

## **Artículo de Revisión**

### **Tratamiento de aguas residuales domésticas en un sistema Down-Flow Hanging Sponge (DHS) de tercera generación**

#### **DOMESTIC WASTEWATER TREATMENT IN A THIRD-GENERATION DOWN-FLOW HANGING SPONGE (DHS) SYSTEM**

Glenny Marilyn Chuptaya Cruz§\*, Nancy Antonia Huamán Apaestegui§

Recibido: 27 noviembre de 2020 / Aceptado: 30 diciembre de 2020

§*Centro de Investigación y Recursos en Geociencia,  
Universidad Peruana Unión, Perú*

#### **Resumen**

El acelerado crecimiento poblacional y la industrialización han provocado la disminución de terrenos disponibles y han dificultado el saneamiento básico, por ello surgió la necesidad de desarrollar tecnologías innovadoras de tratamiento de aguas residuales. Esta investigación tiene por objetivo evaluar el rendimiento del sistema Down-flow Hanging Sponge (DHS) de tercera generación para el tratamiento de aguas residuales domésticas provenientes de un reactor Up-flow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) aplicado en diferentes ciudades del mundo. Los reactores UASB destacan como tratamiento primario por sus altos índices de remoción, pero sus efluentes no cumplen con los estándares. Como tratamiento secundario, el reactor de esponjas colgantes y flujo descendente, o DHS, destaca por su bajo costo de operación y mantenimiento, estructura compacta y ahorro energético. La alta porosidad de las esponjas proporciona un excelente medio para la biomasa encargada de la remoción de contaminantes. Según la distribución y forma de las esponjas, se cuenta con 6 generaciones (G1, G2, G3, G4, G5 y G6). Se han realizado diversas investigaciones que demuestran el alto rendimiento del sistema DHS (G3) a escala real y escala piloto.

*Palabras claves:* reactor de esponjas, reactor anaerobio, manto de lodos, aguas residuales domésticas

#### **Abstract**

The accelerated population growth and industrialization have caused the decrease of available land and have made basic sanitation difficult, which is why the need to develop innovative wastewater treatment technologies arose. The objective of this research is to evaluate the performance of the third generation Down-flow Hanging Sponge (DHS) system for the treatment of domestic wastewater from an Up-flow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) reactor applied in different cities around the world. UASB reactors stand out as primary treatment for their high removal rates, but their effluents do not meet standards. As a secondary treatment, the DHS reactor stands out for its low cost of operation and maintenance, compact structure and energy savings. The high porosity of sponges provides an excellent medium for biomass responsible for removing contaminants. According to the distribution and shape of the sponges, there are 6 generations (G1, G2, G3, G4, G5 and G6). Various investigations have been carried out demonstrating the high performance of the real-scale and pilot-scale DHS (G3) system.

*Keywords:* sponge reactor, anaerobic reactor, sludge blanket, domestic wastewater

\*Correspondencia de autor: E-mail: [glennychuptaya@upeu.edu.pe](mailto:glennychuptaya@upeu.edu.pe)

## INTRODUCCIÓN

El acelerado crecimiento poblacional, junto a la industrialización han provocado la disminución de terrenos disponibles y han dificultado el saneamiento básico (OMS, 2017). Además, el impacto ambiental se ha vuelto cada vez más grave, y uno de estos problemas es la contaminación acuática por aguas residuales domésticas, afectando directamente a las especies acuáticas e indirectamente a la salud de la población (Nguyen, Le, Dinh, Phan, 2018; OMS, 2019). Por consiguiente, se han construido y operado instalaciones, técnicamente llamadas Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR), destinadas a eliminar los contaminantes del agua (Nguyen *et al.*, 2018). Sin embargo, el funcionamiento sostenible de las PTAR se ve limitado en los países en desarrollo por la escasez de presupuesto y terreno disponible, personal técnico no capacitado e inestables suministros de energía eléctrica (Onodera *et al.*, 2016).

Entonces surgió la necesidad de explorar tecnologías de tratamiento simples y rentables que puedan ser adoptadas por las plantas de tratamiento de aguas residuales municipales según los requerimientos de éstas (Machdar *et al.*, 2018). Debido a la escasa disponibilidad de terreno, los tratamientos anaerobios resultan los más adecuados ya que, en comparación a los procesos aerobios, sus estructuras son más compactas (Lier *et al.*, 2017). No obstante, operan con extensos tiempos de retención hidráulica (TRH) que bordean los 30 días (Watari *et al.*, 2017) y requieren de un tratamiento posterior para lograr una mayor remoción de contaminantes y generalmente se optan por tratamientos biológicos (Onodera *et al.*, 2014).

