

Artículo científico

Remoción y balance de masa en un reactor UASB en el tratamiento de agua residual de una industria chocolatera

Mercedes Lucero Chávez¹ * , Mario Esparza Soto¹ ,
Sergio Alcaraz Ibarra¹  & Miroslava de los Ángeles Mier Quiroga¹ 

Resumen

El tratamiento es necesario actualmente para aguas residuales municipales e industriales, ante la disminución de la cantidad y calidad del agua disponible. Un reactor biológico anaerobio es una buena opción para su tratamiento porque genera biogás, que contiene metano, una potencial fuente de energía. En esta investigación se tuvo como objetivo tratar agua residual de una industria chocolatera con una carga orgánica volumétrica aplicada (COV_{apl}) de 4.5 kg de demanda química de oxígeno (DQO)/m³/d y un tiempo de retención hidráulica (TRH) de 10.3 h para obtener la eficiencia de remoción y el balance de masa en términos de DQO. Se tuvieron variaciones en la COV_{apl} y en el TRH, sin embargo, la eficiencia de remoción promedio fue de 91%. El balance de masa para DQO calculado fue cercano al 100%.

Palabras clave: Reactor UASB, balance de masas, agua residual industrial.

Abstract

Treatment is currently necessary for municipal and industrial wastewaters, given the declining quantity and quality of available water. An anaerobic biological reactor is a suitable option for wastewater treatment because it generates biogas which contains methane, a potential source of energy. The objective of this research was to treat wastewater from a chocolate industry with an applied organic loading rate (OLR_{appl}) of 4.5 kg of chemical oxygen demand (COD)/m³/d and a hydraulic retention time (HRT) of 10.3 h to obtain both, the removal efficiency, and the mass balance in terms of COD. Even though there were variations in the OLR_{appl} and the TRH, the average removal efficiency of COD was 91%. The calculated mass balance in terms of COD was close to 100%.

Key words: UASB reactor, mass balance, industrial wastewater.

Recibido: 08 de enero de 2024.

Aceptado: 19 de abril de 2024.

Introducción

El tratamiento de las aguas residuales se ha vuelto esencial en vista de la disminución en la cantidad y calidad del agua, tanto en fuentes superficiales como subterráneas. En este contexto, resulta especialmente beneficioso emplear un proceso anaerobio que no solo depure el agua

residual, sino que también genere un subproducto valioso, el biogás, que contiene una elevada proporción de metano y puede utilizarse como fuente de energía. Una opción recomendada para este tipo de tratamiento es el reactor anaerobio de flujo ascendente (UASB, por sus siglas en inglés).

¹ Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua, Carretera Toluca – Ixtlahuaca km. 14.5, San Cayetano Morelos, Toluca, Estado de México. CP. 50120.

* **Autor de correspondencia:** mlucero@uaemex.mx (MLC)

El reactor UASB se ha utilizado para el tratamiento de aguas residuales sintéticas (Santiago-Díaz *et al.* 2021), urbanas (Cecconet *et al.* 2022) y de diversas industrias (Saner *et al.*, 2014, Artsupho *et al.* 2016, Niwa *et al.* 2016, Bakraoui *et al.* 2020). Su versatilidad radica en su capacidad para tratar tanto bajas como altas cargas orgánicas a temperaturas mesofílicas y psicofílicas. La eficiencia de remoción de demanda química de oxígeno (DQO) puede ser superior al 80 %; sin embargo, si se trabaja con altas COV_{apl} es posible que se requiera un tratamiento adicional. La COV_{apl} se refiere a la cantidad de materia orgánica que ingresa al reactor UASB por m^3 por día, siendo los días en función del tiempo de retención hidráulica (TRH). Este TRH es el tiempo que el agua residual permanece en el reactor UASB. La temperatura óptima para el crecimiento de microorganismos anaerobios suele ser de alrededor de 35 °C (Mazaheri *et al.* 2024).

Saner *et al.* (2014) indicaron rangos de temperatura para condiciones psicofílicas (0–20 °C), mesofílicas (20–42 °C) y termofílicas (42–75 °C). Cecconet *et al.* (2022) utilizó el término de temperatura submesofílica para temperaturas en torno a los 25 °C.

Un aspecto fundamental en este proceso es el balance de masa, que tiene como propósito cuantificar la materia orgánica que entra al reactor, los cambios que ocurren en su interior y lo que sale del mismo. Este análisis se realiza una vez que el reactor opera en condiciones estables.

