

Tratamiento biológico de desnitrificación de aguas residuales usando un reactor de biopelícula con cáscara de arroz como fuente de energía

Biological treatment of denitrification in wastewater using a biofilm reactor with rice shell as energy source

Joseph J. Sánchez-Balseca¹

Isaías M. Muñoz-Rodríguez²

María Belén Aldás-Sandoval³

¹Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, joseph.sanchezb@epn.edu.ec

²Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, marcelo.munoz@epn.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0003-1457-6492>

³Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, maria.aldas@epn.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-0191-9647>

Autor para correspondencia: Joseph J. Sánchez-Balseca,
joseph.sanchezb@epn.edu.ec

Resumen

Se evaluaron dos sistemas de tratamiento biológico de desnitrificación en aguas residuales utilizando reactores anaerobios de biopelícula con diferente fuente externa de energía. El primer sistema empleó metanol como fuente de carbono (sistema convencional) y, el segundo, sustrato de cáscara de arroz; ambos operaron con tiempos de retención hidráulicos de 2.38, 5.56, 6.67, y 8.33 horas, con una alimentación de nitratos de 40 mg NO³⁻/l. El sistema con sustrato de cáscara de arroz tuvo mayor eficiencia en la remoción de nitratos, con 97.58%, mientras que el sistema con metanol tiene una eficiencia de 93.46%, para el mismo tiempo de retención. Los dos sistemas tienen un comportamiento similar en la remoción de carga orgánica, con una eficiencia máxima de 94%. La

concentración de biomasa en el reactor con sustrato de cáscara de arroz es 14 286 mg/l, siendo mayor a la del reactor con metanol, que es de 10 220 mg/l. El coeficiente de producción de biomasa, Y , es de 0.007, y de 0.0045 para el reactor con metanol y con cáscara de arroz, respectivamente, lo que indica una baja generación de lodo.

Palabras clave: desnitrificación, cáscara de arroz, biopelícula, tratamiento biológico de aguas residuales, metanol, producción más limpia.

Abstract

Two systems of biological treatment of denitrification in wastewater were evaluated, using anaerobic biofilm reactors with different external energy source. The first system used methanol as carbon source and the second used a substrate of rice shell. Both systems operated with hydraulic retention times of 2.38, 5.56, 6.67 and 8.33 hours and a supply of 40 mg NO_3^-/l . The system with substrate of rice shell presented high nitrate removal efficiency, of 97.58%, and the system with methanol had an efficiency of 93.46%, for the same retention time. The systems had similar performance in the organic load removal, with a maximum efficiency of 94%. The biomass concentration in the reactor with the substrate of rice shell, with a value of 14 286 mg/l, is higher than the one in the reactor with methanol, with a value of 10 220 mg/l. The mass production coefficient, Y , was of 0.007 and 0.0045, for the reactor with methanol and the reactor with substrate of rice shell, respectively, representing a low generation of sludge.

Keywords: denitrification, rice shell, biofilm, biological treatment of wastewater, methanol, cleaner production.

Recibido: 04/08/2017

Aceptado: 31/07/2018

Introducción

Producto de la industrialización y producción a gran escala se ha incorporado una alta concentración de nitratos en el recurso hídrico, degradando su calidad y, por lo tanto, la salud humana (OMS, 2003).

Los tratamientos de depuración que existen en la actualidad se clasifican en físico-químicos y biológicos, pero la problemática de los tratamientos físico-químicos es la transformación de contaminantes en otros más o menos perjudiciales; mientras que los tratamientos biológicos degradan el contaminante en sus componentes básicos, ayudando a cerrar los ciclos de vida de los elementos (Pozo, 2008).

Considerando que en el Ecuador poca importancia se ha dado a la investigación para el desarrollo de tratamientos de depuración terciarios de aguas residuales, y dentro de éstos, los biológicos de desnitrificación, se ha procedido a replicar modelos estudiados en otros países sin considerar el contexto de materias primas existentes y útiles en el país, haciendo que la aplicabilidad de estas tecnologías sean muy costosas (Gervacio, 2007).

La tecnología que hace uso de reactores anaerobios de biopelícula en la actualidad trabaja con metanol como fuente de energía para el desarrollo biológico, así como también para la degradación de nitratos; el metanol es un compuesto costoso y su aplicación a gran escala lo hace un producto de difícil manipulación; estos factores limitan la aplicabilidad de tales sistemas de depuración en el Ecuador (Ávila, Razo, & Gómez, 2003).

Como alternativa al uso de sustancias químicas antes mencionadas aparece el uso de materiales naturales, como astillas de madera, aserrín, paja, algodón, mazorcas de maíz, algas marinas, cortezas, etcétera, que debido a su bajo costo, disponibilidad y comprobada eficiencia están siendo investigados en proceso de remoción de nitratos (Wang & Chu, 2016).

Si no se considera evaluar el comportamiento de materias existentes en la producción interna del Ecuador para el aporte de energía en los tratamientos terciarios de reactores de biopelícula para desnitrificación; no se crearán tecnologías más económicas y aplicables en el país, y las tasas de enfermedades producidas por una alta concentración de nitratos en el agua no decrecerán; por ejemplo, la cantidad de niños recién nacidos que padecen la enfermedad del "bebé azul", producto de la interacción de los nitratos con la hemoglobina, ha incrementado la tasa de mortalidad en los recién nacidos; asimismo, se ha identificado casos de trastornos en las mujeres embarazadas cuando ingieren cantidades altas de nitratos, principalmente malformaciones que afectan al sistema nervioso central, al

muscular o al óseo (OMS, 2003).

