agosto 2017

UNA REVISTA INTERNACIONAL DE BIOLOGÍA
PUBLICADA POR LA
UNIVERSIDAD DEL ZULIA, MARACAIBO, VENEZUELA



Eficiencia de Remoción de Materia Orgánica en Efluentes de Tenerías Usando un Reactor por Carga Secuencial con Biomasa Granular.

Estefanía Freytez-Boggio, María G. Pire-Sierra, Yelitza Mujica, María C. Pire-Sierra

Universidad Centrocidental Lisandro Alvarado, Decanato de Agronomía, Programa de Ingeniería Agroindustrial. Barquisimeto, Estado Lara-Venezuela.
estefaniafreytez@ucla.edu.ve

Resumen

Se evaluó la eficiencia de remoción de materia orgánica del efluente de una tenería utilizando un reactor por carga secuencial (SBR) con biomasa granular. El experimento se condujo mediante un diseño completamente al azar con arreglo factorial regular de dos factores (duración de ciclo y secuencia de aireación) con dos niveles cada uno, generando cuatro tratamientos diferentes. La duración del tiempo de reacción para los tratamientos que incluyeron la secuencia anaeróbica-óxica fue: 25% anaeróbica y 75% óxica, mientras que para los restantes fue netamente óxica. La variable medida fue la demanda química de oxígeno total y soluble (DQOt y DQOs). La mayor remoción de DQO se obtuvo para el T_3 , donde se utilizaron ciclos de 24 h y secuencias de aireación anaeróbica-óxica, lográndose eficiencias de remoción de 49,5 y 65,6%, respectivamente. Se observó que los ciclos más largos y secuencias anaeróbico-óxico favorecieron la remoción de DQO. Adicionalmente, se demostró que la biomasa granular soportó la presencia de sustancias inhibitorias característica de estos efluentes industriales, aportando como ventaja la sedimentación en tiempos inferiores a dos minutos. Se concluye que el SBR con biomasa granular resultó ser una tecnología adecuada para remover la fracción biodegradable de efluentes complejos como los de tenerías.

Palabras clave: SBR; DQO; biomasa granular; secuencia aireación; duración ciclo.

Evaluation of the Efficiency of Removal of Organic Matter from Tannery Effluents Using a Sequential Batch Reactor with Granular Biomass.

Abstract

A sequential batch reactor (SBR) with granular biomass was used in order to remove the organic matter present in tannery wastewater. The experiment was conducted using a completely randomized design factorial arrangement with two factors (cycle time and sequence of aeration) with two levels each one, generating four different treatments. For those involving anaerobic-oxic sequence, the duration of reaction step was divided into 25% anaerobic and 75% oxic. The principal parameter measure was the chemical oxygen demand (COD, total and soluble form). It was found that the best treatment for the removal of soluble and total COD was T₃ using cycles of 24 h and anaerobic-oxic aeration sequence, achieving removal efficiencies of 49.5 and 65.6%, respectively. It was observed that the longer cycles and anaerobic - oxic sequence improved COD removal. Additionally, it was observed that the granular biomass adapted to the presence of inhibitory substances of these industrial effluents and brought advantages such as less sedimentation times (≈two minutes). Finally, SBR with granular biomass proved to be a suitable technology to remove the biodegradable fraction of complex effluents such as tannery.

Keywords: SBR; COD; granular biomass; aeration sequence; cycle duration.

Introducción:

El proceso productivo llevado a cabo en las tenerías consiste en transformar las pieles de animales en cueros con la aplicación de tratamientos químicos y la adición de surfactantes, colorantes organometálicos, agentes curtientes naturales o sales de cromo; generando contaminantes que pueden constituir un riesgo para el medio ambiente. Estas industrias se caracterizan por el alto consumo de agua que se necesita durante el proceso productivo, por lo que se generan efluentes residuales que son considerados entre los más problemáticos y difíciles de tratar (El-Sheikh *et al.* 2009).

Las aguas residuales que se generan en la industria de curtidos se caracterizan principalmente por la elevada carga orgánica, conductividad y presencia de metales pesados como el cromo. Estudios realizados por Orhon *et al.* (1999), Lefebvre *et al.* (2005) y Ganesh *et al.* (2006) y Pire-Sierra *et al.* (2014) muestran que los efluentes que se generan durante los procesos productivos en las tenerías poseen altas concentraciones de nitrógeno total (NT), sólidos suspendidos (SS) y demanda química de oxígeno (DQO), oscilando este último parámetro entre 2000 y 60.000 mg/L, siendo la fracción biodegradable muy variable (entre el 45 al 83% de la DQO).