Debido a lo anterior, el objetivo de la presente investigación fue obtener la eficiencia de remoción y el balance de masa en un reactor UASB que trató un agua residual de una industria chocolatera, aplicando una COV_{apl} de 4.5 kg DQO/ m^3/d y un TRH de 10.3 h.

Material y métodos

El reactor UASB a escala piloto utilizado tuvo un volumen efectivo de 130 L (forma de Y, altura 3 m y diámetro 0.3 m), seguido del reactor se conectó una columna de desorción (altura 1.5 m y diámetro 0.3 m) modificada de Glória *et al.* (2016). La COV_{apl} propuesta fue de 4.5 kg DQO/ m^3/d y TRH de 10.3 h. Para obtener la COV_{apl} propuesta se requirió una concentración de DQO de 1500 mg/L, para lo cual se diluyó el agua residual de la industria chocolatera. El agua residual proveniente de la industria chocolatera tiene una DQO > 2000 mg/L y un pH ácido < 6.0 (Mier-Quiroga *et al.* 2023).

La investigación se llevó a cabo durante un período de 32 días, con muestreos realizados cinco días a la semana. Durante los muestreos, se midieron varios parámetros, incluyendo el flujo de agua residual a tratar, el pH, la temperatura, el biogás (utilizando el modelo BK – G1.6 de Elster AMCO) y el porcentaje de metano (Spanjers & Vanrolleghem 2019). El pH y la temperatura se midieron tanto en el influente como en el efluente. Además, se tomaron muestras cada tercer día para medir la DQO, los sólidos suspendidos totales (SST) y los sólidos suspendidos volátiles (SSV). También se evaluó el contenido de metano disuelto en el efluente, utilizando el método propuesto por Chandran *et al.* (2019), al inicio y al final de la columna de desorción.

El metano disuelto recuperado de la columna de desorción se midió en una pecera con un vaso de precipitado invertido. Los SST y SSV se muestrearon en la cama de lodos del reactor UASB al inicio y final del periodo de operación del reactor. Los parámetros se midieron y analizaron de acuerdo con los métodos estándar (APHA 2017).

Resultados y discusión

El caudal medido fue de 284.56 ± 22.91 L/d, lo que dio lugar a un TRH de 11.03 ± 0.83 h, cercano al propuesto de 10.3 h. La velocidad ascensional de 0.17 ± 0.01 m/h fue baja de acuerdo con los valores recomendados por Metcalf & Eddy (2014) (1.0-1.5 m/h), este es un parámetro que puede influir en la fuga de lodos.

El pH de operación del reactor UASB para el influente fue de 6.34 ± 0.30 y para el efluente de 7.05 ± 0.21 , el pH está cercano al neutro que es lo óptimo para los microorganismos anaerobios (Rakmak & Promraska 2022).

La temperatura de operación del reactor UASB para el influente fue de 23.95 ± 2.18 °C y para el efluente de 22.81 ± 1.66 °C. La temperatura a la que operó el reactor UASB fue baja y permitió un desempeño óptimo con respecto al pH.

La DQO del influente varió con respecto al tiempo, lo anterior por la variación del agua cruda de la industria chocolatera. A pesar de esta variación de la DQO del

influyente, la DQO del efluente fue < 250 mg/L. El porcentaje de eficiencia para la DQO fue de 91 ± 2 % (Fig. 1), superior a la indicada por Dutta *et al.* (2018). La correlación de la COV_{apl} y la COV_{rem} indica un porcentaje de remoción de 96 % cercano al obtenido experimentalmente de 91 %, con una R^2 de 0.9973 (Fig. 2).

Los SST y SSV en el efluente reflejaron la variación que se mostró de la DQO, a pesar de los valores obtenidos en el efluente, la relación de SSV/SST fue para el efluente de 73%, se esperaba que esta relación fuera cercana al 80%. La relación de SSV y SST en el efluente como se observa varió en función de la presencia de estos durante el periodo de operación del reactor (Figura 3). Los puntos iniciales y finales pueden deberse a algún problema de desestabilización de la cama de lodos debido a problemas con la bomba de alimentación, no se omiten estos datos para tener presente lo que puede pasar en un proceso de tratamiento (Fig. 3). Los SST y SSV en la cama de lodos del reactor incrementaron teniendo en cuenta el inicio