Otro de los temas que favorece una alta concentración de nitratos en el agua es la eutrofización de los recursos hídricos; producto de la acción antrópica, el nivel de calidad de vida disminuirá en ríos, lagos, estuarios, etcétera (Romero, 2010). Si se realiza la evaluación de materias que sustituyan al metanol, aportando la cantidad de energía apropiada a las tecnologías biológicas de depuración de aguas residuales, los costos que involucran los tratamientos terciarios disminuirán y su aplicabilidad en el contexto ecuatoriano será una realidad, disminuyendo y eliminando las enfermedades producidas por la interacción entre el ser humano y la concentración de nitratos; también fortalecerá la gestión integral del recurso hídrico debido al control de la eutrofización.

Frente a lo expuesto, esta investigación propone fortalecer la teoría de producción limpia (Rojas & Leopoldo, 2012). Se utilizaron desperdicios de la industria, con el propósito de ser fuente de energía en procesos de tratamiento de aguas residuales con alto contenido de nitratos; específicamente se utilizó la cáscara de arroz, residuo de la industria arrocera en el Ecuador, para ser utilizada como fuente de energía en los procesos microbiológicos de depuración de aguas.

El alcance de la investigación es determinar el comportamiento de la remoción de altas concentraciones de nitratos mediante la evaluación comparativa del proceso de desnitrificación en un sistema compuesto por un reactor anaerobio de biopelícula con fuente externa de carbono de cáscara de arroz, y un sistema compuesto por un reactor anaerobio de biopelícula con fuente externa de carbono de metanol. Los reactores fueron evaluados en modelos de laboratorio.

Se pretende así sustituir el metanol que actúa como fuente de energía externa convencional para el proceso de desnitrificación, con el objetivo de proporcionar una alternativa económicamente factible y aplicable en los tratamientos secundarios de depuración de aguas en el contexto ecuatoriano.

Materiales y métodos

Se construyeron dos modelos similares de reactores, difiriendo en la fuente de carbono que se adiciona, para que se produzca el proceso de desnitrificación; uno de los sistemas trabajó con metanol y el otro lo hizo con una fuente orgánica de sustrato: la cáscara de arroz.

La operación simultánea de estos dos modelos permitió evaluar el funcionamiento, desarrollo y eficiencia del proceso de desnitrificación. Los modelos de reactores construidos en laboratorio se diseñaron con un volumen de 1 l; este valor consideró el caudal máximo utilizado en la presente investigación, y que se relaciona de modo directo con el tiempo de retención referido por la bibliografía (Antoine, 1974).

Se utilizó grava fina (5-10 mm) como material para distribuir de forma uniforme el flujo de la solución acuosa dentro de los reactores, así como del contenedor del material carbonoso (cáscara de arroz), suficiente para cubrir una altura de 3.5 cm. El material que se empleó como medio de soporte de la biomasa es tereftalato de polietileno, en unidades cuadradas de 2 cm de lado; el tereftalato de polietileno es un material inerte.

El rango de concentración de nitratos en el agua de ingreso al sistema que se consideró como referencia es de 30 a 40 mg/l; este rango corresponde al nivel de nitratos presentes en el agua residual doméstica completamente nitrificada (Cuevas & Tejero, 2007).

Se consideraron como alternativas de compuestos químicos a ser utilizados para nitrificar el agua (40 mg NO_3^-/l) al nitrato de sodio y al nitrato de potasio. La opción más adecuada fue el nitrato de sodio debido a que mantiene el valor del potencial hidrógeno más alto que el nitrato de potasio; además, la cantidad de nitrato de sodio por litro de agua que se requiere para nitrificarla es menor.

La cantidad de metanol que se requiere para realizar de manera adecuada el proceso de desnitrificación está basado en los estudios de laboratorio que McCarty desarrolló a través de una ecuación empírica que describe la reacción general de remoción de nitrato (Metcalf & Eddy, 1972). Utilizando la ecuación empírica se requirió de 0.028 ml de metanol por cada litro de agua alimentada al sistema para que se realice de manera adecuada el proceso de desnitrificación.

El parámetro de la demanda química de oxígeno, derivada de la alimentación de metanol, permitió modelar la cantidad de material orgánico en el sistema de desnitrificación con fuente de energía externa de sustrato de cáscara de arroz. Se realizaron pruebas que relacionaron el volumen de los envases con la materia orgánica (cáscara de arroz) y los

valores de DQO; se encontró que un volumen de tres litros de materia carbonosa tiene un valor de DQO semejante al valor referencial, que es de 70 mg/l, que corresponde a la solución de metanol con el agua.

Los parámetros de control considerados más importantes en el proceso de desnitrificación fueron los siguientes: temperatura, concentración de nitratos, demanda química de oxígeno soluble, potencial hidrógeno tanto en el afluente como en el efluente; asimismo, se realizó el análisis de sólidos al lodo resultante de la investigación (Suarez & Jácome, 2007); esto permitirá desarrollar un análisis comparativo entre los dos modelos que poseen distinta fuente externa de carbono en su funcionamiento, al igual que la eficiencia obtenida con cada uno de los modelos de laboratorio diseñados.