Las aguas residuales generadas en las tenerías cuando se descargan directamente a un cuerpo de agua ocasionan efectos negativos en la vida acuática y en usos posteriores. Valores de materia orgánica como los señalados anteriormente en los efluentes de tenerías que son descargados sin tratamiento previo a receptores acuíferos como mares, ríos y lagos puede provocar desoxigenación de los mismos; debido a que los microorganismos van a consumir el oxígeno presente para degradar la materia orgánica; lo que ocasiona la muerte de la vida acuática presente en el medio (Metcalf y Eddy, 1995). Las características mencionadas anteriormente hacen necesario implementar un sistema de tratamiento que sea rentable y efectivo para que las empresas cumplan con las normativas requeridas para realizar la descarga adecuada al sitio de disposición final.

Los sistemas de lodos activados convencionales aplicados al tratamiento de las aguas residuales de tenerías han sido efectivos, ya que han logrado remover gran parte de los contaminantes; sin embargo, las altas concentraciones de materia orgánica y sales de cromo hacen que el tratamiento sea dificultoso, debido a que pueden inhibir el proceso de remoción realizado por los microorganismos. Como alternativa se presentan los reactores por carga secuencial (SBR) que son sistemas que se basan en ciclos de llenado y vaciado, donde todas las etapas (llenado, reacción y sedimentación) ocurren en un mismo reactor. Se presentan como opción válida para el tratamiento de efluentes de tenerías, debido a que han demostrado un buen potencial en la remoción de materia orgánica y por permitir una adecuación gradual de la biomasa a las características tóxicas o inhibitorias del efluente, gracias a los procesos cíclicos que se dan en el SBR (Farabegoli et al. 2004; Ganesh et al. 2006; Durai y Rajasimman 2011).

Los SBR se caracterizan por funcionar de forma discontinua y se basan en ciclos de llenado y vaciado que permiten la selección y enriquecimiento de la biomasa durante el tratamiento biológico, por lo que soportan tratar efluentes altamente contaminados, como son los provenientes de las tenerías; siendo particularmente empleados para la eliminación conjunta de materia orgánica y nutrientes (EPA 1999; Farabegoli et al. 2004).

En los tratamientos biológicos por lodos activados convencionales se presentan ciertas dificultades debido a los fenómenos de flotación, sedimentación y formación de espuma ocasionados por la presencia de organismos filamentosos, que se caracterizan por ser de difícil sedimentación en el tiempo adecuado. Estas dificultades han dado paso al proceso de granulación de biomasa en condiciones aerobias como alternativa para solucionar el problema de flotación del lodo o *bulking* que es común en dichos tratamientos (Pozo 2008).

Según Kreuk et al. (2005), la biomasa granular es un agregado de origen microbiano, que no coagula bajo condiciones de fuerzas de estrés reducidas y sedimenta significativamente más rápido que los flóculos de los lodos activos. El uso de esta biomasa ha resultado factible debido a que presenta ventajas en comparación con el sistema de lodos activados, reduciendo la cantidad de lodos producidos por dos

posibles vías; menor generación y/o menor volumen del lodo (Arrojo *et al.* 2007).

En este trabajo el objetivo es hacer la evaluación de la remoción de materia orgánica presente en el agua residual de una tenería mediante el uso de un reactor por carga secuencial con biomasa granular.

Materiales y métodos:

Origen del agua residual:

La presente investigación se llevó a cabo utilizando agua residual proveniente de una tenería ubicada en la antigua carretera Barquisimeto-Carora del Estado Lara, Venezuela. La empresa trabaja con pieles frescas de origen vacuno y caprino produciendo un agua residual altamente contaminante, con elevado contenido de DQO, nitrógeno, cromo y otras sales inorgánicas (Pire-Sierra *et al.* 2011). Ésta empresa trabaja de forma discontinua por lo que genera tres tipos de efluentes provenientes de las etapas de producción de pelambre, curtido y teñido, los cuales son conducidos a una laguna de almacenamiento de la cual se captaron las muestras analizadas durante la presente investigación.

La tenería almacena sus efluentes en dos lagunas que usa alternadamente, mientras descarga en una, la otra se deja secar por evaporación. En ellas ocurren procesos naturales de degradación y sedimentación, sirviendo además como tanques de homogenización en los que ocurre la precipitación del cromo remanente del proceso productivo, debido a la menor solubilidad del metal al pH del efluente de la laguna (Pire-Sierra *et al.* 2014).

El contenido de materia orgánica es uno de los problemas principales que tienen los efluentes de las tenerías, por lo que se determinó su eficiencia de remoción a través de la determinación de la DQO, utilizando un reactor por carga secuencial (SBR) con biomasa granular. Es importante destacar que el agua residual sólo había sido tratada de forma natural en las lagunas de almacenamiento, por lo que la presencia de compuestos inhibitorios y/o tóxicos como el cromo trivalente, aún se encontraba presente, pero no fueron objeto de estudio de esta investigación.