En los últimos años, los reactores anaerobios de manto de lodos y flujo ascendente, traducido del inglés Up-flow Anaerobic Sludge Blanket (UASB), se han utilizado ampliamente para el tratamiento de aguas residuales debido a su alta eficiencia, operación y mantenimiento simples y reducidos costos de operación (Onodera *et al.*, 2016). Sin embargo, el efluente de los reactores UASB no cumple con los estándares de descarga establecidos por la mayoría de los países en desarrollo, como India, por lo que se necesita un tratamiento adicional para mejorar su calidad, siendo los tratamientos biológicos los más utilizados (Nguyen *et al.*, 2018; Onodera *et al.*, 2016).

Los procesos biológicos resultan importantes para el tratamiento de las aguas residuales debido a la presencia de microorganismos que transforman los nutrientes y la materia orgánica en biomasa u otros productos simples (Nguyen *et al.*, 2018). Los microorganismos pueden realizar dos tipos de crecimiento: suspendido (proceso de lodos activados) o adherido (contactor biológico rotativo o filtro por goteo) que se da por la adherencia de una biopelícula de microorganismos sobre los materiales de soporte (rocas, plásticos u otros) (Nguyen *et al.*, 2018). Los procesos aerobios de crecimiento adherido son los más estudiados debido a que tienen una operación y mantenimiento simples, se requiere menos energía eléctrica y el lodo en estos sistemas presenta buenas propiedades (Nguyen *et al.*, 2018).

El sistema de esponjas colgantes y flujo descendente o Down-flow Hanging Sponge (DHS) en inglés, es uno de los sistemas de crecimiento adherido más estudiados por su óptimo rendimiento en cuanto a remoción de materia orgánica (Nomoto *et al.*, 2018; Okubo *et al.*, 2016; Watari *et al.*, 2017). El principio de esta tecnología es similar al filtro por goteo, pero se reemplaza el uso de las piedras, gravas o materiales de plástico por esponjas de poliuretano como material de soporte (Liao *et al.*, 2017; Onodera *et al.*, 2014). La alta porosidad de las esponjas proporciona una mayor área de contacto para el desarrollo de la

biomasa y al mismo tiempo mejora la difusión del aire en las aguas residuales reduciendo así la necesidad de aireación mecánica a diferencia de la mayoría de tratamientos aerobios existentes (El-Tabl, Wahaab, Mohamed, 2013).

El sistema DHS se desarrolló por primera vez en Japón en 1995 y desde entonces ha tenido modificaciones importantes en la forma de la esponja, orientación y distribución con la finalidad de probar su aplicabilidad práctica, por ello actualmente se cuenta con seis generaciones: G1, G2, G3, G4, G5 y G6 (Yaya *et al.*, 2015 & Yaya *et al.*, 2015) y con un amplio abanico de investigaciones de cada generación (Hatamoto *et al.*, 2018).

En cuanto a la tercera generación (G3) del reactor DHS, se cuenta con investigaciones tanto a escala laboratorio como a escala real en países como India, Tailandia, Costa Rica y Vietnam y se obtuvieron excelentes tasas de remoción de contaminantes presentes en las aguas residuales (Centeno *et al.*, 2018; Nomoto *et al.*, 2017, 2018; Okubo *et al.*, 2016).

En países en vías de desarrollo, como Perú, cada vez se hace más necesario el uso de tecnologías de tratamiento de aguas residuales domésticas rentables y compactas que puedan ser aplicados a cualquier escala y en diversas condiciones climáticas (Miyaoka *et al.*, 2017).

Por consiguiente, en esta investigación se realizará una revisión bibliográfica de la eficiencia de la tecnología DHS (G3) como tratamiento secundario al reactor UASB; así como también aportará a la información existente sobre la tercera generación del reactor DHS y permitirá brindar recomendaciones a considerar para futuras experimentaciones.