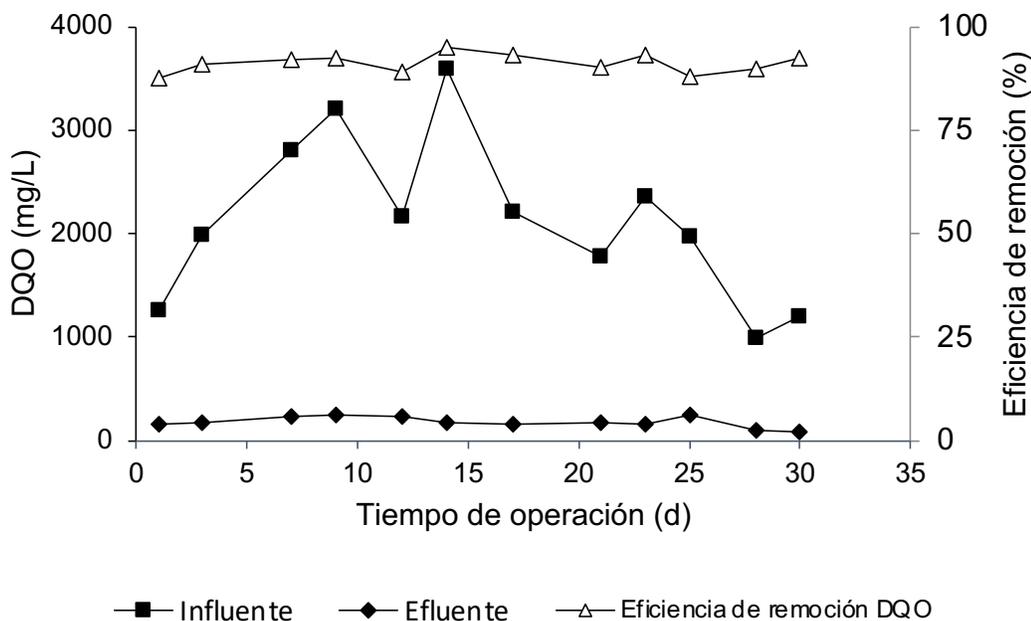


Figura 1. Variación de la concentración de DQO del influente y efluente y eficiencia de remoción con respecto al tiempo del periodo de operación del reactor.

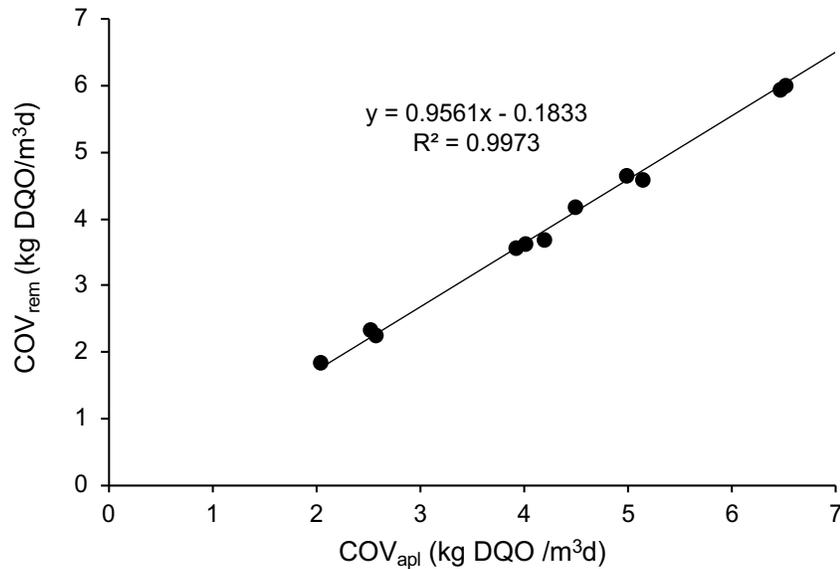


Figura 2. Porcentaje de remoción obtenido con respecto a la correlación de la COV_{apl} y COV_{rem} durante el periodo de operación del reactor.