El agua residual fue caracterizada cada vez que se realizó la toma de muestra simple en la tenería, siguiendo los procedimientos establecidos en el método estándar (APHA-AWWA-WEF 2005) para la determinación de la demanda química de Oxígeno, DQO (SM-5220-C) que fue determinada tanto en su forma total (DQOt, muestra sin filtrar), como en su forma soluble (DQOs que se obtuvo mediante la filtración previa de la muestra utilizando una membrana de éster celulosa de 0,45 μm), nitrógeno total Kjeldahl, NTK (SM-4500 – Norg C), nitrógeno amoniacal, NH_4^+ (SM-4500-NH₃-B), pH (SM 1060 C), cromo trivalente (SM 3500-Cr A) y alcalinidad total (SM 2320₃ B).

Descripción del sistema:

Durante el experimento se utilizó un SBR de forma cilíndrica de 3 L de capacidad, construido de material acrílico transparente (Polimetilmetacrilato, PMMA), cuyo volumen útil fue de 2 L. Sus dimensiones fueron 50 cm de alto y 10 cm de diámetro. El reactor posee tres ojivas una en la parte alta a 34 cm del fondo por donde se realizó la carga del agua residual y dos ojivas en la parte inferior, una ubicada a 8 cm del fondo por donde se descargó el efluente tratado y la otra en la parte más baja del reactor y que se usó para la limpieza del sistema.

El reactor operó de manera automatizada mediante el uso de temporizadores digitales (Marca Exceline, Venezuela) que activaron y desactivaron cada uno de los componentes electrónicos utilizados durante el tratamiento del efluente industrial. La carga del reactor se realizó mediante la activación de una válvula solenoide ¼” (ASCO, México) que permitió la carga por gravedad del efluente y para la descarga del agua residual se contó con una bomba peristáltica (Easy Load II, Masterflex L/S, Cole Parmer, EEUU) que permitió la salida del efluente luego del tratamiento.

El suministro de aire se realizó mediante un difusor de burbujas finas colocado en el fondo del reactor conectado a un compresor marca Elite 801 (Hagen inc, China) de 3 PSI, 2,5 watt/h y flujo de 2.500 cc/min, que durante la fase óxica mantuvo en el sistema una concentración mínima de oxígeno de $2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (Fig. 1). Por otro lado, para los tratamientos que incluían fases anaeróbicas se burbujeó nitrógeno gaseoso desde el fondo del reactor mediante el uso de otro difusor de burbujas finas que permitió desplazar el oxígeno disuelto presente en el licor mezcla.

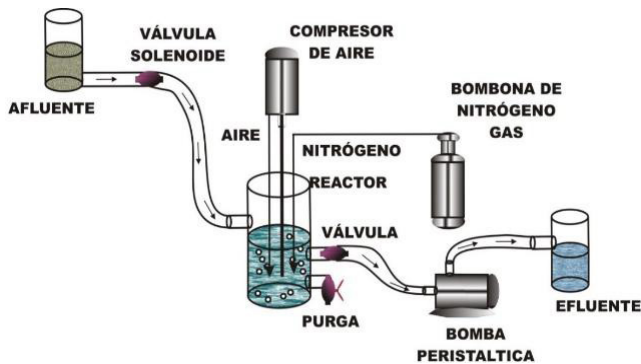


Figura 1. Esquema del reactor por carga secuencial SBR usado durante la investigación. (N_2 se usó sólo para los tratamientos anaeróbicos/óxicos)

La biomasa granular utilizada fue obtenida de un reactor biológico utilizado a escala de laboratorio que procesaba efluente sintético con características similares al de la tenería (Pire-Sierra et al. 2012). El experimento se condujo mediante un diseño completamente al azar con arreglo factorial regular de dos factores (duración del ciclo y secuencia de aireación) con dos niveles cada uno (6 y 24 h, secuen-

cias anaeróbico-óxico y solamente óxico) para un total de cuatro diferentes condiciones de operación que se denominaron tratamientos experimentales T₁, T₂, T₃ y T₄ (Tabla 1). La variable a medir fue la DQO tanto en su forma total como soluble.

Tabla 1. Tratamientos experimentales probados para la remoción de DQO en el SBR

Factores/Tratamientos	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄
Duración ciclo (h)	24	6	24	6
Secuencia aireación	Ox	Ox	An/Ox	An/Ox
Etapas:				
Llenado (min)	3	3	3	3
Reacción (min)	1430	350	1430	350
Sedimentación (min)	2	2	2	2
Descarga (min)	5	5	5	5

Para la evaluación de la eficiencia de remoción de DQO en el SBR se permitió un tiempo de aclimatación de 60 días antes de iniciar el primer tratamiento (Freytez-Boggio *et al.* 2015). Luego entre tratamientos se dio una semana de adaptación a las nuevas condiciones de operación del SBR. Durante la investigación se seleccionaron dos puntos de muestreo: agua residual cruda (alimentación del SBR) y agua residual tratada (salida del SBR). Los muestreos se realizaron con una frecuencia de dos veces por semana para un total de ocho repeticiones en el tiempo para cada tratamiento. Los resultados se analizaron mediante un análisis de varianza (ANOVA) seguido de una prueba de comparación de medias usando Tukey (Statistix versión 8.0).