Para la medición de los parámetros físicos y químicos de la presente investigación se utilizaron los métodos propuestos por la Asociación Americana de Salud Pública, la Asociación Americana de Trabajos en Agua, y la Federación de Agua Ambiental, en su libro "Métodos Estándar para el Análisis de Agua y Agua Residual" (1999). En la Figura 1 se muestra un esquema de la instalación de los dos reactores.

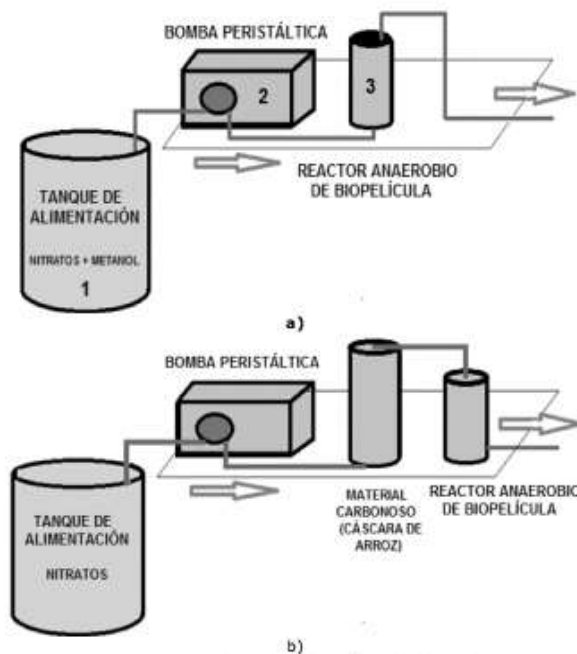


Figura 1. Esquema de instalación de los birreactores: a) con metanol, b) con cáscara de arroz.

En la Figura 1a se observa el esquema del reactor anaerobio alimentado con metanol, el mismo que es mezclado con el agua en el tanque de alimentación. La capa que constituye el medio de soporte del reactor estuvo contenida en un volumen de un litro; la capa de grava fina no se considera en el volumen del reactor.

Para la operación del reactor anaerobio de biopelícula con medio de soporte y sustrato de cáscara de arroz como fuente externa de energía, que se observa en la Figura 1b, se necesitó la implementación de un recipiente preliminar al reactor que contenga el material carbonoso: la cáscara de arroz. Este reactor fue construido con flujo descendente, manteniendo las mismas características del reactor anaerobio con fuente externa de energía de metanol. En la Tabla 1 se describen las características de construcción de los reactores.

Tabla 1. Dimensiones de los reactores anaerobios alimentados con metanol, y con cáscara de arroz y del recipiente contenedor del material carbonoso.

Magnitud	Unidades	Reactor con metanol	Reactor con cáscara de arroz	Contenedor material carbonoso
Diámetro del reactor	cm	12	12	14
Altura de la grava fina	cm	3.5	-	3.5
Altura del medio de soporte	cm	8.9	8.9	-
Altura del material carbonoso	cm	-	-	16
Volumen total del reactor	L	1	1	3
Área específica	m ² /m ³	960	1 075.95	-
Volumen útil del reactor	l	0.91	0.91	-

El tiempo de retención de funcionamiento para los reactores anaerobios es el mismo para ambos sistemas. La variación del tiempo de retención hidráulico está en relación directa con el caudal de alimentación. El rango que se consideró para el análisis fue tiempo de retención de 2.38 a 8.33 horas y un caudal de 7 a 2 ml/min; se consideró este rango debido a que a valores más altos de 7 ml/min, la eficiencia de la desnitrificación era de

cero, y el mínimo caudal que se alcanzó con la bomba peristáltica fue de 2 ml/min, valores aplicados para un volumen de reactor de un litro.

El periodo de funcionamiento es la duración en la que el sistema de desnitrificación funciona en un mismo tiempo de retención hidráulico y caudal. En el arranque del reactor, al caudal inicial de 7 ml/min, se utilizó el periodo más largo, pues se esperaba que se realizara la aclimatación y estabilización de los microorganismos al nuevo medio. Además, se hicieron muestreos para determinar el valor de cada parámetro en periodos de cuatro horas (seis análisis por día). En la Tabla 2 se muestran los tiempos de retención y el periodo de funcionamiento de los reactores.

Tabla 2. Tiempos de retención y caudales de funcionamiento.

Tiempo de retención	Caudal	Periodo de funcionamiento
h	ml/min	D
2.38	7	55
5.56	3	17
6.67	2.5	19
8.33	2	21

Resultados

Reactor con sustrato de metanol (R1)

En promedio, la concentración de nitratos en el efluente a un tiempo de retención hidráulico de 2.38 horas es de 23.14 mg/l, con una eficiencia promedio de 28.47%; para un tiempo de retención hidráulico de 8.33 horas es de 2.21 mg NO³⁻/l, con una eficiencia promedio de remoción de 93.46%.

