

# Viabilidad técnica de un biorreactor de membrana anaerobio para el tratamiento de vinaza

Technical feasibility anaerobic membrane bioreactor for treatment of vinasse

COLCIENCIAS TIPO 1. ARTÍCULO ORIGINAL

RECIBIDO: ABRIL 30, 2013; ACEPTADO: JUNIO 6, 2013

Johana Marín  
[andreamarin1411@hotmail.com](mailto:andreamarin1411@hotmail.com)

Sandra P. Castro, MSc  
[sacaastro@usc.edu.co](mailto:sacaastro@usc.edu.co)

Universidad Santiago de Cali, Colombia

## Resumen

Se evaluó la viabilidad técnica a escala piloto del uso de un biorreactor de membrana anaerobio [BMA] para el tratamiento de la vinaza generada en el proceso de producción de levadura de panificación; para ello se llevaron a cabo muestreos, inspecciones de caudal y análisis fisicoquímicos que incluyeron: demanda biológica de oxígeno [BDO<sub>5</sub>], demanda química de oxígeno [DQO], sólidos totales disueltos [SST], pH, temperatura y viscosidad. Se ajustó la viscosidad del licor mixto, comenzando en 250 cP y estabilizando en 130 cP. Se realizaron purgas después de la fase de vinaza al 100% en las cuales se mantuvo la viscosidad recomendada de 90 cP; a partir del día 99 se dio inicio al ensayo para determinar la viabilidad. Trabajando con un flujo promedio de 160 L/día, la tasa de disminución estuvo en el orden de 0,544 cP/día. Se obtuvo porcentajes de remoción de DBO, SST y DQO del 76%, 98.9% y 57% respectivamente. La temperatura y el pH del efluente tuvieron valores del orden de 29.1°C y 7.6.

## Palabras Clave

Vinaza; Biorreactor de membrana anaerobio; DBO; DQO; SST.

## Abstract

Technical viability was evaluated on a pilot scale using an anaerobic membrane bioreactor [AMB] for the treatment of vinasse generated in the production process of baker's yeast, for which, samplings were conducted, and inspection flow physicochemical analysis included: Biological Oxygen Demand [BOD<sub>5</sub>], Chemical Oxygen Demand [COD], Total Dissolved Solids [TDS], pH, temperature and viscosity. The viscosity was adjusted starting mixed liquor stabilizing at 250 cP and 130 cP. Purges were carried out after phase stillage 100% where it remained the recommended viscosity 90 cp, and 99 days after the test was started to determine viability. Working with an average flow of 160 L / day, the rate of decrease was in the order of 0,544 cp/day. Removal percentages were obtained for BOD<sub>5</sub>, TDS and COD of 76%, 98.9% and 57% respectively. The temperature and pH of the effluent had values on the order of 29.1 ° C and 7.6.

## Keywords

Vinasse; Anaerobic membrane bioreactor; BOD<sub>5</sub>; COD; TDS.

## I. INTRODUCCIÓN

Las nuevas regulaciones ambientales imponen cada día criterios más fuertes, con la finalidad de conservar y mejorar la salud ambiental, mediante la regulación del manejo del agua y los vertimientos de aguas residuales industriales y domésticas (Decreto 1594, 1984). Como respuesta, diversas industrias y empresas han implementado plantas de tratamiento de aguas residuales [PTAR] e impulsando el desarrollo nuevas tecnologías para su tratamiento, que garanticen porcentajes de remoción altos, costos bajos y una menor disposición de espacio físico empleado para el tratamiento.

Una de estas tecnologías es el Biorreactor de Membrana Anaerobio [BMA], un sistema que ha demostrado su eficiencia en la remoción de materia orgánica en un 80% y tienen la particularidad de ocupar menos espacio que los sistemas de tratamiento habitualmente empleados (Noyola, 2008).

La vinaza, un subproducto de la producción de alcohol carburante y de la fabricación de levadura, es uno de las principales componentes de las aguas residuales provenientes de estas industrias en el Valle del Cauca. Su descarga directa en caudales genera efectos desastrosos en la flora y fauna presente, ya que posee una elevada demanda biológica de oxígeno [DBO], que provoca un rápido agotamiento de oxígeno en el caudal (Morales, 2000).

Este proyecto establece, a escala piloto, la viabilidad técnica del uso de un BMA para el tratamiento de vinaza generada en un proceso de producción de levadura de panificación, teniendo en cuenta parámetros de viscosidad, flujo, presión transmembránica y variables de biorremediación como Demanda Química de Oxígeno [DQO], DBO y Sólidos Totales Disueltos [SST], entre otros.

