

**Título:** REACTORES HÍBRIDOS CON MEMBRANAS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES URBANAS: APLICACIONES PARA LA ELIMINACIÓN DE CARBONO Y NITRÓGENO

**Nombre:** Rodríguez Hernández, Leticia

**Universidad:** Universidad de Cantabria

**Departamento:** Ciencias y técnicas del agua y del medio ambiente

**Fecha de lectura:** 04/04/2014

**Mención a doctor europeo:** concedido

**Programa de doctorado:** Ingeniería Ambiental Distinguido con Mención hacia la Excelencia

**Dirección:**

- > **Director:** JUAN IGNACIO TEJERO MONZÓN
- > **Director:** Ana Lorena Esteban García
- > **Codirector:** Juan Manuel Garrido Fernández

**Tribunal:**

- > **presidente:** PEDRO A. GARCÍA ENCINA
- > **secretario:** AMAYA M. LOBO GARCÍA DE CORTAZAR
- > **vocal:** Germán Cuevas Rodríguez

**Descriptor:**

- > TECNOLOGIA DE AGUAS RESIDUALES

**El fichero de tesis** ya ha sido incorporado al sistema

- > 2014rodrireact.pdf

**Localización:** BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

**Resumen:** Los procesos convencionales de fangos activos y de biopelícula se han aplicado extensamente y han demostrado su eficacia para la eliminación de carbono y nutrientes de las aguas residuales. No obstante, hoy en día se requieren nuevas tecnologías capaces de adaptarse a normativas cada vez más estrictas y a la creciente escasez de recursos de agua dulce.

Los reactores biológicos con membranas (RBM), en los cuales el proceso de fangos activos se integra con la separación sólido/líquido a través de membranas de filtración, es una de las nuevas tecnologías capaces de satisfacer estas necesidades. El RBM híbrido es el resultado de la combinación de un RBM con un reactor biopelícula, donde la biodegradación se lleva a cabo por ambas biomasas, en suspensión y en biopelícula. La adición de un medio soporte al RBM, se ha propuesto principalmente con el objetivo de superar algunas de las limitaciones de los RBM, como la eliminación de nutrientes y el ensuciamiento de membranas.

Teniendo en cuenta este contexto, en la presente tesis doctoral se investiga la aplicación de sistemas híbridos RBM para el tratamiento de las aguas residuales. Este trabajo se basa en la experimentación de diferentes configuraciones a escala de bancada y piloto, especialmente construidas, desarrolladas y modificadas con el

objetivo de ampliar el conocimiento sobre el efecto de los soportes biopelícula en estos sistemas.

Como punto de partida, en el capítulo 1 se incluye una revisión actualizada de la literatura en relación a los procesos biopelícula, la tecnología RBM y su combinación (RBM híbridos).

En el capítulo 2 se describen los materiales y métodos utilizados a lo largo de las diferentes experimentaciones. En la primera configuración propuesta (capítulo 3) se desarrolló a escala de bancada un nuevo RBM híbrido de configuración vertical, muy compacta y con requisitos optimizados de aireación. El reactor estuvo situado en la planta de tratamiento de aguas residuales municipales de Santander (España). Se alimentó con agua residual pre-tratada para realizar una evaluación previa de su funcionamiento como sistema alternativo a otros RBM convencionales. En este trabajo se empleó un medio soporte fijo tipo esponja ubicado por encima de la unidad de filtración, no observándose signos de sobrecarga durante toda la experimentación. El caudal de aireación, localizado debajo de la unidad de filtración, fue suficiente para la limpieza de la membrana, la oxigenación de ambas biomasas (biopelícula y en suspensión) y la mezcla del líquido en el reactor. A pesar de la gran variabilidad de la carga aplicada (valores medios de entre 1,1 y 2,7 kg DQO m<sup>-3</sup> d<sup>-1</sup>) se lograron altas eficiencias de eliminación de materia orgánica, con valores superiores al 90% en DQO y 96% en DBO<sub>5</sub>. Además, el nuevo RBM híbrido mostró un buen rendimiento en la eliminación de nitrógeno total (NT) a través de la nitrificación y desnitrificación simultánea, a pesar de aplicarle una aireación continua. En el afluente se alcanzó una concentración media de 7,3 mg NT L<sup>-1</sup>. Esta configuración fue capaz de obtener un afluente con calidad suficiente para reutilización en términos de contaminación bacteriológica, nitrógeno, materia orgánica, sólidos suspendidos y turbidez. Además, la recirculación pareció jugar un papel importante en el comportamiento del RBM híbrido. Con una recirculación del 300% se mejoró ligeramente la eficiencia de eliminación de carbono orgánico (99% vs. 96% in DBO<sub>5</sub>) y notablemente la eliminación de nitrógeno (98% vs. 91% en amonio; 80% vs. 69% en NT).