Resultados

La caracterización del agua residual de la tenería se muestra en la Tabla 2, se puede observar como la mayoría de los parámetros se encuentran fuera de los límites de descarga establecidos en la normativa ambiental venezolana para la disposición de efluentes en cuerpos de agua (MARNR 1995), lo que significa que el efluente debe recibir un tratamiento adecuado para su correcta y segura disposición. Se puede observar que la DQO es el parámetro que se encuentra más alejado de los límites de descarga, representando uno de los problemas principales que debe atenderse durante el tratamiento del efluente industrial. El resto de los parámetros demuestra la complejidad en la composición del agua residual y aunque no fue monitoreado su comportamiento durante la investigación, se pudo evaluar la eficiencia del tratamiento biológico en un SBR ya que se conocía que el agua residual contenía inicialmente los niveles de cromo y nitrógeno señalados en la Tabla 2.

Tabla 2. Caracterización del agua residual de la tenería.

Parámetros	Concentración (mg/L)	Límites máximos o rangos (Decreto 883 Art. 10, 1995)
pH	9,28 ± 0,28	6 a 9
Alcalinidad	20.850 ± 597,22	---
NT	260,40 ± 39,10	40 mg/L
N-NH₄⁺	80,83 ± 13,22	---
N-NO₃⁻	2 ± 0	Nitrato+Nitrito: 10 mg/L
N-NO₂⁻	2 ± 0	Nitrato+Nitrito: 10 mg/L
DQO	5.584,74 ± 680,36	350 mg/L
DBO	2027,39 ± 765,92	60 mg/L
Cloruros	58.804,00 ± 101,82	1000 mg/L
Cromo Total	3 ± 0	2 mg/L
Conductividad	4.190 ± 677,41	--

Comportamiento de la DQO durante los tratamientos estudiados

La DQOt del efluente crudo varió entre 4.172 y 5.819 mg/L durante los cuatro tratamientos evaluados, mientras que la DQOs osciló entre 3.142 y 4.449 mg/L (Tabla 3). Las menores concentraciones de DQO del agua residual cruda fueron detectadas durante el T₄ debido a variaciones en el proceso productivo y en el volumen de agua residual generada por la empresa. A pesar de esto, la relación DQOs/DQOt permaneció relativamente constante para los cuatro tratamientos.

Los valores de DQOt del agua cruda de la tenería fueron similares a los reportados por otros investigadores que usaron estos efluentes de procesos productivos similares. Thanigavel et al. (2004) y Di Gisi et al. (2009) reportaron concentraciones promedios de 5.650 y 5.538 mg/L, respectivamente. Mientras que Kongiao et al. (2008) encontraron un rango más amplio para la DQOt comprendido entre 4.100 – 6.700 mg/L cuando trabajaron con efluentes de tenerías.

Tabla 3. Concentraciones de DQOt y DQOs en los tratamientos estudiados.

Variable	Etapa	T1	T2	T3	T4
DQOt (mg·L ⁻¹)	Alimentación	5.819,9 ± 490,61	5.819,9 ± 490,61	5.483,35 ± 150,12	4.172,46 ± 528,26
	Salida	3.369,6 ± 269,2	4.130,2 ± 291,84	2.812,5 ± 164,21	3.035,15 ± 927,56
DQOs (mg·L ⁻¹)	Alimentación	4.237,1 ± 226,94	4.237,1 ± 226,94	4.449,99 ± 200,79	3.142,62 ± 567,86
	Salida	2.372,4 ± 144,4	2.638,3 ± 289,69	1.525 ± 88,64	2.014,46 ± 625,65
DQOs/DQOt		0,728	0,728	0,81	0,75

Media seguida por letras distintas entre filas indica diferencias significativas, según la prueba de Tukey ($P \leq 0,05$).

En cuanto a la relación DQOs/DQOt los valores obtenidos durante el desarrollo de la presente investigación se encuentran entre 0,73-0,81, encontrándose ligeramente superiores a los señalados por Orhon *et al.* (1999) y Murat *et al.* (2002) quienes reportaron 0,57 y 0,62, respectivamente. Es importante conocer esta relación ya que aporta un aproximado de la cantidad de materia orgánica disuelta presente en el agua residual a tratar y que sería capaz de removerse por acción de los microorganismos (Méndez *et al.* 2010).

El análisis factorial de los tratamientos estudiados se muestra en la Tabla 4. Se observa que el mejor tratamiento para la remoción de DQO_t y DQO_s fue del T₃, donde se emplearon ciclos de 24h y secuencias de aireación anaeróbica-óxica ($p \leq 0,05$). Este tratamiento fue estadísticamente superior al resto de los probados, entre los cuales no se obtuvo diferencia significativa para la DQO_s, oscilando las remociones entre 37,1 y 43,9% ($p > 0,05$). Para la DQO_t se obtuvieron diferencias estadísticas en la remoción, siendo mayor para los tratamientos T₁ y T₃ (41,9% y 49,5%) en comparación con los tratamientos T₂ y T₄ (27,1% y 27,9%) que removieron menos DQO_t ($P \leq 0,05$).