## II. MÉTODO

### A. Instalación de la planta piloto de BMA

La instalación y puesta en marcha del piloto de BMA se realizó en seis meses. El biorreactor se constituyó de veinticinco membranas de placas planas sumergidas; una resistencia, para subir la temperatura del lodo a 34°C; un soplador, que tomó el biogás producido por el mismo reactor y lo envió dentro para el movimiento del lodo y la limpieza de las membranas; medidores de temperatura,

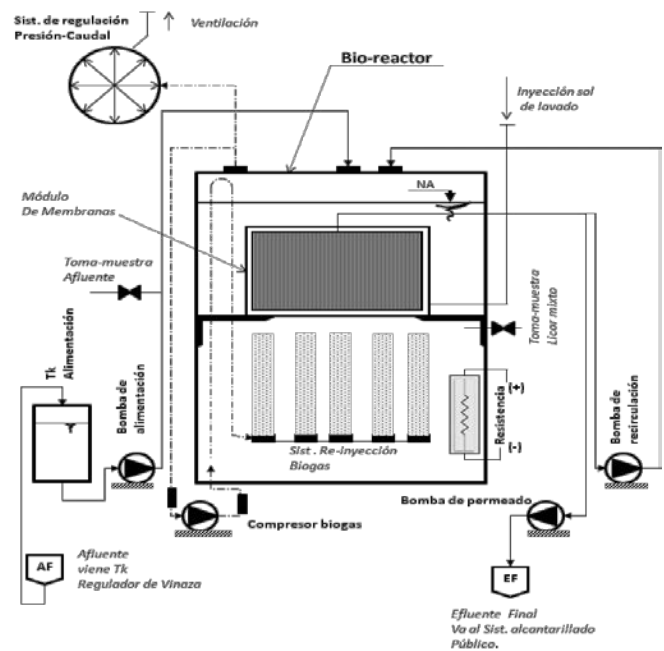
presión interna, flujo, presión transmembránica, y de biogás; tres bombas de recirculado, permeado y afluente; tres tomas de muestra de purga del licor mixto, afluente y permeado o efluente.

La descripción de los componentes de la planta piloto se puede observar en la Figura 1 y el resumen de sus parámetros operativos en la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros operativos del piloto

Parámetro	Dato
Carga orgánica	8 – 15 Kg DQO/m <sup>3</sup> .día
Tiempo de retención hidráulica	2 – 10 días
Caudal de trabajo	100 – 500 L/día

Figura 1. Representación grafica del BMA utilizado



### B. Arranque de la planta piloto

Se adaptaron 200 L de lodo anaerobio de un biorreactor anaerobio de flujo ascendente [UASB] utilizado en el tratamiento biológico de vinazas. Se midió la viscosidad del licor mixto, el mismo que en un comienzo estuvo en 250cP y con purga se estabilizó a 130cP durante la fase de diluciones.

Posteriormente se observó el comportamiento de las conexiones que permitieran optimizar parámetros como viscosidad y flujo, para luego dar inicio a una fase de diluciones de vinaza, variando paulatinamente la cantidad

de la misma en el reactor hasta alcanzar el 100%. Esta primera fase tuvo una duración de dos meses y medio.

La segunda fase se desarrolló en tres meses y medio, con carga de vinaza sin diluir; en ella, se realizaron purgas para estabilizar el proceso a una viscosidad de 90cP; durante este tiempo se llevó a cabo el seguimiento de las variables de biorremediación.

### C. Ensayos y seguimiento de variables

Las variables analíticas que se establecieron fueron DQO, pH, temperatura, SST y DBO, siguiendo métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales (Apha, Awwa & Wpcf, 1995).

También se evaluaron algunos datos operativos como el contenido de ácidos grasos, la alcalinidad del efluente del biorreactor y la viscosidad en el lodo. Las muestras de vinaza fueron tomadas del afluente y del permeado en un envase plástico. En el caso de las muestras para análisis de DQO, ellas se conservaron con ácido sulfúrico en relación de 1ml por 1L de muestra; las de DBO, se refrigeraron a 4°C y se analizaron de manera inmediata. La Tabla 2 muestra la frecuencia con que se realizaron los análisis de seguimiento para las variables analíticas

**Tabla 2. Frecuencia de análisis de parámetros operativos**

Parámetros	Frecuencia (veces/semana)
DBO	1
DQO y SST	3
Viscosidad, Ácidos grasos y alcalinidad	5
pH, Temperatura	7

### D. Limpieza de las membranas

La limpieza de las membranas se realizó una vez por mes –o cuando la presión transmembránica [PTM] fue de 10 kPa–; para ello, se apagaron todas las bombas y se cerró la válvula del biogás. Posteriormente se adicionaron 20 L de solución de ácido clorhídrico o nítrico al 1% a través de la tubería de limpieza, dejando actuar por dos horas y repitiendo el procedimiento, al día siguiente, con una solución de NaClO al 1%.