Estos resultados son mejores que los obtenidos en otros RBM híbridos y similares a los valores alcanzados usando RBM más complejos, con tanques anóxicos adicionales, aireación intermitente o deflectores internos. Una vez probado el nuevo RBM híbrido a escala de bancada, se construyó, arrancó y evaluó un RBM híbrido vertical original a escala piloto, para estudiar su viabilidad como tratamiento descentralizado (capítulo 4). Situado en la planta de tratamiento de aguas residuales municipales de Santander, la planta piloto demostrativa disponía de una unidad de pre-tratamiento (tamizado fino y desarenador) previo al reactor y se alimentó con agua residual bruta no decantada. El RBM híbrido consistió en un tanque de aireación de acero inoxidable con membranas de microfiltración sumergidas y un medio soporte fijo para el crecimiento de la biopelícula. A diferencia del capítulo 3, el medio soporte fijo empleado (llamado BLAS) fue de fabricación propia basado en un diseño específico desarrollado previamente por el Grupo de Ingeniería Ambiental de la Universidad de Cantabria.

La aplicación del RBM híbrido a escala piloto demostró ser técnicamente viable ya que fue capaz de tratar las aguas residuales municipales sin necesidad de decantación primaria, lo cual le confiere la alta compacidad que requieren los tratamientos descentralizados. Durante la experimentación, la carga orgánica aplicada osciló entre 0,36 y 1,76 kg DQO m<sup>-3</sup> d<sup>-1</sup>. Sin embargo, el sistema mantuvo buenos rendimientos generales. Las eliminaciones alcanzadas de materia orgánica en términos de DQO y DBO<sub>5</sub> fueron del 84% y 98%, respectivamente.

La eliminación de nitrógeno amoniacal fue del 97% y la de nitrógeno total del 75% (utilizando un único reactor), lo cual se atribuyó a la ocurrencia de nitrificación y desnitrificación simultáneas (SND). Las características medias del efluente obtenido fueron DQO < 55 mg L<sup>-1</sup>, SS < 4 mg L<sup>-1</sup>, NT < 10 mg L<sup>-1</sup> y turbidez < 2 NTU, cumpliendo con los estándares para descarga en zonas sensibles y para la reutilización.

En el capítulo 5, el objetivo fue comparar el comportamiento de la configuración RBM híbrida estudiado en el capítulo 4, con un RBM convencional. Para este propósito, se añadió otro reactor idéntico en diseño al RBM híbrido pero sin la adición del lecho fijo. Ambas plantas piloto fueron caracterizadas y funcionaron en paralelo. Se llevó a cabo un análisis estadístico para verificar si existían diferencias significativas entre los resultados obtenidos en ambos sistemas. Un estudio de trazadores mostró para ambos reactores un comportamiento hidrodinámico similar, con mezcla completa. En cuanto al coeficiente de transferencia de oxígeno,  $K_La$  (a 20 °C), se observó una mejora en el RBM híbrido con respecto al RBM convencional (33,9 h<sup>-1</sup> vs. 18,3 h<sup>-1</sup>), lo que se atribuyó al mayor tiempo de retención de las burbujas dentro del reactor de lecho fijo.

Ambos RBM mostraron buena eficiencia de eliminación en materia orgánica y amonio, aunque la calidad del efluente fue mejor en el RBM híbrido. Las eficiencias de eliminación de DQO, DBO<sub>5</sub> y N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> en el RBM híbrido fueron del 84, 98 y 97%, respectivamente, en comparación con 80, 96 y 93% en el RBM convencional. En el caso de la eliminación de la materia orgánica, la ligera mejora se atribuyó a la mayor concentración o actividad de la biopelícula. La mejor nitrificación se debe principalmente a la mayor resistencia a las puntas contaminantes en los sistemas híbridos en comparación con los fangos activos. El RBM híbrido también obtuvo mucha mejor eliminación de NT en comparación con el RBM convencional (promedio de 75 vs. 38% en el RBM convencional), lo que se explicó por la existencia de nitrificación y desnitrificación simultánea (SND) en este reactor. Los rendimientos medios de eliminación de fosfatos fueron de 42% en el RBM híbrido y de 37% en el RBM convencional, sin encontrarse diferencias estadísticas significativas. La eliminación del fósforo por PAOs parece ser insignificante debido a la baja concentración afluente de fosfatos y a los largos tiempos de retención celular (TRC  $\approx$  47  $\approx$  80 d). En consecuencia, la eliminación de fósforo sería debida principalmente a la asimilación por los microorganismos. En cuanto a las características del fango, el examen microscópico de los mismos reveló que la comunidad microbiana en el RBM híbrido era más rica que en el RBM convencional. Además, el fango del RBM híbrido tenía mejor filtrabilidad en comparación con el RBM convencional (promedio de 1,28  $\approx$  10<sup>12</sup> and 5,70  $\approx$  10<sup>12</sup> m kg<sup>-1</sup>, respectivamente) y mejor decantación (IVF con valores medios de 52 y 174 mL g<sup>-1</sup>, respectivamente).

