

Nitrificación en un reactor biopelícula de membrana tubular aireada

J. Molina¹; A. Yáñez²; A. Jácome¹; J. Suárez¹

¹ Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente. Univ. da Coruña. CITEEC - Elviña s/n, 15071 Coruña.

² RUSSULA Corporation. c/Pasteur 30, 1º, 15008 Coruña.

Resumen

En reactores biopelícula de membrana aireada (RBMA) se puede desarrollar dos tipos de biopelícula: (a) una con flujo unidireccional de oxígeno a través de las membranas (manteniendo el líquido anóxico) y (b) otra con flujo bidireccional de oxígeno: a través de las membranas y desde el seno líquido. El objetivo de este trabajo fue desarrollar una biopelícula nitrificante en un RBMA, para analizar el efecto del flujo unidireccional y bidireccional de oxígeno. El módulo de membranas se compuso de 294 tubos Accurel[®] de polipropileno hidrófobo, con una superficie específica de 25 m²/m³. Durante la primera fase experimental, del día 1 al 35, la aireación natural pasiva produjo una parcial nitrificación a nitrito, debido a la baja disponibilidad de oxígeno tanto desde el seno líquido como desde el interior de las membranas tubulares. El día 36 se pone en marcha un difusor de aire para renovar la atmósfera interna de las membranas, produciéndose una inmediata oxidación a nitrato del nitrito acumulado y del amonio remanente. En la 2ª fase experimental el reactor fue operado mediante llenado – vaciado. Se evaluaron 3 concentraciones iniciales de amonio: (a) 30 y 60 mg N/L con flujo bidireccional de oxígeno y (b) 90 mg N/L con flujo unidireccional de oxígeno a través de las membranas. En esta fase siempre se aireó el interior de las membranas, sin presurizarlas. La cinética de la nitrificación depende de la concentración de amonio así como de la disponibilidad de oxígeno. Con flujo bidireccional de oxígeno la nitrificación máxima es de 1,2 g N/m²/d (OD seno líquido = 2,8 ± 1,0 mg/L). Con flujo unidireccional la nitrificación máxima es de 0,6 g N/m²/d (OD seno líquido = 0,4 ± 0,2 mg/L).

Palabras clave

Membrana aireada, nitrificación, reactor biopelícula, transferencia de oxígeno.

INTRODUCCIÓN

En reactores biopelícula de membrana micro-porosa aireada (RBMA) el oxígeno pasa a través de la membrana y es utilizado por las bacterias para oxidar los contaminantes que, a su vez, penetran la biopelícula desde el seno líquido. Según las fuentes de oxígeno se podría tener dos tipos de biopelícula: (a) con flujo uni-direccional de oxígeno a través de la membrana, siendo el agua anóxica y (b) con flujo bi-direccional de oxígeno, a través de la membrana y desde el seno líquido. La transferencia de oxígeno a través de membranas micro-porosas puede mejorar con el desarrollo de una biopelícula, ya sea de nitrificación – desnitrificación (Osa *et al.*, 1997; Jácome *et al.*, 2006) o solo nitrificante (Brindle *et al.*, 1998; Shanahan *et al.*, 2006). Esta mejora de la transferencia de oxígeno es afectada por la hidráulica del proceso y las características de la biopelícula como espesor o concentración. En este trabajo, los objetivos fueron desarrollar y evaluar una biopelícula nitrificante en un RBMA, utilizando un sustrato sintético, y analizar el efecto sobre la nitrificación del flujo uni-direccional y bi-direccional de oxígeno.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del reactor y de los ensayos de aireación

El reactor construido en chapa de aluminio de 3 mm, planta de 44,5 x 44,5 cm, tiene un volumen útil de 123,83 L (Fig. 1). El soporte consta de 294 membranas tubulares micro-porosas Accurel[®], dispuestas en 19 filas horizontales, tienen un poro de 0,2 µm, punto de burbuja de 1,07 bares, espesor de 1550 µm,

diámetro interno de 5500 μm y longitud de 39 cm. La superficie de membrana es de 30.978,49 cm^2 . La superficie específica resulta de 25 m^2/m^3 . La estructura del soporte es de tubo de PVC de 20 mm.