## III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### A. Optimización de parámetros en la puesta en marcha del piloto

El lodo presentó una carga microbiana que no requirió ser activada, dado que se utilizó material sensibilizado en

el tratamiento biológico de vinazas de un reactor anaerobio UASB. Las características fisicoquímicas y microbiológicas del lodo se encuentran en la Tabla 3.

**Tabla 3. Composición fisicoquímica y microbiológica del lodo**

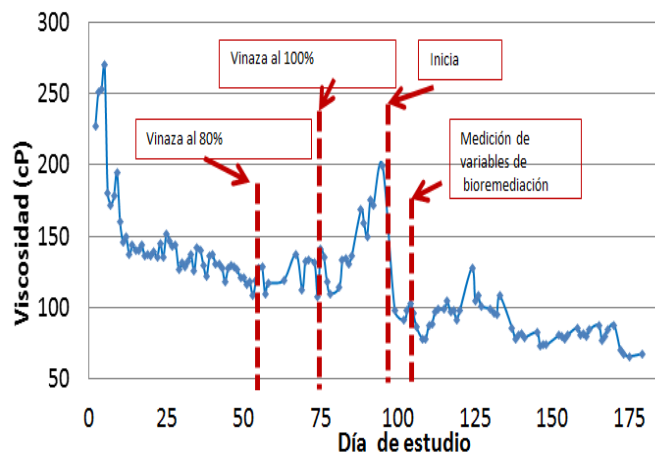
Tipo de microorganismo	Valor	Observaciones
Mesófilos	3.200.000/ml	
Hongos y levaduras	1200/ml	<i>Aspergillus fumigatus</i> , <i>Penicillium sp</i> y <i>sacharomyces</i>
<i>Actinomiceto</i>	600/ml	(aerobios- <i>nocardia sp</i> )
<i>Bacillus geotrichum</i>	500/ml	
<i>Pseudomona</i>	200/ml	
<i>Serratia</i>	500/ml	<i>Marcescens</i> , <i>liquefaciens</i>
<i>Vibrio SP</i>	200/ml	
<i>Lactobactillus</i>	2000/ml	
Materia seca	7%	
Aspecto	flocúlenlo	Lodo de altura del reactor de 1.20 m
pH	6.8	

La optimización de la viscosidad del lodo fue un factor crítico porque establece la relación con el tiempo de retención del lodo en el biorreactor. Si es muy bajo, se evita la hidrólisis de la materia orgánica que puede conducir a un rápido deterioro en la actividad de la membrana; si es muy largo, causa un aumento de la viscosidad del lodo y, por consiguiente, un rápido incremento de la resistencia (Wang, Wu, Yin, & Tian, 2008).

El lodo que se ingresó al biorreactor suministró una viscosidad inicial de 250 cP; haciendo purgas con agua se alcanzó 130 cp, en el décimo día, que aún sin ser la mejor, brindó condiciones apropiadas para el inicio del proceso de bioremediación de la vinaza. La tasa promedio de disminución de la viscosidad fue de 0,544 cp/día. La Figura 2 muestra la variabilidad de la viscosidad de todo el estudio.

El flujo promedio del caudal fue de 152,4 L/día, algunas fuentes de variación se debieron al taponamiento de las membranas por sólidos en las mangueras de succión de permeado. La PTM sufrió un incremento, con una alta variabilidad al final del estudio, lo cual está asociado con la incrustación de impurezas en la membrana. Es bien sabido que las propiedades de la membrana tales como la distribución del tamaño de los poros, los materiales de membrana y la hidrofilia o hidrofobicidad tiene efectos significativos en la permeabilidad de membrana y del ensuciamiento de la misma y que estas variables afectan el flujo crítico (He, Xu, Li, & Zhang, 2005).

**Figura 2. Implementación de la planta piloto - Evolución de la viscosidad**



La adaptación de los microorganismos en el lodo se logró haciendo cambios de la concentración de la vinaza, de tal manera que las nuevas condiciones no causaran estrés que conllevara al colapso del ensayo.