El principal problema asociado a la aplicación de la tecnología de membranas para el tratamiento de aguas residuales es el ensuciamiento de la membrana. Por lo tanto, resultó de gran interés para este trabajo comparar la tasa de ensuciamiento y algunos indicadores del mismo entre ambas configuraciones RBM. Para ello, se emplearon como indicadores las concentraciones de sólidos en suspensión del licor mezcla (SSLM) y los biopolímeros coloidales (cBPC). Para el rango de operación probado en este trabajo (hasta 6 g L<sup>-1</sup>), no se encontró correlación entre la concentración de SSLM y la tasa de ensuciamiento. Con respecto a las concentraciones de cBPC, éstas fueron más altas y más variables en el RBM convencional comparado con el RBM híbrido, lo que también correspondió con una tasa de ensuciamiento más fuerte y variable. Este resultado sugiere que existe una cierta relación entre la tasa de ensuciamiento y la concentración de cBPC. En este sentido, la menor concentración de cBPC en el fango del RBM híbrido, probablemente debido a su retención por la biopelícula, pudo ser parcialmente responsable de la diferencia en el ensuciamiento. Como conclusión, todas las mejoras observadas en el RBM híbrido fueron atribuidas al crecimiento híbrido que se consigue cuando la biopelícula y la biomasa suspendida crecen simultáneamente.

La presencia de metano disuelto, especialmente a bajas temperaturas, representa un importante problema ambiental en términos de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en las aguas residuales tratadas con biorreactores metanogénicos. El metano tiene un potencial de calentamiento global de 25. Una alternativa para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y el contenido de nitrógeno de las aguas residuales tratadas es el uso del metano disuelto como una fuente de carbono para la desnitrificación biológica, pero su

viabilidad no se ha estudiado todavía en detalle. En el capítulo 6 de este trabajo, se propone un sistema RBM híbrido como post-tratamiento para biorreactores metanogénicos. El efluente de un reactor anaerobio de flujo ascendente (UASB) fue post-tratado en un RBM de dos compartimentos. El primer compartimento fue un reactor de lecho móvil anóxico (con soportes K3) cuyo propósito era utilizar el metano disuelto como fuente de carbono para la desnitrificación. El segundo compartimento fue un reactor aerobio de filtración con membranas. El sistema propuesto alcanzó hasta un 60% de consumo de metano y un 95% de eliminación de nitrógeno. El ratio de recirculación entre el compartimento aeróbico y el anóxico, y la concentración de metano disuelto, se mostraron como parámetros importantes que gobiernan este proceso. Los ratios de recirculación más bajos estudiados (entre 0,5 y 1) mostraron la mayor eliminación de nitrógeno y las emisiones de metano más bajas. La eliminación de nitrógeno se redujo de 60% a 27% cuando se procedió a la desorción del metano disuelto del efluente del UASB. Así, el porcentaje de eliminación de nitrógeno procedente de la oxidación de metano pudo suponer hasta el 33% del total. Además, los ensayos en batch y los análisis de FISH indicaron la presencia de microorganismos capaces de desnitrificar usando metano disuelto como fuente de carbono, tanto en condiciones aeróbicas como anaeróbicas. Parece que la desnitrificación la llevan a cabo un consorcio de bacterias oxidantes de metano aerobias y anaerobias, anammox y bacterias heterotróficas. También se estudió la influencia de la desnitrificación con metano en el rendimiento de la membrana. Se observaron las mayores concentraciones de cBPC y las permeabilidades más bajas cuando disminuyó la actividad de desnitrificación.

El RBM híbrido propuesto parece ser una tecnología adecuada para el post-tratamiento de los reactores UASB. La presencia de biopelícula favoreció el desarrollo de una amplia variedad de poblaciones de microorganismos, lo que podría ser ventajoso para el crecimiento de aquellos implicados en el proceso de desnitrificación. Además, el uso de membranas permite una retención completa de bacterias de crecimiento lento que participan en la eliminación de nitrógeno y metano.

En conclusión, a partir del trabajo realizado en esta tesis se obtuvo información, a escala de bancada y piloto, importante para el funcionamiento de los reactores biológicos híbridos con membranas. Estos reactores han demostrado ser una tecnología atractiva para la eliminación de carbono y nitrógeno de las aguas residuales urbanas.