

Viabilidad de la tecnología de membranas para el pre-cosechado de microalgas en dos sistemas de cultivo. Aplicación para el tratamiento del agua residual urbana.

J. Serralta¹, A. Robles^{1,2}, M.V. Ruano³, A. Jiménez-Benítez¹, R. Pretel¹, A. Viruela¹, J. González-Camejo¹, F. Durán¹, R. Barat¹, A. Gales², J. Ribes³, B. Sialve², J.P. Steyer², J. Ferrer¹, A. Seco³

¹ Institut Universitari d'Investigació d'Enginyeria de l'Aigua i Medi Ambient (IIAMA). Universitat Politècnica de València. Camí de Vera, s/n. 46022 – Valencia. Valencia.

² UR0050 Laboratoire de Biotechnologie de l'Environnement (LBE). Institut National de la Recherche Agronomique (INRA). Avenue des Etangs, 102. 11100 – Narbonne. Francia.

³ Departament d'Enginyeria Química. Universitat de València. Avinguda de la Universitat, s/n. 46100 – Burjassot. Valencia.

*jserralt@hma.upv.es

Resumen

El objetivo de este trabajo es evaluar la viabilidad técnica y económica de dos plantas piloto para la generación de biomasa algal y consiguiente tratamiento del agua residual. Dichas plantas consisten principalmente en una unidad de filtración acoplada a un sistema de cultivo de microalgas (estanque abierto y fotobiorreactores). En este trabajo se presentan parte de los resultados obtenidos en el marco del proyecto MAB 2.0 (www.algaerefinery.eu), financiado por el programa Climate-KIC (www.climate-kic.org) (APIN0057_2015-3.6-230_P066-05).

Palabras Clave: Cultivo de microalgas; estanques abiertos; fotobiorreactores; membranas sumergidas; recuperación de recursos.

Introducción

Uno de los métodos de tratamiento del agua residual que está atrayendo gran atención en los últimos años es a través del cultivo y cosechado de microalgas autótrofas, principalmente gracias a su capacidad para combatir el efecto invernadero (e.g. captación de CO₂ atmosférico), convertir la energía solar en energía química, y captar los nutrientes presentes en el medio de cultivo (Cai et al., 2013).

El cultivo de microalgas se lleva a cabo principalmente bien en estanques abiertos, o bien en fotobiorreactores cerrados. Las principales ventajas de los estanques abiertos son su fácil operación y bajo coste de inversión y operación, pero son muy sensibles a la contaminación y tienen baja capacidad de automatización. Los fotobiorreactores, por el contrario, presentan costes de inversión elevados, pero resuelven los problemas asociados a la contaminación y al control automático del proceso (Ho & Chen, 2011).

El cosechado de las microalgas se puede llevar a cabo mediante diversas técnicas, siendo la filtración la principal alternativa para la retención, concentración y recolección de microalgas para operaciones en continuo y a gran escala, ya que mitiga algunos de los inconvenientes observados en otras técnicas (e.g. elevado coste de operación, elevado consumo energético, daño en la pared celular). Además, el cosechado de microalgas por filtración permite el desacoplamiento de los tiempos de residencia hidráulico y de la biomasa, permitiendo optimizar la producción y el cosechado de biomasa algal y el coste asociado al proceso.

El objetivo de este trabajo es evaluar la viabilidad técnica y económica de dos plantas piloto para la generación de biomasa algal y consiguiente tratamiento del agua residual. Dichas plantas consisten principalmente en una unidad de filtración acoplada a un sistema de cultivo de microalgas (estanque abierto y fotobiorreactores). En este trabajo se presentan parte de los resultados obtenidos en el marco del proyecto MAB 2.0 (www.algaerefinery.eu), financiado por el programa Climate-KIC (www.climate-kic.org) (APIN0057_2015-3.6-230_P066-05).