A partir del día 73 se trabajó con 100% de vinaza; momento en el cual se iniciaron purgas para mantener una viscosidad de 90 cP, resultado que se obtuvo hacia el día 99. Algunas anomalías como la presurización del sistema, en la cual el lodo salió por la línea del biogás, generaron cambios significativos en la viscosidad —específicamente los días 173 al 176— pero fueron fácilmente solventadas.

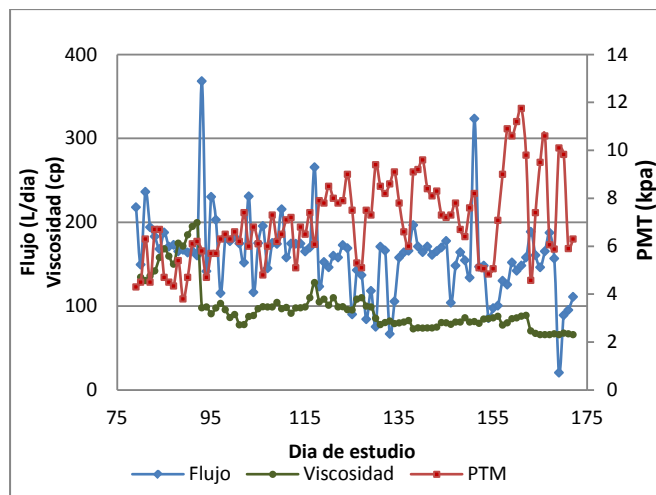
Flujos o caudales entre 120 y 240 L/día generaron PTM entre 4 y 7 kpa. Un incremento en la PTM (ver días 118 a 133 de la Figura 3) causan una disminución del flujo que podría atribuirse a la naturaleza del material depositado o adherido en la superficie de la membrana, que dificulta el paso del agua a través de ella.

Un estudio con sílice coloidal realizado por Le-Clech, Jefferson, & Chen (2003) reveló el mecanismo de *ensuciamiento* bajo diferentes caudales: un ensuciamiento pequeño y ordenado se desarrolla lentamente bajo un aumento gradual del caudal, mientras que una mayor resistencia hidráulica se observó con un aumento de flujo más grande.

El incremento constante de la viscosidad no genera traumatismos en la respuesta de flujo y de la PTM (días 75 a 90), pero ante descensos bruscos (día 93), el flujo se ve influenciado drásticamente, mientras que los cambios en la TPM no son detectables en un tiempo corto; este aspecto que está acorde con estudios previos realizados en este tipo de membranas con sistemas automatizados (Wang,

Wu, Yu, Liu, & Zhou, 2006).

**Figura 3. Datos de flujo, viscosidad y presión transmembránica en el piloto**



Entre los días 95 y 115, cuando se mantuvo la viscosidad alrededor de 95cp, se observó que la variación del flujo y de la PTM sufrió porcentajes de desviaciones estándar relativas (%DSR) inferiores al 16 y 10% respectivamente, en comparación con los datos obtenidos entre los días 130 a 158, cuya viscosidad estuvo en 80 cp y las %DSR se duplicaron. Esto indica que la viscosidad del lodo es un factor importante para el mantenimiento estadístico de las variables de funcionamiento de la planta piloto.

Los resultados de Figura 3 muestran las tres etapas clásicas que sufren las membranas sumergidas y que han sido propuestas con anterioridad (Wang et al., 2003):

- etapa 1, días 73-85, rápido aumento de TPM;
- etapa 2, días 86-116, débil aumento a largo plazo en TPM; y
- etapa 3, días 117-175, fuerte aumento de la  $dTPM/dt$  (también conocido como salto de TPM).

El ensuciamiento de la membrana se debe principalmente a la deposición de sustancias poliméricas extracelulares [EPS], coloides y solutos, entre otros, sobre las superficies de membrana que bloquean los poros de la membrana (Metzger, Le-Clech, Stuetz, Frimmel, & Chen, 2007).

El seguimiento de la PTM, y del flujo con respecto a la viscosidad del lodo, fue de vital importancia para establecer sus posibles influencias en el ensuciamiento de

la membrana y los correctivos de limpieza de la misma.

La Figura 4 muestra las diferencias físicas de una membrana usada y una nueva. En la parte superior de la membrana de la izquierda se muestra la incrustación de sobrantes de la torta formada durante el piloto.