## SISTEMA DHS

El afluente ingresa por la parte superior del reactor y se filtra a través de las esponjas y durante su paso el agua se satura casi completamente de oxígeno lo que hace prescindible el uso de aireación mecánica (Yaya *et al.*, 2015). Debido al flujo descendente y continuo, la concentración de oxígeno disuelto (OD) se incrementa a la salida del reactor, por ello, los valores de OD en el efluente serán mayores que los valores del afluente (Nguyen *et al.*, 2018).

Asimismo, se crea un gradiente de oxígeno a medida que se acentúa la profundidad permitiendo así el crecimiento de microorganismos aerobios y anaerobios, que son los responsables de la eliminación orgánica, en forma de biopelículas dentro y sobre la superficie de los poros de la esponja (Liao *et al.*, 2017; Nomoto *et al.*, 2018). Por lo tanto, se proporciona un medio aeróbico cerca de la superficie de la esponja, propicio para el proceso de nitrificación, y un ambiente anaeróbico, que favorece la desnitrificación, al interior de la esponja (Hatamoto *et al.*, 2018).

La alta porosidad de las esponjas lo convierten en un excelente lecho de crecimiento debido a que proporciona una mayor superficie de contacto y se retienen porciones de lodos, maximizando así el cultivo de la biomasa (Nomoto *et al.*, 2018; Yaya *et al.*, 2015). La biomasa está compuesta de una amplia gama microbiana que establecen ecosistemas con cadenas alimentarias extremadamente largas que reducen la producción excesiva de lodo (Uemura *et al.*, 2010).

Además, difieren significativamente según su ubicación en las esponjas (Liao *et al.*, 2017). En el reactor se encuentran bacterias nitrificantes y desnitrificantes (Watari *et al.*, 2017) que son responsables de la conversión del nitrógeno amoniacal a nitrato en las aguas residuales domésticas (Nguyen *et al.*, 2018). También existen bacterias reductoras de sulfato que cumplen la función de degradar componentes de azufre (Nomoto *et al.*, 2018). La presencia de tan variada biomasa hace posible la remoción no solo de materia orgánica, sino también de nutrientes y patógenos (Okubo *et al.*, 2016).

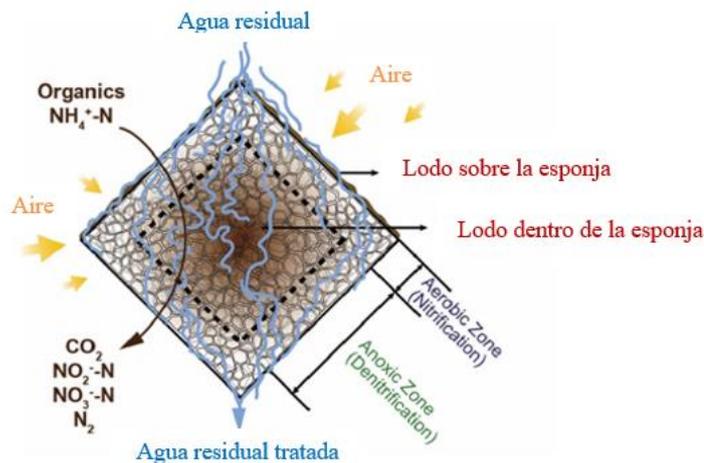


Figura 1 Sección transversal de una esponja cúbica de un reactor DHS (Hatamoto, 2018).

En cuanto a las condiciones operacionales, este sistema funciona con un corto tiempo de retención hidráulico (TRH) de hasta 3 horas y un largo tiempo de retención de lodo (TRL) en comparación a otros sistemas aerobios (Yaya *et al.*, 2015). Estas características hacen que la operación sea simple y los costos de operación y mantenimiento sean bajos (Bundy *et al.*, 2017; Onodera *et al.*, 2014).

Liao *et al.* (2017) indican que al aplicar esta tecnología es normal que parte de la biomasa se desprenda a causa del rendimiento inestable del reactor en la primera etapa.

## EVOLUCIÓN DEL SISTEMA DHS

El sistema DHS ha tenido modificaciones importantes en relación a la forma del soporte de esponja, orientación y distribución para probar su aplicabilidad práctica, es así como el concepto ha evolucionado y actualmente se cuenta con seis generaciones (Onodera *et al.*, 2014; Yaya *et al.*, 2015) representadas en la Figura 2.

Según las investigaciones realizada por Hatamoto *et al.* (2018) y Onodera *et al.* (2014), a continuación, se describe brevemente cada generación:

La primera generación (G1) se caracteriza por poseer esponjas de poliuretano tipo cubo de 1.5 cm cada una colgada diagonal y verticalmente en serie con una cuerda de nylon. El primer prototipo de DHS fue desarrollado en 1995.