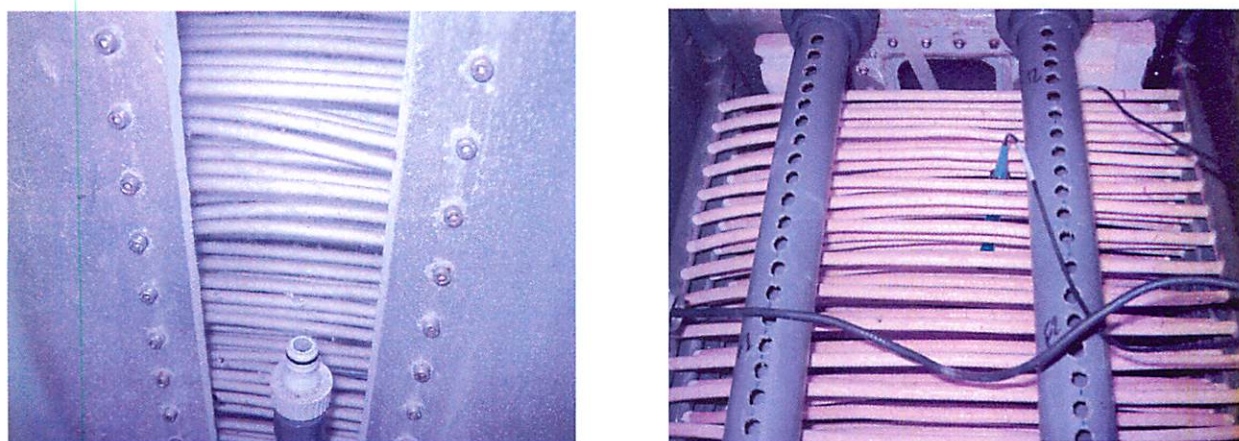


Fig. 1.- Reactor prototipo de membranas tubulares antes del arranque (izda.). Imagen de las membranas tubulares micro-porosas recubiertas de biopelícula nitrificante (dcha.)

El coeficiente de transferencia física de oxígeno de las membranas, K_L , se midió en un modelo a escala de laboratorio similar al prototipo, con volumen útil de 18,42 L y superficie de membrana de 2.720,68 cm^2 (superficie específica = 15 m^2/m^3). En régimen transitorio se aireó agua previamente desoxigenada con sulfito de sodio. Se realizaron 3 tipos de ensayos: 1) de aireación pasiva, sin airear artificialmente, con el agua en movimiento mediante recirculación interna (3 ensayos); 2) con aireación artificial y recirculación interna del agua (5 ensayos), y 3) con aireación artificial y sin recirculación interna (velocidad nula) (5 ensayos). Los ensayos con aireación artificial se realizaron sin presurizar el interior de las membranas. Así, la aireación artificial consistió en una simple ventilación para mantener renovada la atmósfera interior de las membranas.

Procedimiento experimental

Para la puesta en marcha, el reactor se llenó con el agua sintética (amonio, bicarbonato, micronutrientes) más 20 L de un cultivo de nitrificantes desarrollado durante varios meses como cultivo *batch* en suspensión con un tiempo de retención celular de 10 días. Durante esta fase, cuando los sustratos se agotaban eran repuestos sin vaciar el reactor. Del día 1 al 35 no se aireó artificialmente las membranas. El día 36 de esta fase se inició la aireación artificial empleando un difusor que suministró un caudal de aire de 8 L/min suficiente para renovar la atmósfera interior de las membranas de 7.4 litros (incluyendo el interior de los tubos de PVC).

En la 2ª fase experimental el reactor se explotó mediante llenado – vaciado. Se ensayaron 3 cargas de amonio: cargas de 30 y 60 mg N/L por triplicado con flujo bi-direccional de oxígeno (desoxigenación parcial del seno líquido), y carga de 90 mg N/L ensayada por duplicado con flujo uni-direccional de oxígeno a través de las membranas (desoxigenación total). Esta fase se realizó con aireación artificial. Así, la presión parcial de oxígeno se mantenía estable en 0,2 atmósferas al interior de las membranas.

Se analizó una muestra diaria. Antes de la toma de muestra se homogenizaba el contenido del tanque efectuando recirculación interna durante 30 minutos con una bomba peristáltica. Para medir amonio y nitrato se emplearon los métodos de cubeta-test Dr. Lange®. La alcalinidad, conductividad, pH,

turbidez y nitrito se analizaron con métodos normalizados (APHA-AWWA-WPCF, 1992). El oxígeno disuelto se midió con electrodo luminiscente (Modelo LDO, Hach, USA).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Ensayos de aireación (transferencia de oxígeno a través de las membranas)

El coeficiente K_L promedio para cada tipo de ensayo de aireación se presenta en la Tabla 1. La transferencia de oxígeno más baja se da cuando la velocidad del agua es nula. $J_{O_2,max}$ es el flujo máximo de oxígeno a través de las membranas y $r_{N,max}$ la correspondiente tasa máxima de nitrificación para un consumo de 4.3 mg O₂ por mg de N-amoniaco.