**Figura 4. Membrana incrustada después de la operación y membrana nueva**



Los ácidos utilizados cumplen la finalidad de degradar las sustancias orgánicas, tales como proteínas y polisacáridos (Ognier, Wisniewski, & Grasmick, 2002) e inorgánicas, como los restos de  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{MgNH}_4\text{PO}_4$  (Wang et al, 2008), aluminio, hierro y silicio, entre otros) que se encuentran incrustadas en la membrana, ya que un lavado manual no es posible porque, al estar las membranas sumergidas y dentro del reactor, hacerlo implicaría una para larga del sistema.

La Figura 5 muestra las diferencias físicas de las membranas después del lavados con ácido nítrico y clorhídrico. Las respuestas de flujo, viscosidad y PTM indican que los lavados fueron efectivos para la remoción de ensuciamientos superficiales.

**Figura 5. Membrana lavada con ácidos fuertes al 1% seguido de  $\text{NaClO}$  al 1%**



### B. Resultados de biorremediación del piloto

La vinaza estudiada posee una carga orgánica alta, con sólidos suspendidos totales elevados, características que clasifican a éste residuo como altamente contaminante si se

vierte directamente a los cuerpos de agua. Por sus propiedades fisicoquímicas, son residuos que no cumplen la legislación (Decreto 1594, 1984). La Tabla 4 muestra los promedios de los aspectos fisicoquímicos más relevantes de la vinaza.

**Tabla 4. Vinaza objeto de estudio - propiedades fisicoquímicas**

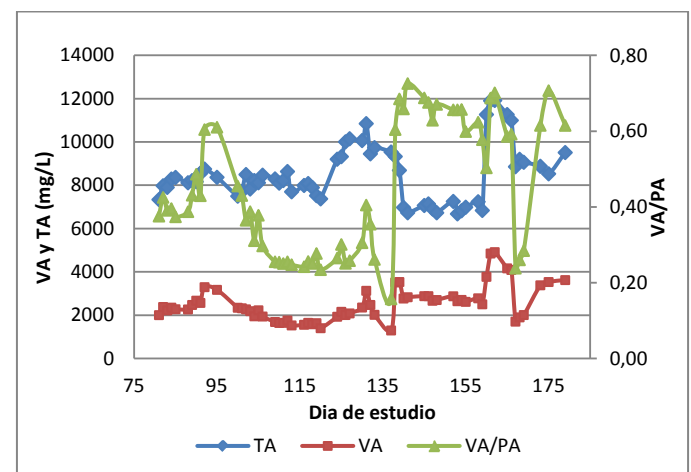
DQO (mg/L)	SST (mg/L)	DBO (mg/L)	pH	Temperatura °C
50000-70000	3000-5000	20000-25000	5.13-6.20	24-30

La concentración de DQO del afluente estuvo entre 314000 – 68900 mg/L, con un promedio de 52116 mg/L. La remoción de carga mínima fue de 22,7% y la máxima fue de 75,4%, con un promedio de 56,2%. La concentración del efluente se mantuvo entre 13420 y 33000 mg/L, con un promedio de 22150 mg/L.

Las remociones de  $\text{DBO}_5$  aumentaron con el tiempo de operación del piloto desde 52% a 91%, con un promedio de 76%. La concentración de la  $\text{DBO}_5$  del afluente estuvo entre 19500 y 25600 mg/L con un promedio de 22772 mg/L.

La remoción de SST en carga fue alta. Se mantuvo entre 96,4 y 99,7%, con un promedio de remoción de 98,9%. El afluente estuvo por el orden de 1063 y 5800 mg/L con un promedio de 3681 mg/L.

**Figura 6. Resultados de ácidos grasos volátiles y alcalinidad total**



La relación de los VA y la alcalinidad parcial [PA], resta de VA y TA,  $[\text{VA}/\text{PA}]$  se encuentra por debajo de 1, lo que garantiza el buen funcionamiento de la planta piloto, en cuanto no se presentan problemas de inhibición de la digestión anaerobia. La Figura 6, también indica que el aumento los ácidos grasos genera un incremento en la

alcalinidad, lo que hace necesaria la neutralización para que el sistema se mantenga óptimo.

Durante el estudio se observó un descenso de la temperatura y un incremento del pH con el tiempo. La temperatura del sistema estuvo entre 24.6 y 32.8 °C y el pH entre 7.14 y 8.11, con un promedio de 29.1°C y 7.60 respectivamente, valores aceptados por la legislación nacional.

A partir del día 125 se mantuvo la temperatura del piloto a 27°C, sin que se observaran cambios significativos en los alcances del mismo. Lo anterior indica que la carga microbiana tiene un buen desempeño a condiciones ambientales.