La segunda generación (G2) se compone de largas esponjas triangulares de poliuretano de 75 cm de largo y lados triangulares de 3cm, que están pegadas a ambos lados de una lámina de polivinilo de 2 m de largo.

La tercera generación (G3) consiste en una configuración tipo filtro percolador, pero en lugar de materiales sólidos se utilizan pequeñas piezas de esponja con un material de soporte externo y distribuidas al azar.

La cuarta generación (G4) se constituye de tiras de esponja largas de 2.5 cm de ancho x 2.5 cm de grosor x 50 cm de largo, que se colocan dentro de una cubierta de plástico cilíndrica en forma de red para proporcionar rigidez.

La quinta generación (G5) está constituido por varias cortinas alineadas, se construye pegando una lámina de esponja con una superficie ondulada a ambos lados de una lámina de plástico delgada.

La sexta generación (G6) se compone de esponjas de poliuretano endurecidas con resina epoxi para evitar la deformación de la esponja. Esta generación es una variante de la tercera generación, pero se reemplaza el uso de soportes al endurecer las esponjas. También presentan una distribución al azar.

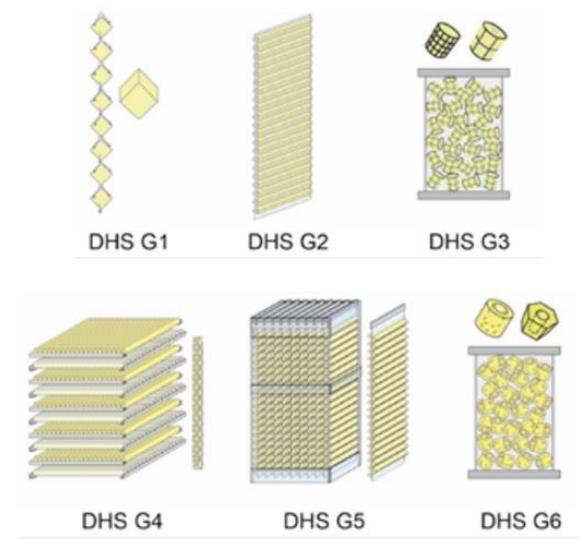


Figura 2. Generaciones del sistema DHS (Hatamoto *et al.* 2018).

### APLICACIÓN DEL SISTEMA DHS (G3) A NIVEL MUNDIAL

Se encontraron 9 investigaciones sobre el sistema DHS de tercera generación, tanto a escala real como a escala piloto, que se realizaron entre los años 2016 y 2018 en países como India, Vietnam y Tailandia. A continuación, se describe los resultados de cada investigación.

En India, Okubo *et al.* (2016) evaluaron durante un año un reactor DHS (3G), de 5.5 m de diámetro y 5.31 m de alto, para el tratamiento del efluente de un reactor UASB que trataba aguas residuales municipales. Se obtuvieron excelentes porcentajes de eliminación de

demanda biológica de oxígeno (DBO) de hasta 97(2)%, demanda química de oxígeno (DQO) de 89(5)% y nitrógeno amoniacal (NH<sub>4</sub>-N) de hasta 70(21)% con un TRH relativamente corto de 0.66 h que permitió cumplir con los estándares de calidad establecidos en India (DBO <30 mg/L), excepto para los coliformes fecales (Onodera *et al.*, 2016).

Otro estudio se llevó a cabo en el mismo país por Nomoto *et al.* (2017) en una planta de tratamiento de aguas residuales domésticas donde se implementó un reactor DHS (G3) de 16 m de diámetro y 2,7 m de alto para tratar el efluente del reactor UASB. Ellos investigaron las características del lodo retenido en las esponjas del reactor que recibía un afluente con alto contenido de materia orgánica y descubrieron que las condiciones de eliminación orgánica y oxidación de azufre difieren entre las capas del reactor, siendo la primera capa la responsable de remover entre el 63% y el 59% de la materia orgánica gracias a los procesos de biodegradación aerobia y biodegradación anaerobia (Nomoto *et al.*, 2017).