El presente análisis tiene como nivel de referencia para agua potable el valor indicado por la Agencia de Protección Ambiental (EPA, por sus siglas en inglés) (10 mg/L) (EPA, 2012).

Tomando el nivel de referencia de la EPA para agua potable, los tiempos de retención hidráulico van desde 6.67 horas, con una eficiencia de 81.46%. A continuación se presenta en la Figura 2 el comportamiento de la eficiencia de remoción de nitratos para R1.

Como se observará, para cumplir con el límite establecido por la EPA, se requiere una eficiencia mayor a 70% y un tiempo de retención hidráulico mayor a seis horas; en todo caso, si se requiere una mayor remoción de nitratos se debe aumentar el valor del tiempo de retención, al igual que los parámetros relacionados.

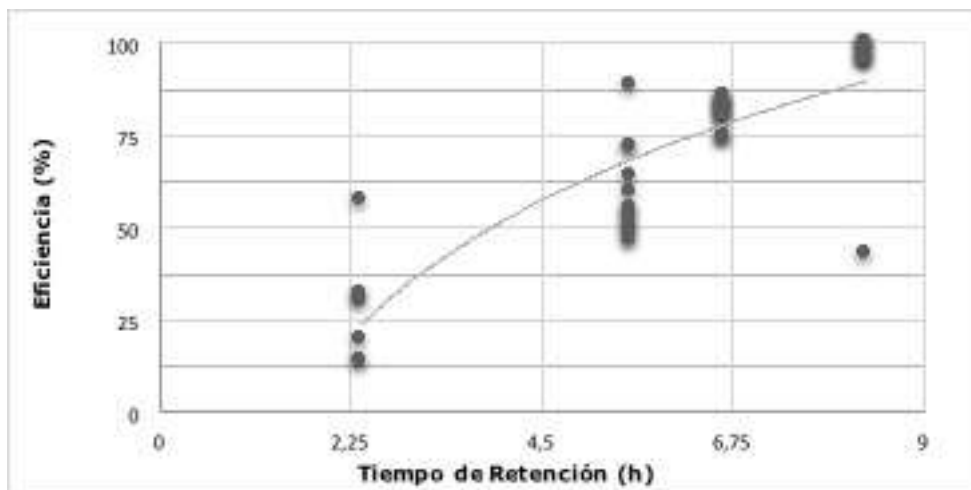


Figura 2. Eficiencia de desnitrificación para R1.

La curva de eficiencia de la desnitrificación se ajusta a una ecuación logarítmica, de la forma:

$$\% \text{ Eficiencia} = 52.537 \times \ln(\text{tiempo de retención}) - 21.535 \quad (1)$$

Al ser la eficiencia de remoción de nitratos inversamente proporcional al caudal, la carga volumétrica también lo es, obedeciendo a una curva logarítmica, que se aprecia en la Figura 3.

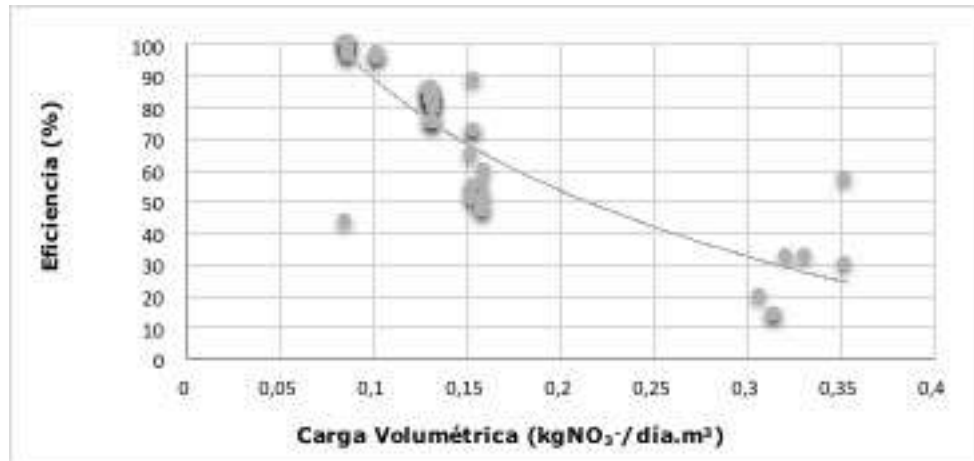


Figura 3. Eficiencia de desnitrificación vs. carga volumétrica.

El parámetro de carga volumétrica presenta valores de 0.086 a 0.30 kg NO³⁻/m³.día, a tiempos de retención hidráulicos de 8.33 horas y 2.38 horas, respectivamente, teniendo un valor promedio de 0.16 kg NO³⁻/m³.día.

La carga volumétrica es inversa al tiempo de retención hidráulico. La curva logarítmica que se genera es:

$$\% \text{ Eficiencia} = -51.68 \times \ln(\text{carga volumétrica}) - 29.4 \quad (2)$$

El R1 presenta además valores de eficiencia de remoción de material orgánico satisfactorios. El rango de eficiencias de remoción de material orgánico es de 82 a 94%, a tiempos de retención de 2.38 a 8.33 horas, respectivamente, con un valor promedio de 91%, valores que pueden observarse en la Figura 4.