Tabla 4: Remoción de DQO durante los tratamientos probados en el SBR.

Tratamientos	%Remoción DQOt	% Remoción DQOs
T ₁	41,9 a	43,9 b
T ₂	27,1 b	37,4 b
T ₃	49,5 a	65,6 a
T ₄	27,9 b	37,1 b

Media seguida por letras distintas entre filas indica diferencias significativas, según la prueba de Tukey ($P \leq 0,05$).

El comportamiento de T_3 fue similar al obtenido por Hermida et al. (2000) y Carrasquero et al. (2013), quienes trataron efluentes de tenería y registraron remociones de DQOt de 55% y 57%, respectivamente, pero inferiores a los obtenidos por Di Gisi et al. (2009) que reportaron porcentajes de remoción de la DQOt de 67%, luego de ser sometido el efluente de tenería a un tratamiento biológico y posterior tratamiento por ósmosis inversa.

Estadísticamente, la remoción de DQO_5 se vio afectada por los dos factores evaluados (secuencia de aireación y duración del ciclo). Las mayores remociones de DQO_5 se lograron cuando se emplearon secuencias anaeróbicas-óxicas y ciclos de 24 h, correspondiendo al T_3 . En cuanto a la DQO_t se observó que la mayor remoción se obtuvo para ciclos de 24 h, siendo independiente de la secuencia utilizada, lo que permite concluir que la secuencia de aireación no afectó la eficiencia de remoción de la DQO_t . En general, se observa en la Tabla 5 que los ciclos más largos (24 h) permitieron remover casi el doble de DQOt que las duraciones más cortas (6 h) en el SBR (45,7% vs. 27,5%).

Tabla 5: Remoción de DQO durante los tratamientos probados en el SBR

Tratamiento	Duración de ciclo	Secuencia de Aireación	%Remoción DQOt	% Remoción DQOs
T_1	24 h	Ox	41,9 a	43,9 b
T_2	6 h	Ox	27,1 b	37,4 b
T_3	24 h	An/Ox	49,5 a	65,6 a
T_4	6 h	An/Ox	27,9 b	37,1 b

Media seguida por letras distintas en cada fila indica diferencias significativas según la prueba de Tukey ($P \leq 0,05$).

Considerando la duración del tratamiento en el SBR, los ciclos de 24 h favorecieron la actividad de los microorganismos para degradar la materia orgánica presente en el agua residual de tenería. Resultados similares fueron reportados por Ganesh et al. (2006) quienes utilizaron un efluente pre-tratado de una tenería con ciclos óxicos de 12 h logrando remociones de 80%, mientras que Lefebvre et al. (2005) consiguieron remociones superiores de DQO ($\approx 95\%$). Sin embargo, Tunay et al. (2004) observaron que los ciclos de 12 y 24 h no presentaron diferencias estadísticas entre sí, lo que sugiere que para próximas investigaciones se pudiera variar la duración del ciclo en rangos menores a los probados durante el T_1 y T_3 , de manera de optimizar el funcionamiento del SBR y lograr tratar mayor volumen de agua residual por día.

En cuanto a la secuencia de aireación, la fase anaeróbica ayudó a alcanzar mayores porcentajes de remoción de la DQO, debido a que durante esos tratamientos las bacterias facultativas anaerobias fueron las responsables principales de la conversión de las moléculas orgánicas complejas en unidades más simples, generando de esta manera mayor concentración de sustrato fácilmente biodegradable para las bacterias heterótrofas aerobias que actuarán en la fase óxica siguiente del ciclo en el SBR. De esta manera, la sinergia lograda entre los microorganismos facultativos anaerobios y aeróbicos, favoreció la remoción neta de DQO. El beneficio de utilizar secuencias anaeróbicas y aeróbicas fue observado también por Murat *et al.* (2002) y Lefebvre *et al.* (2006) cuando trabajaron con efluentes de tenería y ciclos de 24 h obteniendo remociones de 90% y 95%, respectivamente. Ambas investigaciones concluyeron que se puede lograr mayor eficiencia de remoción de DQO con la combinación de procesos anaerobios/aerobios en efluentes de tenería.

Los tratamientos menos eficientes en cuanto a la remoción de la DQO fueron los T_2 y T_4 . El T_4 , que a pesar de contar con la ventaja que se mencionó anteriormente que es la secuencia de aireación anaerobia/óxica, este tratamiento no logró remover cantidades suficientes de la materia orgánica presente en el efluente de estudio debido presumiblemente a que la duración del ciclo de 6 h no fue suficiente para que la biomasa granular presente en el SBR llevara a cabo la máxima oxidación posible de los compuestos existentes.