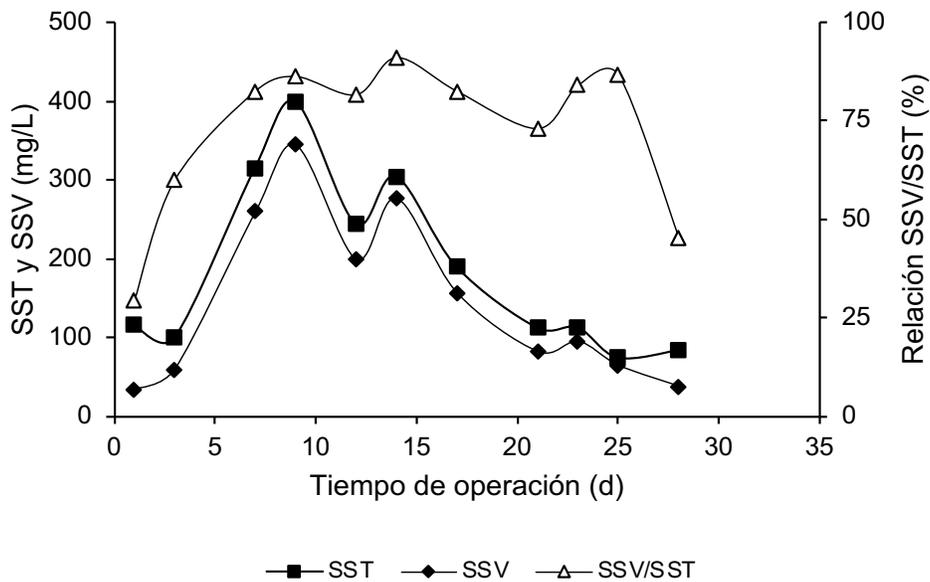


Figura 3. Concentración de SST y SSV, relación SSV/SST con respecto al tiempo de operación del reactor.

(14,500 y 11,550 mg/L, respectivamente) y el final (16,402 y 14,070 mg/L, respectivamente) del periodo de operación del reactor. Para el inicio en la cama de lodos la relación de SSV/SST fue de 80% y para el final fue de 86%. La relación de SSV/SST indica la presencia de microorganismos en la cama de lodos que permitieron

degradar la materia orgánica presente (Rizvi *et al.* 2015).

La relación entre el metano teórico y el metano medido muestra que sólo un 61% del total del metano producido fue recuperado con una R^2 de 0.9378 (Fig. 4). Considerando cinco puntos donde se midió el metano disuelto en el efluente al

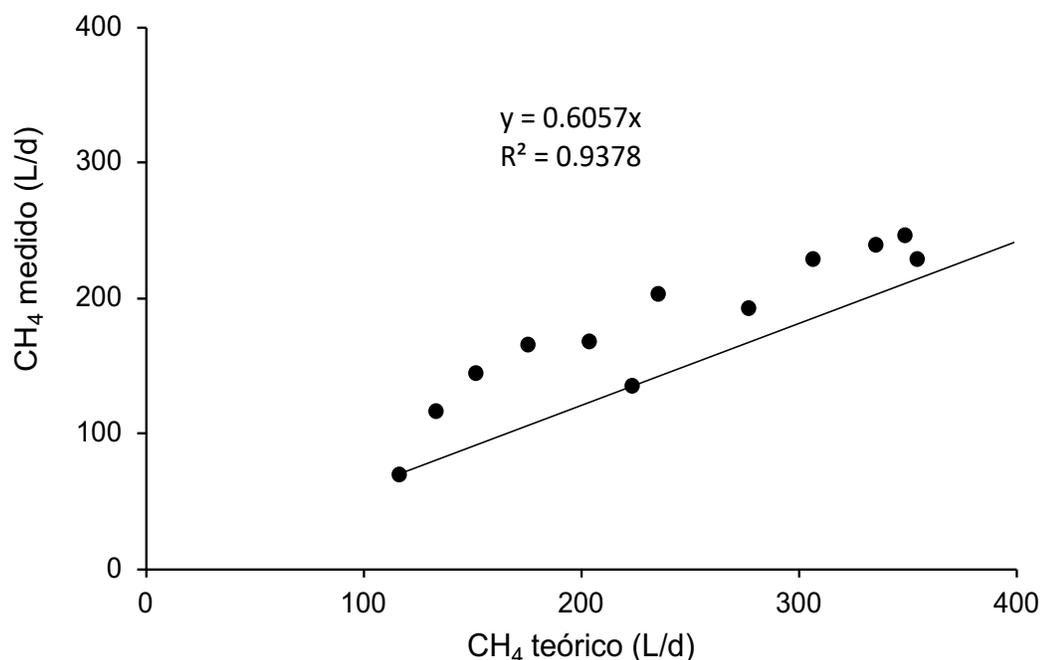


Figura 4. La obtención del porcentaje de metano recuperado con respecto a la correlación entre el metano teórico y el metano medido durante el periodo de operación del reactor.

mismo tiempo que el metano en el reactor UASB, se tuvo un 75 % del metano recuperado con una $R^2 = 0.9845$. Valor que está cercano al reportado por Lara-Domínguez (2013) de 74 %, que trabajó con un reactor UASB a escala piloto UASB de 244 L con diferentes COV_{apl} (0.7 - 6.2 kg DQO/ m^3/d) y TRH (13.4 - 6.2 h) y mismo tipo de agua residual.