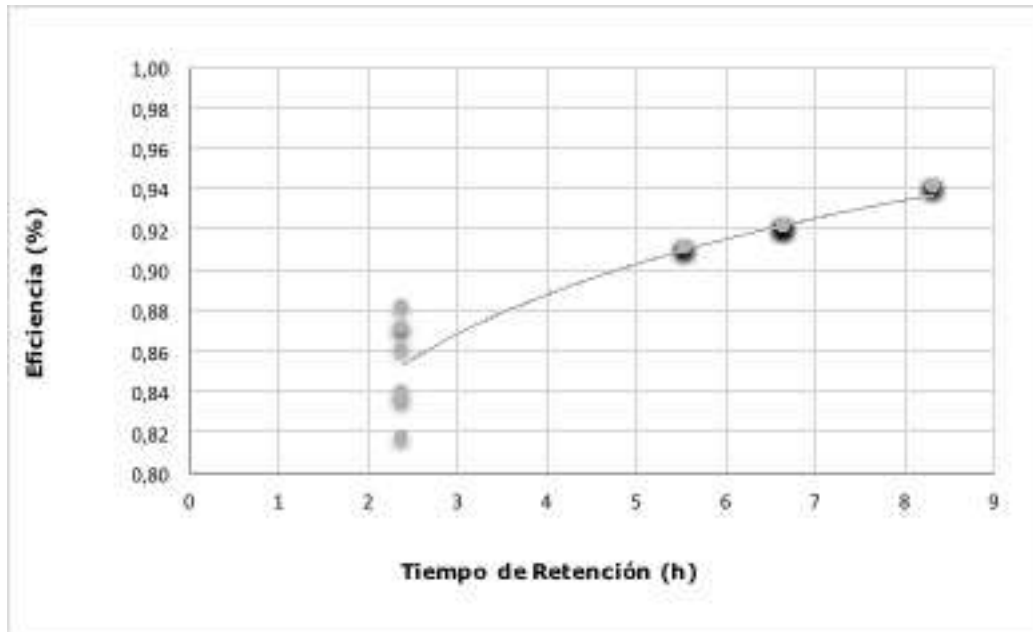


Figura 4. Remoción de materia orgánica vs. Tiempo de retención.

Los porcentajes de remoción de la materia orgánica son mayores a los alcanzados en la remoción de nitratos, por lo que el efluente presenta una calidad aceptable en cuanto a concentración de DQO.

La curva logarítmica generada es la siguiente:

$$Eficiencia = 0.0672 \times \ln(\text{tiempo de retención}) + 0.79 \quad (3)$$

Del análisis de sólidos realizado se determina que 9.3 g del lodo formado en el reactor de biopelícula con fuente externa de carbono corresponde a la biomasa; 31 % de los sólidos totales está compuesto por sólidos suspendidos volátiles, es decir, el lodo se caracteriza por ser un lodo estable. En la Tabla 3 se observan los valores de los sólidos obtenidos.

Tabla 3. Valores para los sólidos presentes en el R1.

Tipo	Masa	Porcentaje
	g	%
Sólidos suspendidos totales, SST	29.7	100

Sólidos suspendidos fijos, SSF	20.4	69
Sólidos suspendidos volátiles, SSV	9.3	31

A partir de los valores obtenidos se calculan los siguientes parámetros:

- Relación biomasa-carga orgánica. Se determina mediante la expresión:

$$Y = \frac{\text{Biomasa}}{\text{Carga Orgánica Total}} = 0.007 \quad (4)$$

Este valor significa que por cada kg de DQO alimentado se desarrolla 0.007 kg de biomasa expresada como SSV.

- La concentración de biomasa se calcula mediante:

$$Y = \frac{\text{SSV}}{\text{Volumen útil}} = 10220 \frac{\text{mg}}{\text{L}} \quad (5)$$

Relación carga orgánica-superficie específica. La relación entre la carga orgánica y la superficie específica tiene como variable principal el tiempo de retención hidráulico, el que tiene relación con el flujo volumétrico, y con la cantidad de materia orgánica alimentada al reactor anaerobio de biopelícula; estos datos se observan en la Tabla 4, y son calculados mediante la expresión:

$$\frac{\text{Carga Orgánica}}{\text{Superficie Específica}} = \frac{[\text{DQO}] \times \text{Caudal}}{\text{Volumen reactor} \times \frac{\text{Sup.Esp.}}{\text{Volumen}}} \quad (6)$$

Tabla 4. Relación carga orgánica vs. superficie específica en función del tiempo de retención.

Tiempo de retención	Caudal	DQO prom.	Superficie específica	Carga orgánica/superficie específica
h	mL/min	mg/l	m ² /m ³	kg/día.m ²

2.38	7	72.79	960	0.000764
5.56	3	80.86	960	0.000364
6.67	2.5	76.55	960	0.000287
8.33	2	70.43	960	0.000211

Reactor con sustrato de cáscara de arroz (R2)

El rango de las eficiencias de remoción de nitratos en el reactor anaerobio de biopelícula con fuente externa de carbono de la cáscara es de 20.28 a 97.58%, con tiempos de retención hidráulicos de 2.38 y 8.33 horas, respectivamente, con un valor promedio de eficiencia general de 80.77%, lo que se aprecia en la Figura 5.