Materiales y Métodos

La Figura 1 muestra el diagrama de flujo de las plantas piloto utilizadas en este estudio. Estas plantas consisten principalmente en una unidad de filtración acoplada a un sistema de cultivo de microalgas (estanque abierto y fotobiorreactores). La planta constituida por una unidad de filtración y un estanque abierto (MHRAP, del inglés *membrane-coupled high-rate algal pond*) consiste principalmente en un estanque de algas de 22 m³ de volumen útil (0,3 m de profundidad) conectado a dos tanques de membranas. La planta constituida por una unidad de filtración y un sistema de fotobiorreactores (MPBR, del inglés *membrane photobioreactor*) está formada por dos reactores rectangulares de placa plana de metacrilato transparente también conectados a dos tanques de membranas. Cada fotobiorreactor tiene un volumen útil de 550 L (1,25 m de altura, 2,00 m de ancho y 0,25 m de profundidad).

Cada tanque de membranas tiene un volumen de operación de 14 L e incluye un ramillete de membranas de fibra hueca de ultrafiltración (0.05 μm de diámetro de poro) extraído de un módulo de filtración de escala industrial (PURON® Koch Membrane Systems, PUR-PSH31). Cada ramillete tiene un área total de filtración de 3,44 m^2 .

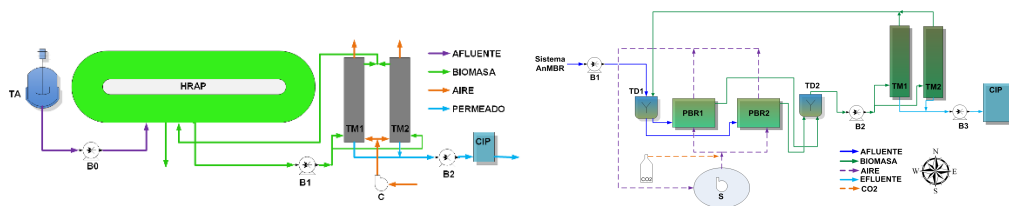


Figura 1. Diagrama de flujo de las plantas (a) MHRAP y (b) MPBR. Nomenclatura: B: bomba; C: compresor; CIP: tanque de limpieza (clean-in-place); HRAP: estanque de algas (high-rate algal pond); PBR: fotobiorreactor; TA: tanque de alimentación; TD: tanque de distribución; TM: tanque de membranas.

La planta MHRAP, localizada en Narbona (Francia), se operó con un tiempo de retención celular (TRC) de 7 días y tiempo de retención hidráulico (TRH) de 7, 5 y 3 días. La radiación solar media fue de $435 \pm 107 \mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$, mientras que la temperatura del cultivo fue de $23 \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$. Las membranas operaron a un flujo transmembrana puntual (J) de $28 \text{ L}/\text{m}^2/\text{h}$, equivalente a un flujo transmembrana neto (J_{net}) de aproximadamente $22 \text{ L}/\text{m}^2/\text{h}$. La demanda específica de aire por metro cuadrado de membrana (SAD_m) se mantuvo en torno a $0,25 - 0,30 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{h}$. La Tabla 1 muestra la caracterización del agua residual afluyente (de origen sintético) durante el periodo experimental.

Parámetro	Unidad	Media \pm DS
NH_4^+	mg N/L	$17,3 \pm 8,1$
N_T	mg N/L	$45,5 \pm 24,2$
PO_4^{3-}	mg P/L	$3,9 \pm 1,6$
P_T	mg P/L	$6,1 \pm 2,2$
DQO_T	mg/L	332 ± 55
SSV	mg/L	89 ± 24

Tabla 1. Caracterización del afluyente a la planta MHRAP durante el periodo experimental

La planta MPBR, situada en Valencia (España), se operó con un TRC de 4,5 días y TRH de 4,5, 3,0 y 2,5 días. La radiación solar media y la temperatura del cultivo fue de $265 \pm 64 \mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$ y $25,0 \pm 2,5 \text{ }^\circ\text{C}$, respectivamente. Al igual que para el caso anterior, las membranas operaron a J de $28 \text{ L}/\text{m}^2/\text{h}$, equivalente a J_{net} de aproximadamente $22 \text{ L}/\text{m}^2/\text{h}$. SAD_m se controló en torno a $0,25 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{h}$. La planta MPBR se operó a partir del efluente de un sistema AnMBR que trata agua residual urbana (Giménez et al., 2011). La concentración afluyente de nutrientes a la planta MPBR durante el periodo experimental fue $52,4 \pm 13,2 \text{ mg NH}_4\text{-N}\cdot\text{L}^{-1}$ and $6,5 \pm 1,6 \text{ mg PO}_4\text{-P}\cdot\text{L}^{-1}$.