Tabla 1.- Resultados de los ensayos de aireación

Tipo de ensayo	Velocidad fluido (cm/min)	Temp. media (° C)	$K_L a$ (día ⁻¹)	K_L (m/día)	$J_{O_2,max}$ (g O ₂ /m ² /d)	$r_{N,max}$ (g N/m ² /d)
Membrana pasiva	3,48	20,5	6,77 ± 0,58	0,61 ± 0,05	5,78	1,34
Membrana aireada	5,88	20,1	8,21 ± 0,43	0,75 ± 0,04	6,70	1,56
Membrana aireada	0,00	20,6	3,02 ± 0,72	0,27 ± 0,07	2,39	0,56

La transferencia de oxígeno depende de la velocidad del fluido, que a su vez determina el espesor de la capa líquida estática, L , adyacente a la membrana, donde se produce la mayor resistencia a la transferencia de materia. No obstante, se requiere evaluar la transferencia de oxígeno con el seno líquido no agitado, porque una vez que crezca la biopelícula se tendrá una capa estática de agua, pero intersticial al interior de la película. En flujo difusivo, K_L y L , se relacionan mediante:

$$K_L = \frac{D_{O_2}}{L} \quad (1)$$

Donde, D_{O_2} es la difusividad de oxígeno en agua (a 20 °C = 2×10^{-4} m²/d). El valor de L depende de la energía de mezcla. Con aireación pasiva y una velocidad de fluido de 3,48 cm/min el valor de K_L resultó de 0,61 m/d, resultando $L = 328$ µm. Osa *et al.* (1997) midieron la transferencia pasiva de oxígeno a través de similares membranas tubulares de polipropileno Accurel® en un reactor mezclado con agitador magnético con una superficie específica de 4 m²/m³ obteniendo un valor de $K_L = 2.24$ m/d, con lo que el valor de L fue de 88 µm. Por lo tanto, resulta más importante reducir al mínimo el espesor de L para optimizar la transferencia de materia que incrementar la superficie específica de membrana.

Primera fase experimental: puesta en marcha

La colonización de las membranas fue un proceso que duró 10 a 12 días (Fig. 1, dcha.). Este periodo es similar al observado por Brindle *et al.* (1998). Sin embargo, Terada *et al.* (2003) tardaron 3 semanas en desarrollar una biopelícula nitrificante a pesar de dosificar una carga inicial de 3.000 mg N-NH₄/L. Así, la velocidad de desarrollo de una biopelícula nitrificante no dependería solo de la carga de amonio. Durante la primera parte de esta fase la aireación natural pasiva produjo principalmente una nitrificación parcial a nitrito (concentración máxima de 90 mg N/L, Fig. 2), debido a la baja disponibilidad de oxígeno tanto desde el seno líquido como desde las membranas por enrarecimiento de su atmósfera interna. Hasta el día 35 con una media de OD en el seno líquido de $0,4 \pm 0,2$ mg/L, la nitrificación se debió principalmente a la auto-aireación de la biopelícula a través de la membrana. El fenómeno de auto-aireación ha sido observado en biopelículas de nitrificación – desnitrificación (Osa *et al.*, 1997; Jácome *et al.*, 2006).