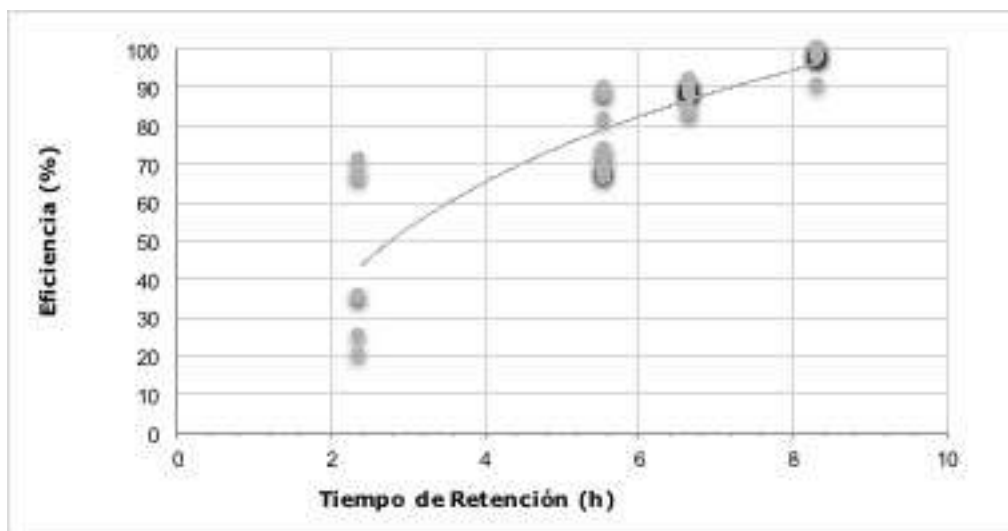


Figura 5. Eficiencia de desnitrificación para el R2.

A partir del tiempo de retención hidráulico de 5.56 horas se cumple con el nivel máximo permisible para agua potable de 10 mg NO³⁻/l, propuesto por la EPA (EPA, 2012). El comportamiento de este reactor es similar al

del R1, dado que con tiempos de retención hidráulicos de unas seis horas se obtiene un efluente aceptable de acuerdo con el límite indicado.

La eficiencia de remoción de nitratos en el reactor alimentado con cáscara de arroz obedece a una curva logarítmica, expresada como:

$$\% \text{ Eficiencia} = 41.9 \times \ln(\text{tiempo de retención}) + 7.11 \quad (7)$$

Los niveles de eficiencia de remoción de materia orgánica están en el rango de 92% a 94%, con un valor promedio de eficiencias de remoción de materia orgánica en el funcionamiento general igual a 93%; siendo en su mayoría constantes debido a la relación con el DQO entrante, como se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5. Valores promedio de DQO de entrada y salida, eficiencia de remoción de materia orgánica y su relación con el tiempo de retención hidráulico.

Tiempo de retención hidráulico	DQO afluente	DQO efluente	Eficiencia
h	mg DQO/L	mg DQO/L	%
2.38	62	5	92
5.56	191	11	94
6.67	234	16.4	93
8.33	303	24	92

El rango de la carga volumétrica en el funcionamiento del reactor anaerobio de biopelícula es de 0.086 a 0.40 kg NO³⁻/m³.día, a tiempos de retención hidráulicos de 8.33 y 2.38 horas, respectivamente, con un valor de carga volumétrica promedio general de funcionamiento de 0.16 kg NO³⁻/m³.día, lo que se aprecia en la Figura 6.

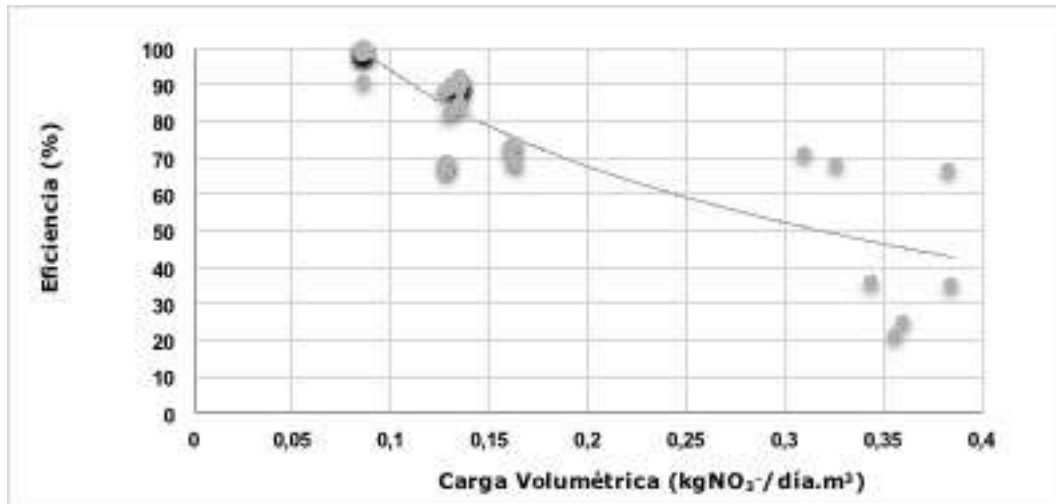


Figura 6. Eficiencia de desnitrificación vs. carga volumétrica.