La diferencia en las eficiencias del tratamiento biológico obtenidas en la presente investigación respecto a las otras, radicó particularmente en las características del proceso productivo y del agua residual producida, así como del tipo de cuero procesado y posibles pre-tratamientos a los que pudieron estar sometidos los efluentes en las diversas investigaciones. Lefebvre *et al.* (2005) observaron que las características del agua residual de tenería usada en su investigación mostraron baja biodegradabilidad ($DBO/DQO < 0,3$) y que su composición fue muy variable, dependiendo del origen y la naturaleza del cuero. A pesar de esto, lograron aplicar con éxito el proceso biológico de tratamiento. Por su parte, Ganesh *et al.* (2006) aplicaron un pre-tratamiento de coagulación-floculación al efluente crudo de la tenería, mejorando su calidad, y por tanto, favoreciendo la remoción de contaminantes y facilitando el tratamiento posterior en el SBR.

En la mayoría de los tratamientos estudiados se observó que la DQO alcanzó un valor relativamente constante al final del ciclo en el SBR. Esta observación fue realizada también por Carucci *et al.* (1999) y Di Iaconi *et al.* (2002) atribuyendo este comportamiento a las características recalcitrantes de la materia orgánica, es decir, que con sólo el tratamiento biológico no se lograría remover la DQO hasta los niveles exigidos en la normativa ambiental venezolana ($DQO < 350$ mg/L).

Por lo anteriormente mencionado, se puede decir que la eficiencia de un sistema biológico se pudiera medir en función del porcentaje de DQO biodegradable total (DQOBT) y no por el porcentaje de la DQO total. Investigaciones previas han demostrado que los efluentes de la tenería poseen una importante fracción de ma-

terial no biodegradable o inerte (Insel et al. 2009), particularmente estudios previos han demostrado que efluente generado en la tenería en estudio posee sólo 57% de materia orgánica biodegradable (Pire-Sierra et al. 2011), lo que quiere decir, que entre el 31,0 y 34,0 % de la materia orgánica, que representa la materia orgánica inerte, no puede ser removida por la aplicación de solamente procesos biológicos.

Considerando que el contenido de material no biodegradable no es susceptible a ser atacado por los microorganismos, se obtiene que la eficiencia del sistema biológico aplicado en la presente investigación realmente fue de 86,8% para el mejor de los tratamientos probados (T_3), indicando que el SBR es un tratamiento eficiente para la remoción de materia orgánica biodegradable. A pesar de esto el efluente debe ser sometido a un tratamiento terciario complementario, debido a que la DQO residual sigue superando el límite establecido en las leyes venezolanas (MARNR 1995).

Una de las principales razones de la baja biodegradabilidad del efluente en estudio se debe a la merma en la producción de cueros que en el último año ha tenido la tenería, lo que causa que durante el almacenamiento del agua residual en la laguna, los procesos de depuración naturales que allí ocurren logren remover en mayor grado los componentes fácilmente biodegradables de la DQO, quedando para el reactor biológico un agua residual más concentrada en lo que respecta a material inerte y difícil de tratar, afectando negativamente el rendimiento del sistema biológico.

Diversos autores han señalado que para lograr remover la DQO recalcitrante de efluentes de tenerías se requiere la aplicación de tratamientos terciarios o en su defecto la combinación de tratamientos oxidativos y biológicos, habiendo sido probado con éxito la aplicación de procesos fotocatalíticos luego del tratamiento biológico (Ekama y Wentzel 2008). Así mismo, para alcanzar mayores porcentajes de remoción de materia orgánica y nutrientes, se podrían incluir pre-tratamientos al agua residual. Según Merzouki et al. (2005) y Pire-Sierra et al. (2014), una pre-fermentación al agua residual cruda, ayudaría al incremento de la materia orgánica fácilmente biodegradable por la transformación de la DQO lentamente biodegradable a fácilmente biodegradable, la cual es aprovechada de una forma más fácil y efectiva por los microorganismos durante los procesos de degradación de la misma.

Finalmente, al evaluar el comportamiento de la biomasa granular se observó que sedimentó eficientemente en todos los tratamientos, lográndose la clarificación del efluente en tiempos inferiores a dos minutos. Esto se pudo corroborar mediante la observación, ya que la biomasa en el reactor sedimentaba en menos tiempo del estipulado y no se evidenciaba la presencia de lodo en el efluente tratado. Además, se demostró la baja o nula producción de lodo residual a ser manejado posteriormente en digestores, deshidratadores o lechos de secados. Se presume que las células muertas fueron descargadas aleatoriamente durante los ciclos del SBR, sin afectar notoriamente la calidad del efluente tratado. Estas características

operativas de rápida sedimentación y baja tasa de producción, permitiría la optimización de las duraciones de las etapas y fases en el SBR, así como facilita el manejo de los lodos residuales.

Luego de este análisis se concluye que el reactor por carga secuencial operado bajo la secuencia anaeróbico/óxico con duraciones de ciclos de 24 h resulta una alternativa viable para la remoción de materia orgánica biodegradable de los efluentes de las tenerías, además que la biomasa granular mostró su capacidad de adaptación y eficiencia en el tratamiento, a pesar de las características recalcitrantes y tóxicas que caracterizan a estos efluentes industriales.