El metano disuelto en el efluente antes de la columna de desorción (19.37 ± 4.09 L/d) y después de la columna de desorción (12.93 ± 4.69 L/d), se obtuvo por diferencia de los valores obtenidos antes y después de la columna (6.44 ± 3.67 L/d), se consideró también los datos del metano disuelto que se recuperó de la parte superior de la columna de desorción (5.51 ± 1.20 L/d) para calcular el porcentaje de recuperación de metano en la columna de desorción, que fue de 86%. El metano disuelto en el efluente sin recuperar en la columna de desorción fue de 67%, mayor que el reportado por Souza *et al.* (2011) que fue alrededor de 36 a 41%. La columna de

desorción requiere más modificaciones para que la diferencia de metano disuelto antes y después de la columna sea mayor a la obtenida.

El balance de masa se realizó considerando el flujo másico de la DQO (Fm-DQO) del influente (0.606 kg/d = 100%). El Fm-DQO de los SSV contenidos en la cama de lodos del reactor (0.016 kg/d = 2.56%), Fm-DQO del metano (0.455 Kg/d = 75.18%), Fm-DQO del metano disuelto en el efluente después de la columna de desorción (0.043 Kg/d = 7.06%), Fm-DQO de los SSV del efluente (0.042 Kg/d = 7.00%), Fm-DQO del efluente (0.051 Kg/d = 8.40%). La suma de los porcentajes dio de 100.20%, que considerando el redondeo de cifras sería un valor del 100%. Autores que han reportado el balance de masa para reactores anaerobios coinciden en obtener un valor del 100 % (Nada *et al.* 2011, Saner *et al.* 2014, Santiago-Díaz *et al.* 2021).

Conclusiones

En esta investigación destacó la efectividad de un reactor UASB a escala piloto en el tratamiento de aguas residuales industriales de una chocolatera. El reactor mantuvo un TRH cercano al objetivo, evidenciando un buen funcionamiento sin pérdida de lodos. El pH se mantuvo en niveles óptimos para los microorganismos anaerobios. A pesar de las fluctuaciones en la DQO del influente, se logró una alta eficiencia de remoción del 91 %. La correlación entre COV_{apl} y COV_{rem} respaldó la eficacia del proceso.

Los análisis de sólidos suspendidos y la relación SSV/SST en el efluente demostraron la presencia de microorganismos clave en la degradación de la materia orgánica. La recuperación de metano fue eficiente, con un 61 % del metano teórico recuperado. Aunque hubo margen para mejorar la recuperación de metano disuelto, los resultados superaron los valores previos reportados. El balance de masa respaldó la viabilidad del reactor UASB como opción sostenible para el tratamiento de aguas residuales industriales, con un potencial prometedor en la generación de energía renovable.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer al Consejo Mexiquense de Ciencia y Tecnología (COMECYT) por el apoyo económico para la realización de esta investigación. A dos revisores anónimos quienes aportaron valiosos comentarios para mejorar el presente trabajo.