Las concentraciones de demanda química de oxígeno (DQO), nitrógeno total (N_T), fósforo total (P_T), amonio (NH_4^+), nitrato (NO_2^-), nitrito (NO_3^-), fosfato (PO_4^{3-}) y sólidos suspendidos volátiles (SSV) se analizaron según lo especificado en Standard Methods (APHA, 2005).

Resultados y Discusión

En lo que respecta a la planta MHRAP, la producción de biomasa algal alcanzó valores en torno a $40 \text{ g SSV}/\text{m}^3/\text{d}$ operando a TRH igual a TRC (7 días). Bajo estas condiciones de operación, la tasa de captación de nutrientes alcanzó valores de 4 y $0,5 \text{ g}/\text{m}^3/\text{d}$ de nitrógeno y fósforo, respectivamente. Sin embargo, cabe destacar el incremento observado tanto en la producción de biomasa como en la tasa de captación de nutrientes tras desacoplar el TRH del TRC mediante la incorporación de la unidad de filtración (i.e. cuando el TRH se redujo de 7 a 5 y 3 días). Concretamente, la producción de biomasa algal aumentó desde 40 a 70 y $100 \text{ g SSV}/\text{m}^3/\text{d}$ y la tasa de captación de nitrógeno aumentó desde 4 hasta 9 y $12 \text{ g N}/\text{m}^3/\text{d}$, para TRH de 7, 5 y 3 días, respectivamente. Por tanto, el desacople del TRH del TRC propició una mejora de la eficiencia del proceso.

En lo referente a la filtración, la planta MHRAP fue operada aplicando demandas específicas de aire por volumen de permeado (SAD_P) para la limpieza física de las membranas de en torno a 15. Este valor se encuentra en el rango de operación típico de sistemas MBR. Además, fue posible operar de forma ininterrumpida durante aproximadamente un mes sin necesidad de aplicar un tratamiento químico de limpieza a las membranas.

El valor de SAD_P obtenido implica un consumo energético asociado a la limpieza física de las membranas de $0,22 \text{ kWh}$ por m^3 de agua tratada. Este consumo constituye aproximadamente el 88% de la demanda energética total de la planta MHRAP. En concreto, el consumo energético total del sistema fue $0,26 \text{ kWh}/\text{m}^3$. Los costes de operación y mantenimiento del sistema MHRAP fueron de $0,046\text{€}$ por m^3 de agua tratada.

Este coste puede desglosarse de la siguiente forma: reemplazo de membranas tras superar su vida útil (38%), limpieza física de las membranas mediante agitación por aire (36%), limpieza química de las membranas (16%), y otros (10%).

Respecto a la planta MPBR, la producción de biomasa algal alcanzó valores alrededor de 50 g SSV/m³/d al operar a TRH igual a TRC (4,5 días). Bajo estas condiciones de operación, la tasa de captación de nutrientes alcanzó valores en torno a 4 y 0,6 g/m³/d de nitrógeno y fósforo, respectivamente.

La producción de biomasa algal aumentó desde 50 a 70 y 90 g SSV/m³/d y la tasa de captación de nitrógeno aumentó desde 4 hasta 9 y 16 g N/m³/d, para TRH de 4,5, 3 y 2,5 días, respectivamente. Por ende, al igual que ocurría para el caso de la planta MHRAP, tanto la producción de biomasa como la tasa de captación de nutrientes mejoró al desacoplar el TRH del TRC. De hecho, ambos sistemas proporcionaron resultados similares a pesar de las diferencias existentes entre los parámetros de operación aplicados.