La tendencia que describe el comportamiento entre la carga volumétrica y la eficiencia de remoción de nitratos, se ajusta de manera adecuada a una curva logarítmica, así:

$$\% \text{ Eficiencia} = -38.01 \times \ln(\text{carga volumétrica}) + 6.45 \quad (8)$$

Del análisis de sólidos se determina que 12.9 g del lodo formado en el reactor de biopelícula con fuente externa de carbono corresponde a la biomasa; 25% de los sólidos totales está compuesto por sólidos volátiles, es decir, el lodo se caracteriza por ser un lodo estable. En la Tabla 6 se observan los valores de los sólidos obtenidos.

Tabla 6. Valores para los sólidos presentes en el R2.

Tipo	Masa	Porcentaje
	g	%
Sólidos suspendidos totales, SST	52.4	100
Sólidos suspendidos fijos, SSF	39.5	75
Sólidos suspendidos volátiles, SSV	12.9	25

Como en el caso anterior, con estos valores se calculan los siguientes parámetros:

- Relación biomasa-carga orgánica. Se determina mediante la expresión (4):

$$Y = 0.0045 \quad (4)$$

El reactor con fuente de carbono externa de cáscara de arroz genera por cada kg de DQO alimentado, 0.0045 kg de biomasa expresada como SSV.

- Concentración de biomasa, se calcula mediante la ecuación (5):

$$Y = 14286 \frac{mg}{L} \quad (5)$$

- Relación carga orgánica-superficie específica. Estos datos se calculan a partir de la ecuación (5), y se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7. Relación carga orgánica vs. superficie específica en función del tiempo de retención.

Tiempo de retención	Caudal	DQO prom.	Superficie Específica	Carga orgánica/ superficie específica
h	ml/min	mg/l	m ² / m ³	kg / día.m ²
2.38	7	62	1 075.95	0.00058
5.56	3	191	1 075.95	0.00077
6.67	2.5	234	1 075.95	0.00078
8.33	2	303	1 075.95	0.00081

Discusión

De la observación de los resultados obtenidos se determinó que el sistema biológico de desnitrificación con fuente de carbono de sustrato de cáscara de arroz cumplió con el nivel de referencia propuesto por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos de 10 mg/l de nitratos, a partir de 5.56 horas de tiempo de retención hidráulico; mientras que en el sistema biológico con alimentación externa de carbono de metanol se cumple con este nivel de referencia a partir de 6.67 horas; así puede decirse que en ambos reactores un aumento en el tiempo de retención hidráulico provoca una mayor eficiencia tanto en la remoción de nitratos como en la remoción de materia orgánica (en valores cercanos a 99 y 94%, respectivamente), lo que ha sido corroborado en estudios similares (Capodaglio, Hlavínek, & Raboni, 2016).

El sistema biológico de desnitrificación con fuente de carbono de cáscara de arroz presentó mayor eficiencia en la remoción de nitratos en todos los tiempos de retención hidráulicos analizados; esto se debe a la presencia del material carbonoso que es descompuesto en moléculas menores que después son utilizadas por los microorganismos desnitrificantes (Wang & Chu, 2016). Además, la cáscara de arroz provee una adecuada superficie para que los microorganismos formen una biopelícula sobre ella (Lu *et al.*, 2017).

Ambos reactores trabajaron con cargas volumétricas similares para cada tiempo de retención, siendo mayores las cargas a menor tiempo de retención, provocando condiciones adecuadas en los efluentes obtenidos; así, el sistema biológico de desnitrificación con fuente de carbono de sustrato de cáscara de arroz cumple con el nivel de referencia propuesto por la EPA, de 10 mg/l cuando la carga volumétrica promedio de nitratos óptimo es igual o menor de $0.15 \text{ kg NO}_3^-/\text{m}^3\cdot\text{día}$; mientras que en el sistema biológico con alimentación externa de carbono de metanol cumple con este nivel de referencia cuando la carga volumétrica promedio de nitratos óptima es igual o menor de $0.13 \text{ kg NO}_3^-/\text{m}^3\cdot\text{día}$.

Se evidencia la baja producción de lodo ($Y = 0.007$ y 0.0045), y la alta concentración de biomasa en los reactores (10 220 y 14 286 mg/l), para el reactor con fuente de metanol y con fuente de sustrato de cáscara de arroz, respectivamente. Los valores de la relación biomasa-carga orgánica indican que el reactor con cáscara de arroz produjo menor cantidad de

lodos; estos valores son inferiores a los reportados en proceso de desmitificación (0.054 y 0.12) en un reactor de biopelícula (Ambrosio & Tejero, 2000). Además, presentó mayor cantidad de biomasa, lo que se ve reflejado en las eficiencias de remoción de materia orgánica, que son mayores que las del otro sistema que trabaja con metanol, indicando que a mayor generación de biomasa, la capacidad de tratamiento del sistema se incrementa (Torresi *et al.*, 2017). Se alcanzaron remociones mayores tanto de nitratos como de materia orgánica mediante el empleo de una fuente de energía poco costosa, lo que convierte a este sistema con cáscara de arroz en una alternativa tecnológica viable (Wang & Chu, 2016).