Referencias

- APHA, A. W. 2017. Standard methods for the examination of water and wastewater (23rd ed.). Standard Methods Manager and Joint.
- Artsupho, L., P. Jutakradsada, A. Laungphairojana, J. F. Rodriguez & K. Kamwilaisak. 2016. Effect of temperature on increasing biogas production from sugar industrial wastewater treatment by UASB process in pilot scale. *Energy Procedia*, 100, 30–33. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.10.143>
- Bakraoui, M., F. Karouach, B. Ouhammou, M. Aggour, A. Essamri & H. EL Bari. 2020. Biogas production from recycled paper mill wastewater by UASB digester: Optimal and mesophilic conditions. *Biotechnology Reports*, 25, e00402. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2019.e00402>
- Ceconet, D., A. Callegari & A. G. Capodaglio. 2022. UASB performance and perspectives in urban wastewater treatment at sub-mesophilic operating temperature. *Water*, 14(1), 115. <https://doi.org/10.3390/w14010115>
- Chandran, K., E. I. P. Volcke & M. C. van Loosdrecht. 2019. Ensayos de emisión de gases. En C. M. López Vázquez, C. Méndez Gutiérrez, & C. Fall (Eds.), *Métodos experimentales para el tratamiento de aguas residuales* (pp. 195–222). IWA Publishing.
- Dutta, A., C. Davies & D. S. Ikumi. 2018. Performance of upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactor and other anaerobic reactor configurations for wastewater treatment: A comparative review and critical updates. *Journal of Water Supply: Research and Technology – AQUA*, 67(8), 858–884. <https://doi.org/10.2166/aqua.2018.090>
- Glória, R. M., T. M. Motta, P. V. O. Silva, P. da Costa, E. M. F. Brandt, C. L. Souza & C. A. L. Chernicharo. 2016. Stripping and dissipation techniques for the removal of dissolved gases from anaerobic effluents. *Brazilian Journal of Chemical Engineering* 33(4): 713–721. <https://doi.org/10.1590/0104-6632.20160334s20150291>
- Lara-Domínguez, F. J. 2013. Recuperación y utilización del biogás producido por un reactor UASB para el incremento de su desempeño. Universidad Autónoma del Estado de México.
- Mazaheri, A., M. Reza Doosti & M. Javad Zoqi. 2024. Evaluation of upflow anaerobic sludge blanket (UASB) performance in synthetic vinasse treatment. *Desalination and Water Treatment*, 317: 100069. <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100069>

- Metcalf, D. & H. Eddy. 2014.** Wastewater engineering. Treatment and resource recovery. McGraw Hill.
- Mier-Quiroga, M. A., M. Esparza-Soto, M. Lucero-Chávez & S. Alcaraz-Ibarra. 2023.** Monitoreo y análisis de un reactor UASB operado a diferentes cargas volumétricas aplicadas. *Diotima, Revista Científica de Estudios Transdisciplinaria*, 8(3), 1-6.
- Nada, T., A. Moawad, F. A. El-Gohary & M. N. Farid. 2011.** Full-scale municipal wastewater treatment by up flow anaerobic sludge blanket (UASB) in Egypt. *Desalination and Water Treatment*, 30(1-3), 134-145. <https://doi.org/10.5004/dwt.2011.2577>
- Niwa, T., M. Hatamoto, T. Yamashita, C. Noguchi, O. Takase, K. A. Kekre, W. S. Ang, G. Tao, Seah, H. & H. Yamaguchi. 2016.** Demonstration of a full-scale plant using an UASB followed by a ceramic MBR for the reclamation of industrial wastewater. *Bioresource Technology*, 218, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.06.036>
- Rakmak, N. & A. Promraska. 2022.** The influence of longitudinal dispersion on the capacity and stability of UASB operation with substrate inhibition. *South African Journal of Chemical Engineering*, 39, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2021.10.001>
- Rizvi, H., A. Nasir, F. Abbas, H. Bukhari, A. Yasar, S. Ali, T. Yasmeen & M. Riaz. 2015.** Start-up of UASB reactors treating municipal wastewater and effect of temperature/sludge age and hydraulic retention time (HRT) on its performance. *Arabian Journal of Chemistry*, 8, 780-786. <http://dx.doi.org/10.1016/j.arabjc.2013.12.016>
- Saner, A. B., A. K. Mungray & N. J. Mistry. 2014.** Treatment of distillery wastewater in an upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactor. *Desalination and Water Treatment*, 57(10), 1-17. <https://doi.org/10.1080/19443994.2014.994107>
- Santiago-Díaz, A. L., V. Mugica-Álvarez, D. de los Cobos-Vasconcelos, M. Vaca-Mier & M. L. Salazar-Peláez. 2021.** Performance evaluation and kinetic modeling of an upflow anaerobic sludge blanket septic tank for domestic wastewater treatment. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 67414-67428. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-15141-5>
- Spanjers H., & P. H. Vanrolleghem. 2019.** *Respirometría*. En C. M. López Vázquez, C. Menéndez Gutiérrez, & C. Fall (Eds.), *Métodos experimentales para el tratamiento de aguas residuales* (pp. 145-193). IWA Publishing.
- Wang, S., N. Chandrasekhara-Rao, R. Qiu & R. Moletta. 2009.** Performance and kinetic evaluation of anaerobic moving bed biofilm reactor for treating milk permeate from dairy industry. *Bioresource Technology*, 100, 5641-5647. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.06.028>