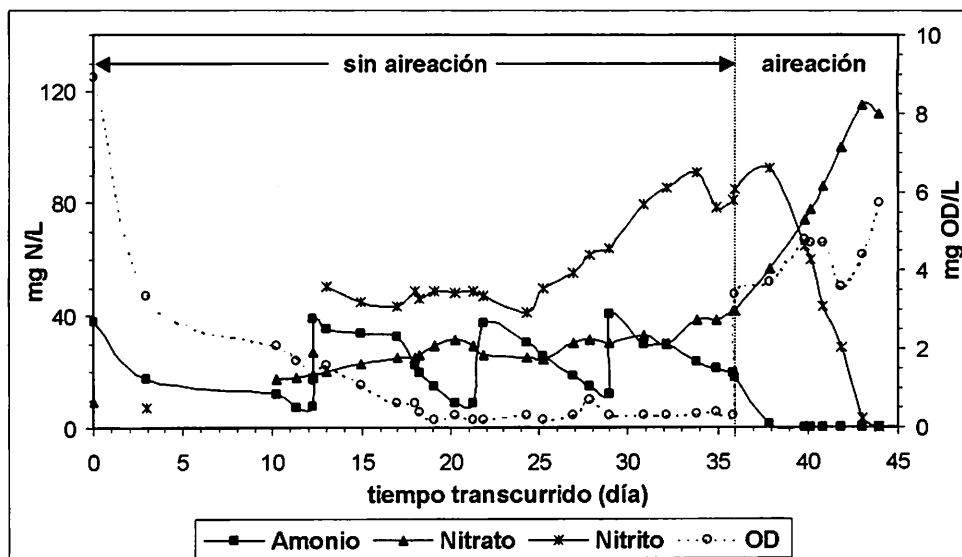


Figura 2: Evolución de sustratos en el seno líquido durante la fase de arranque del reactor biopelícula de membrana. El día 36 se pone a funcionar en continuo el difusor de aire.

El día 36 se enciende el difusor de aire, renovándose la atmósfera interior de las membranas, produciendo una inmediata oxidación a nitrato tanto del amonio remanente como del nitrito acumulado. Cuando amonio y nitrito llegan a ser muy bajos (día 41) la demanda de oxígeno para nitrificación cae drásticamente y la aireación sirve solo para aumentar el OD en el seno líquido. Según Bae *et al.* (2001) la acumulación de nitrito depende sensiblemente del pH, la temperatura y el nivel de OD del medio. Se han observado elevadas concentraciones de nitrito a pH 8-9, o a temperaturas de 30 °C, o con niveles de OD en torno a 1.5 mg/L. Los propios sustratos de la nitrificación, amonio y nitrito, pueden inhibir la nitrificación. Anthonisen *et al.* (1976) demostraron que la inhibición por nitrito se inicia a concentraciones de ácido nitroso no ionizado de 0.22 mg/L. A 20 °C, esta concentración se alcanzaría en una solución que contenga 200 mg/L de $N-NO_2^-$ a pH 7, pero a pH 6 solo sería necesario 20 mg/L de $N-NO_2^-$. De igual forma, a pH 9 un nivel inhibitorio de 10 mg/L de NH_3 se presentaría en una solución que contenga 30 mg/L de N-amoniaco, pero a pH 7 se necesitaría aproximadamente 2.000 mg/L de N-amoniaco para formar dicha cantidad. Ya que en esta fase experimental la temperatura del agua osciló entre 15 y 18 °C, y el pH entre 6,86 y 7,76; la acumulación de nitrito observada solo pudo deberse a la baja disponibilidad de oxígeno tanto desde el “lumen” viciado como desde el seno líquido. La prolongada acumulación de nitrito evidencia la viabilidad de estos reactores para la eliminación biológica de nitrógeno por la vía rápida, pudiendo formar parte de procesos híbridos (biopelícula + biomasa en suspensión) que buscan nitrificar el amonio hasta nitrito y desnitrificar nitrito a N-gas. Chun *et al.* (2005) observaron que para lograr una elevada acumulación de nitrito en procesos híbridos se requiere una concentración de OD menor o igual que 1,5 mg/L junto con una concentración de amoníaco libre de 10 a 20 mg/L. En este trabajo se confirma la primera hipótesis de Chun *et al.*, que un bajo nivel de OD produce acumulación de nitrito, pero no hizo falta los niveles de amoníaco libre señalados, puesto que la máxima concentración estimada de amoníaco libre fue de 1,15 mg/L.

Reactor en régimen transitorio con flujo bi-direccional de oxígeno hacia la biopelícula

Los ensayos con flujo bi-direccional de oxígeno arrancan con OD en el seno líquido entre 3 y 5,7 mg/L (excepto el n° 4). La temperatura media del agua fue de $23,1 \pm 2,4$ °C. La repetición de los ensayos da resultados reproducibles, sin que se observen desviaciones significativas (Fig. 3). Excepto en el ensayo

4, el OD en el seno líquido tiende inicialmente a disminuir. Esto obedece a que la demanda nitrogenada de oxígeno depende de la concentración existente de amonio, la cual es máxima al inicio de cada ensayo. Una vez que la demanda de oxígeno declina, porque el amonio se ha oxidado a nitrato y/o nitrito, la transferencia de oxígeno a través de la biomembrana (membrana + biopelícula) produce un incremento del OD en el seno líquido. En el ensayo 4, el OD inicial en el seno líquido resultó baja (1,9 mg/L) lo cual explicaría que tuviera un comportamiento diferente, ya que el nivel de OD en la propia biopelícula habría sido mayor que 1,9 mg/L. Los 4 primeros ensayos muestran una tendencia a la acumulación de nitrito, que disminuye a medida que la biopelícula tiene más edad, indicando una paulatina adaptación de la biopelícula nitrificante al sustrato y a las condiciones experimentales.