#### IV. CONCLUSIONES

El sistema de biorremediación BMA mostró ventajas significativas en manejo de residuos líquidos con alta concentración de materia orgánica y sólidos suspendidos, lo que hace de él una alternativa para el mejoramiento y manejo de las vinazas de la industria de levaduras de panificación. La adecuada operación de la planta piloto requiere un seguimiento continuo del flujo de la vinaza, la viscosidad del licor mixto y la presión transmembránica del sistema.

La planta piloto disminuye la DQO y la DBO<sub>5</sub> en un 56.2% y 76% respectivamente. Mejorando algunas condiciones del piloto se podría lograr remociones de DBO de un 80%.

Las membranas de la planta piloto BMA requieren limpieza química, consistente en ácido clorhídrico o nítrico al 1%, seguido por NaClO al 1%. El espaciado temporal de la limpieza dependerá de la carga de sólidos que tenga la vinaza.

Parámetros como la temperatura y el pH pueden ser fácilmente manejados en la planta piloto, de tal manera que no constituyen inconvenientes en su manejo.

#### V. REFERENCIAS

- Decreto 1594, Ministerio de Agricultura. (1984, junio 26). *Diario Oficial No. 36700*. Bogotá, Colombia: Imprenta Nacional
- American Public Health Association [APHA], American Water Works Association [AWWA], & Water Pollution Control Federation [WPCF]. (1995). *Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales*. Madrid, España: Diaz de Santos
- Morales, A. *Extracción e identificación de compuestos orgánicos en vinazas* [tesis de Maestría]. Universidad del Valle: Cali, Colombia
- Noyola, A. (2008). *Tratamiento de aguas residuales mediante bio-reactores anaerobios de membrana: mecanismos del taponamiento de membranas y*

- su control* [tesis]. Universidad Nacional Autónoma de México [UNAM].
- He, Y., Xu, P., Li, C., & Zhang, B. (2005). High-concentration food wastewater treatment by an anaerobic membrane bioreactor. *Water Research, 39*(17), 4110-4118.
- Le-Clech, P., Jefferson, B., & Judd, J.S. (2003). Impact of aeration, solids concentration and membrane characteristics on the hydraulic performance of a membrane bioreactor. *Journal of Membrane Science, 218*(1-2), 117-129
- Wang, Z.W., Wu, Z.C., Yu, G.P., Liu, J.F., Zhou, Z. (2006). Relationship between sludge characteristics and membrane flux determination in submerged membrane bioreactors. *Journal of Membrane Science, 284*(1-2), 87-94
- Metzger, U., Le-Clech, P., Stuetz, R.M., Frimmel, F.H., & Chen, V. (2007). Characterization of polymeric fouling in membrane bioreactors and the effect of different filtration modes. *Journal of Membrane Science, 301*(1-2), 180-189
- Ognier, S., Wisniewski, C. & Grasmick, A. (2002). Characterization and modeling of fouling in membrane bioreactors. *Desalination 146* (1-3), 141-147
- Wang, Z., Wu, Z., Yin, X., & Tian, L. (2008). Membrane fouling in a submerged membrane bioreactor (MBR) under sub-critical flux operation: membrane foulant and gel layer characterization. *Journal of Membrane Science, 325*(1), 238-244

#### VI. CURRÍCULOS

*Andrea Marín Rodríguez*: Química de la Universidad Santiago de Cali con siete años de experiencia en el campo ambiental, con énfasis en el tratamiento de las aguas residuales industriales, la valorización y el mercadeo de subproductos, y la gestión ambiental empresarial con enfoque de sostenibilidad económica, mediante implementación de proyectos de producción limpia. Realizó un Diplomado en Gestión Ambiental Empresarial (Universidad del Valle, Cali-Colombia), un curso de Auditora Interna en ISO 14000 (Universidad del Valle), y un curso en Sistemas de Calidad Salud Ocupacional y Seguridad Industrial del Sena (Cali-Colombia).

*Sandra Patricia Castro Narváez*: Química (1999) y Magister en Ciencias: Química de la Universidad del Valle (2004). Docente de tiempo completo de la Facultad de Ciencias Básicas de la Universidad Santiago de Cali (2005). Su especialidad es el electroanálisis de moléculas con interés tecnológico, biológico y medio ambiental. Adelanta estudios de Doctorado en Láseres y Espectroscopia avanzada en Química de la Universidad Pablo de Olavide (Sevilla, España).