Conclusiones

Los sistemas biológicos estudiados alcanzaron niveles adecuados de eficiencia en el proceso de desnitrificación con fuente de carbono externo. Además se encontró que ambos sistemas alcanzan altos niveles de remoción de material orgánico presente en el agua.

Se encontró que a menor tiempo de retención hidráulico en el sistema con cáscara de arroz se obtuvieron mayores eficiencias que en el sistema biológico de desnitrificación con fuente de carbono de metanol. Por otra parte, pudo determinarse que la remoción de nitratos es más rápida en el sistema biológico que es alimentado con sustrato de cáscara de arroz, que aquella del sistema alimentado con metanol; además, la carga volumétrica de nitratos es mayor en el sistema biológico que es alimentado con sustrato de cáscara de arroz, que el sistema alimentado con metanol.

Es importante destacar la baja producción de lodo y la alta concentración de biomasa en ambos reactores, aspectos que influyen en una fácil operación del sistema. Se determinó que el uso de sustrato de cáscara de arroz como fuente de energía o de carbono en el sistema biológico de desnitrificación que se evaluó en el presente trabajo tiene la capacidad de sustituir a la fuente de carbono o de energía externa convencional del metanol debido a que presenta superiores niveles de eficiencia en la

remoción de nitratos, así como de las ventajas comparativas encontradas en la presente investigación.

Por último, debido a la facilidad de manejo, baja peligrosidad, bajo o nulo costo que representa la cáscara de arroz frente al metanol, se convierte en una alternativa económica y segura para su apropiada aplicación en tecnologías biológicas de depuración de aguas contaminadas con nitratos.

Referencias

- Ambrosio, M., & Tejero, I. (2000). Reducción simultánea de DBO(C), NH_4^+ y desnitrificación en un reactor de biopelícula. *XXVII Congreso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental*. Porto Alegre, Brasil.
- Antoine, R. (1974). Nitrification of activated sludge effluent: BIO-SURF process. *Water and Sewage*, 11, 44.
- Ávila, J., Razo, E., & Gómez, J. (2003). Avances en la eliminación biológica de nitrógeno, sulfuro y materia orgánica de aguas residuales. *Revista Latinoamericana de biología*. México, DF, México.
- Capodaglio, A., Hlavínek, P., & Raboni, M. (2016). Advances in wastewater nitrogen removal by biological processes: State of the art review. *Revista Ambiente & Agua*, 11(2), 250-267.
- Cuevas, G., & Tejero, I. (2007). *Diseño, construcción y operación de un sistema con biopelículas para el tratamiento y reutilización de aguas residuales municipales*. Tampico, México: Latin American and Caribbean Consortium of Engineering Institutions.
- EPA, Environmental Protection Agency. (2012). *Las preguntas comunes y sus respuestas sobre el nitrato y el agua potable*. Yakima, USA: Environmental Protection Agency.
- Gervacio, O. (2007). *Desarrollo del sistema de desnitrificación a escala de laboratorio de muestras de aguas residuales de la empresa metropolitana de rastro de Quito usando como fuente de carbono el efluente de la primera separación de levadura de Levapan del Ecuador S.A.* Quito: Escuela Politécnica Nacional.
- Lu, Y., Zhang, X., Feng, L., Yang, G., Zheng, Z., Liu, J., & Mu, J. (August, 2017). Optimization of continuous-flow solid-phase denitrification via coupling carriers in enhancing simultaneous removal of nitrogen

- and organics for agricultural runoff purification. *Biodegradation*, 28(4), 275-285, DOI: 10.1007/s10532-017-9795-8
- Metcalf & Eddy. (1972). *Wastewater engineering*. McGraw-Hill Inc. Hong Kong: China.
- OMS, Organización Mundial de la Salud. (2003). *Nitrate and nitrite in drinking water. Documento de referencia para la elaboración de las Guías de la OMS para la calidad del agua potable*. Ginebra, Suiza: Organización Mundial de la Salud.
- Pozo, M. J. (2008). *Proceso de nitrificación en reactores secuenciales discontinuos SBR (Sequencing Batch Reactor) con biomasa granula*. Quito, Ecuador: Escuela Politécnica Nacional.
- Rojas, R., & Leopoldo, M. (2012). Utilización de biosólidos para la recuperación energética en México. *Producción + Limpia*, 7(2), 74-94.
- Romero, M. (2010). Proceso de eutrofización de afluentes y su prevención por medio de tratamiento de efluente. *Revista Ingeniería Primero*, (17), 67-74.
- Suarez, J., & Jácome, A. (2007). *Eliminación de nitrógeno de las aguas residuales. Procesos de nitrificación y desnitrificación*. Coruña, España: Universidad de Coruña.
- Torresi, E., Escolà, M., Polesel, F., Plósz, B., Christensson, M., & Bester, K. (Jan, 2017). Impact of external carbon dose on the removal of micropollutants using methanol and ethanol in post-denitrifying Moving Bed Biofilm Reactors. *Water Research*, 1, 108:95-105, DOI: 10.1016/j.watres.2016.10.068
- Wang, J., & Chu, L. (2016). Biological nitrate removal from water and wastewater by solid-phase denitrification process. *Biotechnology Advances*, 34(6), 1103-1112.