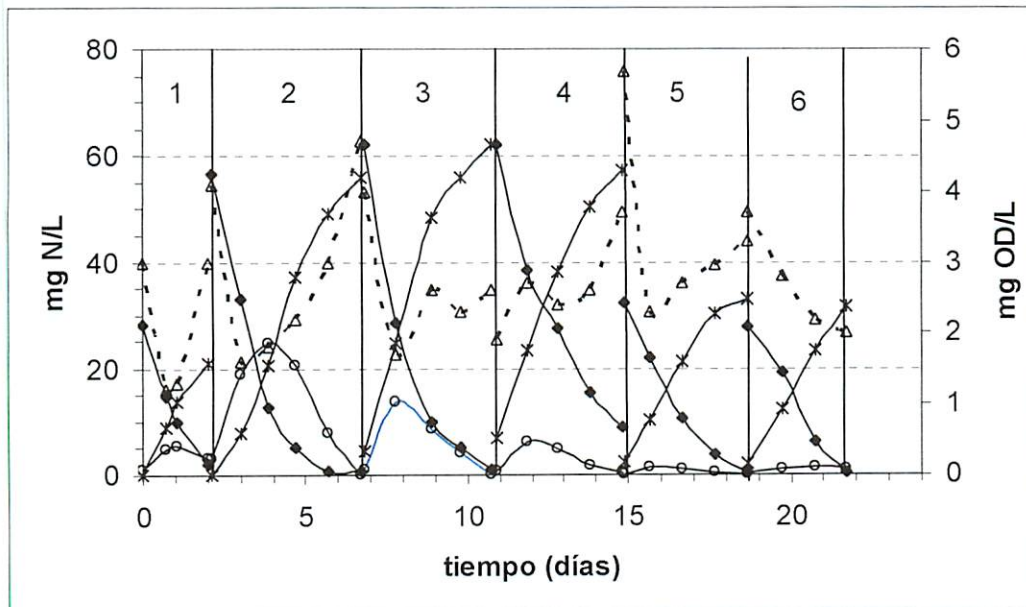


Figura 3: Evolución de amonio (◆), nitrato (*), nitrito (○) y OD (Δ), durante los 6 ensayos batch con flujo bi-direccional de oxígeno.

Aunque en estos ensayos el flujo de oxígeno fue bi-direccional, ya que se disponía de OD tanto en las interfases membrana-biopelícula y biopelícula-seno líquido, si se aplica el modelo cinético propuesto por Williamson y McCarty (1976), se determina que el OD fue el sustrato con flujo difusivo limitado desde el seno líquido hacia la biopelícula, ya que su concentración en el seno líquido fue, en general, inferior a 2,7 veces la de nitrógeno amoniacal. Solo al final de los ensayos 2, 5 y 6, cuando la concentración de amonio era muy baja ($< 0,8$ mg N/L), el OD dejó de ser el limitante del flujo difusivo.

Reactor en régimen transitorio con flujo de oxígeno uni-direccional hacia la biopelícula

La carga de 90 mg/L fue ensayada por duplicado. Se procuró la desoxigenación completa del agua de llenado del reactor. Durante esta fase experimental la temperatura media del agua fue de $25,3 \pm 1,8$ °C. El OD promedio en el seno líquido fue de $0,4 \pm 0,2$ mg/L. El ensayo 7 empezó con un nivel “alto” de OD (1 mg/L) lo que produjo que durante el primer día de este ensayo el flujo de oxígeno fuera todavía bi-direccional. No obstante, la caída de la concentración de OD fue rápida debido a la alta carga de amonio inicial (83 mg N/L). A partir de ahí, el seno líquido es prácticamente anóxico durante el resto de este ensayo. La oxidación de amonio es completa hasta nitrato. La acumulación de nitrito se produce durante el primer día de funcionamiento en cada uno de los dos ensayos, después la tendencia es a oxidarse a nitrato (Fig. 4). La baja concentración de OD en el seno del líquido no inhibe la oxidación

de nitrito, se deduce por tanto que la aireación exclusivamente a través de la biomembrana produce la oxidación completa del amonio.