Conclusiones:

- La mejor condición ensayada para remover DQO_t y DQO_s , en forma conjunta, fue T_3 donde se utilizaron ciclos de 24 h y secuencias de aireación anaeróbica- $\overset{3}{\text{ó}}\text{xica}$, lográndose eficiencias de remoción de 49,5% y 65,6% para la DQO_t y DQO_s , respectivamente.
- Los ciclos de 6 h en el SBR y sistemas óxicos netamente no fueron adecuados para el tratamiento del agua residual de la tenería, lográndose las menores remociones de DQO.
- La secuencia de aireación no tuvo efecto sobre la remoción de DQO_t , mientras que sí lo tuvo para la remoción de DQO_s . La remoción de DQO_s estuvo afectada tanto por la secuencia de aireación como por la duración del ciclo.
- El uso del SBR durante la investigación demostró las ventajas que tiene como sistema al permitir la selección y establecimiento de una biomasa altamente resistente a la presencia de sustancias inhibitorias característica de los efluentes de las tenerías, así como la buena y rápida sedimentabilidad del lodo.
- Finalmente, se concluye que el uso del SBR con biomasa granular fue adecuado para el tratamiento de efluentes complejos como el de la tenería, removiendo parte importante de la materia orgánica biodegradable.

Agradecimientos:

Esta investigación fue apoyada y financiada por el Consejo de Desarrollo Científico, Humanístico y Tecnológico de la Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado, UCLA - Barquisimeto, Venezuela, así como también por la Fundación Nacional de Ciencia y Tecnología (FONACIT) (Proyectos 009-RAG-2014 y 618-FAG-2013).

Literatura citada

- APHA-AWWA-WEF 2005 Standard methods for examination of water and wastewater. 20^a ed. American Public Health Association. Nueva York, EEUU.
- Arrojo, B., J. Vásquez, M. Figueroa, A. Mosquera, J. Campos y R. Méndez. 2007. Reactores de biomasa granular: más capacidad menos espacio. *Tecnología del agua*, 287: 3239.
- CARUCCI, A., A. CHIAVOLA, M. MAJONE Y E. ROLLE. 1999. Treatment of Tannery Wastewater in a Sequencing Batch Reactor. *Water Science and Technology*, 40:253-259.
- CARRASQUERO, S., M.C. PIRE-SIERRA, N. RINCÓN, M. MAS Y A. DÍAZ. 2013. Remoción de nutrientes en efluentes de tenerías utilizando un reactor por carga secuencial (SBR). *Revista Ciencia, Venezuela*, 21(3): 131-142.
- DI GISI, S., M. GALASSO Y G. DE FEO. 2009. Treatment of tannery wastewater through the combination of a conventional activated sludge process and reverse osmosis with a plane membrane. *Desalination*. 249: 337-342.
- DI IACONI, C., A. LOPEZ, R. RAMADORAI, A. DI PINTO Y R. PASSINO. 2002. Combined Chemical and Biological Degradation of Tannery Wastewater by a Periodic Submerged Filter (SBBR). *Water Res.* 36: 2205-2214.
- DURAI, G. Y M. RAJASIMMAN. 2011. Biological Treatment of Tannery Wastewater – A Review. *Journal of Environmental Science and Tecnology*. 4 (1): 1-17.
- EKAMA, G. Y M. WENTZEL. 2008. *Biological Wastewater Treatment: Principles, Modelling and Design*. Published by IWA Publishing, London, UK.
- EL-SHEIKH, M. A. 2009. Tannery wastewater pre-treatment. *Water Sci. Technol.* 60 (2): 433-440.
- EPA. 1999. Folleto informativo de tecnología de aguas residuales Reactores secuenciales por tandas. EPA 832/F/99/073. United States Environmental Protection Agency, Washington D.C., EEUU.
- FARABEGOLI, G., A. CARUCCI, M. MAJONE Y E. ROLLE. 2004. Biological treatment of tannery wastewater in the presence of chromium. *Journal of Environmental Management*. 71(4): 345-349.
- FREYTEZ-BOGGIO, E., R. SILVA, M.G. PIRE-SIERRA, L. MOLINA Y M.C. PIRE-SIERRA. 2015. Comportamiento fisicoquímico y microbiológico de un biorreactor durante la aclimatación de la biomasa granular usando efluentes de una tenería. *Revista ASA*, 1(4): 1-17.
- GANESH, R., G. BALAJI Y A. RAMANUJAM. 2006. Biodegradation of tannery wastewater using sequencing batch reactor – Respirometric assessment. *Bioresource Technology*. 97(15): 1815-1821.