En lo referente a la filtración, el sistema MPBR permitió operar con valores de SAD_P en torno a 15 durante aproximadamente tres meses sin necesidad de aplicar un tratamiento químico de limpieza a las membranas. Por tanto, el coste asociado a la limpieza química de las membranas y a la reposición de las mismas al final de su vida útil fue menor para caso de la planta MPBR. Concretamente, el coste de operación y mantenimiento del sistema MPBR resultó en 0,051€ por m³ de agua tratada, el cual se desglosa de la siguiente forma: reemplazo de membranas tras superar su vida útil (34%), limpieza física de las membranas mediante agitación por aire (33%), agitación de los fotobiorreactores (15%), limpieza química de las membranas (9%), y otros (9%). Cabe destacar que, a pesar de reducir los costes asociados a la limpieza química de las membranas y reemplazo de las mismas, el sistema MPBR resultó en costes de operación y mantenimiento superiores debido a la inclusión de fotobiorreactores (e.g. sistema de agitación de fotobiorreactores). Además, la demanda energética asociada al cultivo y pre-cosechado de microalgas aumentó hasta 0,28 kWh por m³ de agua tratada para el caso del sistema MPBR, debido a la agitación de los fotobiorreactores. En concreto, la agitación de las membranas para su limpieza física contribuyó en un 81% a la demanda energética total del sistema, mientras que la agitación de los fotobiorreactores supuso un 8%.

Cabe destacar que, a pesar de las diferencias asociadas a los costes de limpieza química de las membranas y reemplazo de las mismas, así como a la agitación de los fotobiorreactores, ambos sistemas (MHRAP y MPBR) presentaron consumos energéticos y costes de operación y mantenimiento similares. Sin embargo, el sistema MPBR presenta costes de inversión superiores (e.g. costes de inversión del sistema de distribución y suministro de aire a los fotobiorreactores o coste de los propios fotobiorreactores), aunque el sistema MPBR permite un mayor control del proceso.

Conclusiones

El objetivo de este trabajo es evaluar la viabilidad técnica y económica de dos plantas piloto para la generación de biomasa algal y consiguiente tratamiento del agua residual. Dichas plantas consisten en una unidad de filtración acoplada a un sistema de cultivo de microalgas (estanque abierto y fotobiorreactores). Tanto para el caso de la planta MHRAP como para la planta MPBR, el desacople del TRH del TRC propició una mejora en la eficiencia del proceso, expresada como productividad de biomasa algal y tasa de captación de nutrientes. Ambos sistemas presentaron consumos energéticos y costes de operación y mantenimiento similares.

Agradecimientos

Los autores agradecen la financiación recibida del Programa Climate-KIC (www.climate-kic.org) del Instituto Europeo de Innovación y Tecnología (<https://eit.europa.eu/>) para llevar a cabo el Proyecto MAB 2.0 (www.algaerefinery.eu), titulado "Microalgae Biorefinery 2.0" (APIN0057_2015-3.6-230_P066-05). Ángel Robles agradece la financiación recibida del programa post-doctoral VALi+d de la Generalitat Valenciana (APOSTD/2014/049).

Referencias

1. APHA, 2005. Standard methods for the examination of water and wastewater, 20th ed., American Public Health Association, Washington, DC.
2. Cai, T., Park, S.Y. and Li, Y. (2013), Nutrient recovery from wastewater streams by microalgae: Status and prospects. *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 19, 360-369.
3. HO, S.H. & CHEN, C.Y. (2011). "Perspectives on microalgal CO₂-emission mitigation systems- A review". *Biotechnological Advances*. 29, pp. 189-198.
4. J.B. Giménez, A. Robles, L. Carretero, F. Durán, M.V. Ruano, M.N. Gatti, J. Ribes, J. Ferrer, A. Seco (2011) Experimental study of the anaerobic urban wastewater treatment in a submerged hollow-fibre membrane bioreactor at pilot scale. *Bioresour. Technol.* 102(19), 8799–8806.