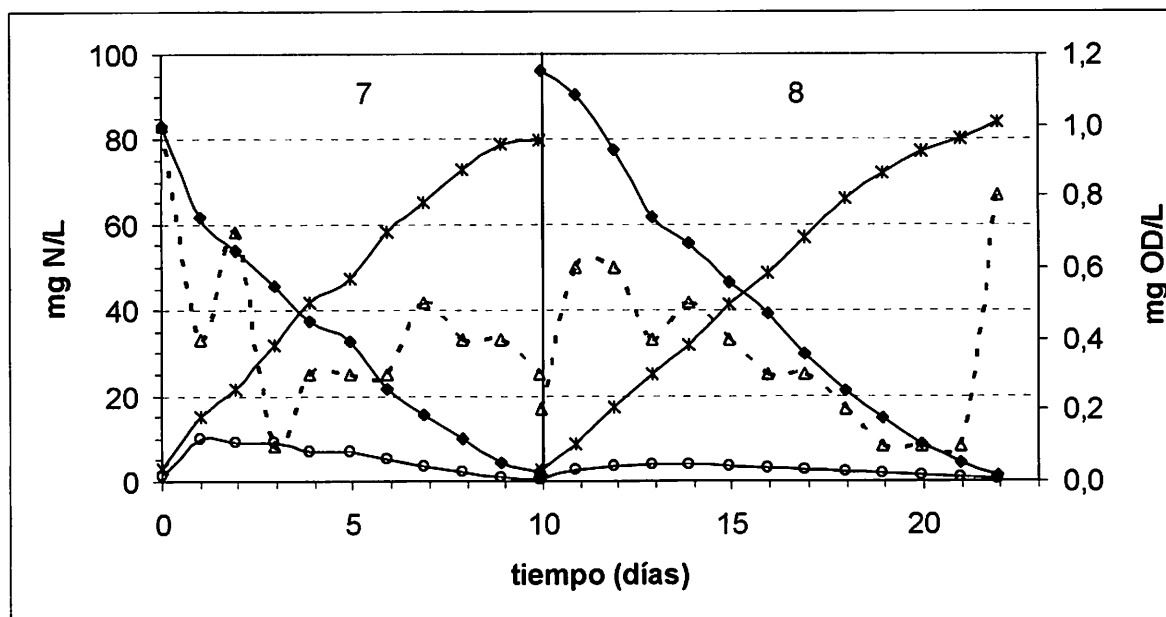


Figura 4: Evolución de amonio (♦), nitrato (*), nitrito (o) y OD (Δ) durante los ensayos batch 7 y 8 con flujo uni-direccional de oxígeno.

Como la aireación se realizó a presión atmosférica, es decir se trató de una ventilación, se deduce que mantener una atmósfera no viciada al interior de las membranas es suficiente para que la biopelícula, por auto-aireación pasiva sin presurización, logre la nitrificación completa del nitrógeno amoniacal. Esto confirma lo observado durante la primera fase experimental: cuando entró en funcionamiento el difusor, la biopelícula inmediatamente produjo la oxidación a nitrato del nitrito que se había acumulado debido al enrarecimiento de la atmósfera, y a continuación la concentración de OD en el seno líquido se elevó drásticamente. Mientras que en esta 2ª fase, una vez realizada la nitrificación completa, la aireación artificial no eleva significativamente el nivel de OD en el seno líquido, lo cual sería indicativo de un incremento del espesor y/o concentración de la biopelícula nitrificante provocando un aumento en la resistencia al transporte. Similarmente, otros autores señalan que la eficacia en la transferencia de oxígeno debido a la biopelícula dependería entre otros factores de las características de la propia biopelícula (Suzuki *et al.*, 1993; Osa *et al.*, 1997; Brindle *et al.*, 1998; Walter *et al.*, 2005; Shanahan *et al.*, 2006; Hu *et al.*, 2008). Finalmente, la ventilación fue continua, de modo que podría estudiarse la viabilidad de realizar una aireación intermitente para reducir el consumo energético.