- HERMIDA, V., S. GALISTEO Y S. VINAS. 2000. Evaluación respirométrica de la biodegradabilidad aeróbica de un efluente de curtiembre. Estructplan. Disponible on-line en: www.es-trucplan.com.mx. Visitado 1 de abril del 2015.
- INSEL, H., E. GÖRGÜN, N. ARTAN Y D. ORHON. 2009. Model based optimization of nitrogen removal in a full scale activated sludge plant. *Environmental Engineering Science*. 26(3): 471-479.
- KANGIAO, S., S. DAMRONGLERD Y M. HUNSOM. 2008. Simultaneous removal of organic and inorganic pollutants in tannery wastewater using electrocoagulation technique. *Korean J. Chem. Eng.* 25:703-709.
- KREUK, M.K., B. S. MCSWAIN, S. BATHE, S.T. TAY Y P.A. WILDERER. 2005. Discussion outcomes in: *Aerobic Granular Sludge*. Water and Environmental Management Series, IWA Publishing. 4: 162-169.
- LEFEBVRE, O., N. VASUDEVAN, M. TORRIJOS, K. THANASEKARAN Y R. MOLETTA. 2005. Halophilic biological treatment of tannery soaks liquor in a sequencing batch reactor. *Water Research*. 39: 1471-1480.
- LEFEBVRE, O., N. VASUDEVAN, M. TORRIJOS, K. THANASEKARAN Y R. MOLETTA. 2006. Anaerobic digestion of tannery soak liquor with an aerobic post-treatment. *Water Research*. 40: 1942-1500.
- MARNR. MINISTERIO DEL PODER POPULAR DEL AMBIENTE DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES. 1995. Normas para la clasificación y el control de la calidad de los cuerpos de agua y vertidos o efluentes líquidos. DECRETO 883. GACETA OFICIAL 5021. VENEZUELA.
- METCALF Y EDDY. 1995. *Ingeniería de Aguas Residuales. Tratamiento, Vertido y Reutilización*. Volumen I y II. Tercera edición. Editorial Mc Graw Hill.
- MÉNDEZ, R. I., R. GARCÍA, E. CASTILLOS Y M.R. SAURI. 2010. Tratamiento de lixiviados por oxidación fenton. *Revista Ingeniería e Investigación*. 30(1): 1-12.
- MERZOUKI, M., N. BERNET, J. DELGENÈS Y M. BENLEMLIH. 2005. Effect of prefermentation on denitrifying phosphorus removal in slaughterhouse wastewater. *Bioresource Technology*. 96: 1317-1322.
- MURAT, S., E. ATEŞ-GENCELİ, R. TASLI, N. ARTAN Y D. ORHON. 2002. Sequencing batch reactor treatment of tannery wastewater for carbon and nitrogen removal. *Water Sci. Technol.* 46(9): 219-225.
- ORHON, D., E. GENCELİ Y E. COKGÖR. 1999. Characterization and modelling of activated sludge for tannery wastewater. *Water Environment Research*. 71(1): 50-63.
- PIRE-SIERRA, M.C., K. RODRÍGUEZ, M. FUENMAYOR, Y. FUENMAYOR, H. ACEVEDO, S. CARRASQUERO Y A. DÍAZ. 2011. Biodegradabilidad de las diferentes fracciones de agua residual producidas en una tenería. *Revista científica, Ciencia e ingeniería Neogranadina*. 21(2): 5-19.

- PIRE-SIERRA, M.C., S. LÓPEZ-PALAU, J. DOSTA Y J. MATA-ÁLVAREZ. 2012. Biological treatment of tannery wastewater using a sequencing batch reactor with granular biomass. *Ecotechnologies for wastewater treatment*. Publicado en las memorias del evento. Santiago de Compostela, 25 al 27 de junio de 2012. 2 p.
- PIRE-SIERRA, M.C., S. CARRASQUERO, J. L. HERNÁNDEZ Y A. DÍAZ. 2014. Efecto de un tratamiento anaeróbico en la tratabilidad de aguas residuales de tenerías. *Revista de la Facultad de Ingeniería de la UCV*. 29(2): 41-50.
- POZO, M. 2008. Proceso de nitrificación en reactores secuenciales discontinuos SBR (SEQUENCING BATCH REACTOR) con biomasa granular. Tesis no publicada para la obtención del título de Ingeniero Ambiental. Escuela politécnica Nacional. Quito.
- THANIGAVEL, M. 2004. Biodegradation of tannery effluent in fluidized bed bioreactor with low density biomass support. Tesis no publicada, Annmalai University, Tamilnadu, India.
- TUNAY, O., I. KABDASH Y O. GUN. 2004. Sequencing batch reactor treatment of leather tanning industry wastewaters. *Fresenius Environmental Bulletin*. 13- (10): 945-950.



UNIVERSIDAD
DEL ZULIA

**BOLETÍN DEL CENTRO DE
INVESTIGACIONES BIOLÓGICAS**

Vol.51 N° 2_____

*Esta revista fue editada en formato digital y publicada
en agosto de 2017, por el **Fondo Editorial Serbiluz**,
Universidad del Zulia. Maracaibo-Venezuela*

www.luz.edu.ve
www.serbi.luz.edu.ve
produccioncientifica.luz.edu.ve