Cinética de la nitrificación

La cinética de la nitrificación depende tanto de la concentración de amonio como de la disponibilidad de oxígeno (Fig. 5). Con flujo bi-direccional de oxígeno la tasa máxima de nitrificación alcanzó 1,2 g N/m²/d, con un OD en el seno líquido de 2,8 ± 1,0 mg/L. Con flujo uni-direccional de oxígeno solo a través de las membranas (OD en el seno líquido de 0,4 ± 0,2 mg/L) la nitrificación máxima fue de 0,6 g N/m²/d, similar a la tasa estimada a partir de los ensayos de aireación pasiva con velocidad nula del fluido (0,56 g N/m²/d, trazo grueso en fig. 5). Por lo tanto, el flujo uni-direccional de oxígeno fue consumido por la biopelícula, sin que se produzca aireación del seno líquido. En ambos casos, la velocidad de eliminación superficial de amonio presenta una dependencia de la concentración de

amonio tipo saturación o Monod. La velocidad máxima de nitrificación fue mayor con flujo bidireccional de oxígeno, es decir, la disponibilidad de oxígeno condiciona la cinética observada. En todo caso, las tasas de nitrificación observadas son relativamente bajas si se comparan, por ejemplo, con las que se obtienen con biodiscos de nitrificación terciaria, donde se alcanza tasas de nitrificación de hasta 1,5 g N/m²/d. En esta fase experimental, la aireación fue continua y se produjo nitrificación completa a nitrato con insignificante acumulación de nitrito. Cabría esperar que con una cierta velocidad del fluido se consiga una mejor transferencia de sustratos desde el seno líquido hacia la biopelícula, lo cual intensificaría la cinética de nitrificación, en cualquiera de los dos casos (aireación uni y bi-direccional). Otra alternativa sería incrementar la presión intra-membrana de aire para conseguir una mayor transferencia de oxígeno. Además, si aumenta la demanda nitrogenada de oxígeno la biopelícula nitrificante podrá mejorar la transferencia de oxígeno a través de la membrana.

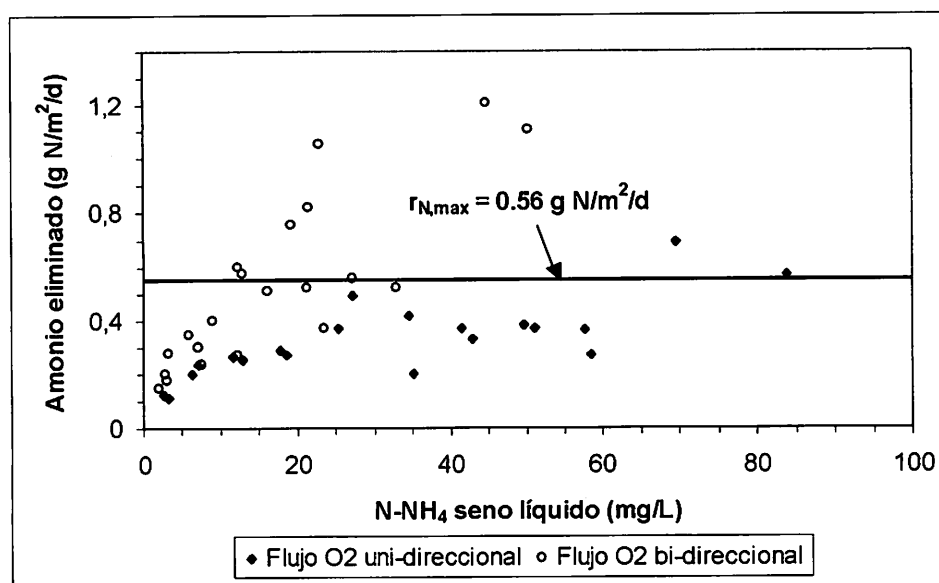


Figura 5: Efecto del flujo de oxígeno sobre la cinética de eliminación de amonio.

CONCLUSIONES

En este trabajo se ha estudiado la aplicación de un reactor biopelícula de membrana tubular micro-porosa aireada para nitrificación mediante ensayos batch. La tasa de aireación física de las membranas a presión atmosférica depende de la velocidad del fluido. Cuando la velocidad del fluido es nula la tasa de aireación se reduce drásticamente porque la resistencia al transporte de materia en la capa líquida estática adyacente a la membrana se torna máxima. Por lo tanto, será necesario reducir el espesor de esa capa líquida mediante la velocidad del fluido, para facilitar el transporte de materia de todos los sustratos desde el seno líquido hacia la biopelícula.

La colonización de una membrana micro-porosa permeable a gases sin aireación artificial por una biopelícula nitrificante es viable, y en este caso tomó entre 10-12 días. Sin embargo, la biopelícula que se formó básicamente realizó una nitrificación parcial de amonio a nitrito. Las bacterias oxidantes de nitrito se inhibieron por déficit de oxígeno. Cuando el interior de la membrana empezó a ser aireado artificialmente a presión atmosférica, la biopelícula produjo la nitrificación completa a nitrato.

La velocidad de nitrificación depende del suministro de oxígeno. Cuando la biopelícula es aireada de forma bi-direccional, desde el seno líquido y a través de las membranas, la velocidad de nitrificación es más elevada que cuando la aireación se realiza solo a través de las membranas.

La producción de fangos resultó nula o escasa porque no se produjo desprendimiento erosivo de biopelícula por ser nula la velocidad del fluido. Tampoco se produjo desprendimientos masivos de biopelícula. Así, la clarificación del efluente de un RBMA para nitrificación podría ser innecesaria.

El desarrollo de la biopelícula no mejoró significativamente la transferencia de oxígeno. Para reducir la resistencia a la transferencia de amonio desde el seno líquido sería necesario incrementar el esfuerzo cortante sobre la biopelícula mediante el aumento de la velocidad del fluido. Si aumenta el flujo de amonio hacia la biopelícula es de esperar un consiguiente aumento del flujo de oxígeno para nitrificación debido a la transferencia mejorada de oxígeno por vía biológica.

Agradecimientos.- Esta investigación ha recibido financiación del Plan Gallego de Innovación y Desarrollo Tecnológico. Tecnologías Ambientales (PGIDIT04PXIA11801PR y PGIDIT02TAM05E). Se agradece a EMALCSA por instalar la planta piloto en las dependencias de la EDAR de Bens.

REFERENCIAS

- Anthonisen, A.C., Loehr, R. C., Prakasam, T. B. S., y Srinath, E. G. (1976). "Inhibition of nitrification by ammonia and nitrous acid". *Journal of WPCF*, **48** (5): 835-852.
- APHA-AWWA-WPCF. (1992). Métodos Normalizados para el Análisis de las Aguas. Edición española por Díaz de Santos. Madrid.
- Bae, W., Baek, S., Chung, J., Lee, Y. (2001) "Optimal operational factors for nitrite accumulation in batch reactors". *Biodegradation*, **12**(5): 359 - 366.
- Brindle, K., Stephenson, T., Semmens, M. (1998) "Nitrification and oxygen utilisation in a membrane aeration bioreactor". *J. Membrane Science*, **144**: 197 – 209.
- Chun, J., Shim, H., Lee, YW., Bae, W. (2005). "Comparison of influence of free ammonia and dissolved oxygen on nitrite accumulation between suspended and attached cells". *Environ Technol.*, **26**(1): 21 – 33.
- Hu, S., Yang, F., Sun, C., Zhang, J., Wang, T. (2008). "Simultaneous removal of COD and nitrogen using a novel carbon-membrane aerated biofilm reactor". *J. Environmental Sciences*, **20**: 142 – 182.
- Jácome, A., Molina, J., Suárez, J., Tejero, I. (2006). "Simultaneous removal of organic matter and nitrogen compounds in autoaerated biofilms". *J. Env. Eng. ASCE*, **132**(10): 1.255 – 1.263.
- Osa, J.J., Eguía, E., Vidart, T., Jácome, A., Lorda, I., Amieva, J.J., Tejero, I. (1997). "Wastewater treatment with Biofilm Membrane Reactors". *Int. Conf. on Advanced Wastewater Treatment Processes*, University of Leeds, UK, Sept. 1-11.
- Shanahan, J.W., Semmens, M.J. (2006). "Influence of a nitrifying biofilm on local oxygen fluxes across a micro-porous flat sheet membrane". *J. Membrane Science*, **277**: 65 – 74.
- Suzuki, Y., Miyahara, S., and Takeishi, K. (1993). "Oxygen supply method using gas permeable film for wastewater treatment". *Wat. Sci. Tech.*, **28**(7): 243-250.
- Terada, A., Hibiya, K., Nagai, J., Tsuneda, S., Hirata, A. (2003). "Nitrogen removal characteristics and biofilm analysis of a membrane-aerated biofilm reactor applicable to high-strength nitrogenous wastewater treatment". *J. Bioscience and Bioengineering*, **95** (2): 170 – 178.
- Walter, B., Haase, C., Rübiger, N. (2005). "Combined nitrification/denitrification in a membrane reactor". *Wat. Res.*, **39**: 2781 – 2788.
- Williamson, K., McCarty, P.L. (1976). "A model of substrate utilization by bacterial films". *Journal WPCF*, **48**(1): 9 – 24.