En Vietnam se implementó un reactor de policloruro de vinilo (PVC) a escala laboratorio (1,5 m de alto, 0,2 m de ancho y 60L de capacidad) que constaba de tres segmentos idénticos. El estudio se realizó durante 82 días y se incrementó gradualmente la tasa de orgánica de 0,5 a 1 y 1,5 kg de DQO m<sup>-3</sup> d<sup>-1</sup>. Los resultados mostraron que este sistema logró la eliminación máxima de DQO, DBO<sub>5</sub>, NH<sub>4</sub>-N y NT en un 80%, 83%, 65% y 60% (Nguyen *et al.*, 2018).

En Bangkok, Tailandia Miyaoka *et al.* (2017) evaluaron el sistema y la estructura de la comunidad eucariota en el reactor. El período de evaluación fue de 550 días a una temperatura que fluctuaba entre 28 °C a 31 °C y se consideró un tiempo de retención hidráulica de 3 h. Los resultados mostraron altas tasas de eliminación de carbono orgánico (DQO = 80–83% y DBO = 91%), compuestos de nitrógeno (nitrógeno total = 45–51% y NH<sub>4</sub>-N = 95-98 %) y baja producción de lodo excesivo (0.04 gST / gDQO eliminado) (Miyaoka *et al.*, 2017).

Posteriormente, (Nomoto *et al.*, 2018) realizaron otro estudio en el mismo lugar y utilizando el mismo reactor, y descubrieron que las bacterias anaerobias se encuentran en mayores proporciones (27–38%) en la primera capa del reactor. También detectaron abundantes microorganismos relacionados con la oxidación y reducción de azufre (2–27%), y observaron que la temperatura influye directamente en la diversidad de la comunidad microbiana, de manera que en invierno se presenta una diversidad menor en comparación a las demás estaciones (Nomoto *et al.*, 2018). Además, concluyeron que la abundancia de cada especie bacteriana difiere a lo largo de ambos ejes del reactor, pero el cambio de la composición microbiana es mayor a lo largo del eje vertical (Nomoto *et al.*, 2018).

Asimismo, Tanikawa *et al.* (2018) estudiaron el mecanismo de eliminación del nitrógeno y la caracterización de las comunidades microbianas; como resultado encontraron grandes cantidades de bacterias nitrificantes y desnitrificantes en el lodo retenido, entre las bacterias dominantes se encontraron: Nitrososphaera (bacteria oxidante de amoníaco), Nitrospira (bacteria dominante oxidante de nitrito) y Opatutus (bacteria desnitrificante).

Por otro lado, también se ha aplicado el reactor DHS para el tratamiento de varios tipos de aguas residuales industriales (Watari *et al.*, 2017). Por ejemplo, en una planta de procesamiento de caucho natural donde evaluaron su rendimiento posterior al tanque anaerobio de la planta y obtuvieron eficiencias de eliminación de 64.2 ± 7.5% y 55.3 ± 19.2% para la DQO total y el nitrógeno total (NT), respectivamente, con una tasa de carga orgánica de 0.97 ± 0.03 kgDQO m<sup>-3</sup> día<sup>-1</sup> y un TRH de 4,8 h (Watari *et al.*, 2017).

## ANÁLISIS Y DISCUSIONES

En base a investigaciones revisadas, se encontró que a variada biomasa presente en el reactor desempeña un papel importante en la eliminación de la materia orgánica, siendo las proteobacterias (bacterias anaerobias) las que eliminan cerca del 80% de los contaminantes orgánicos (Liao *et al.*, 2017; Nomoto *et al.*, 2018).

Respecto a la remoción de NH<sub>4</sub>-N y NO<sub>3</sub>, se registraron eficiencia de 65% y 63% respectivamente. Ello demuestra que el proceso de nitrificación se realiza adecuadamente en el reactor DHS. El proceso de nitrificación se desarrolla en condiciones aeróbicas en dos fases. La primera fase ocurre en presencia del género *Nitrosomonas* spp que oxidan el NH<sub>4</sub><sup>+</sup> a NO<sub>2</sub><sup>-</sup> siguiendo la siguiente ecuación:  $\text{NH}_4^+ + 1.5 \text{O}_2 \Rightarrow \text{NO}_2^- + 2\text{H}^+ + 2\text{H}_2\text{O}$ , luego las bacterias oxidantes de nitrato (*Nitrobacter* spp) oxidan el nitrito a nitrato de acuerdo a la ecuación:  $\text{NO}_2^- + 0.5 \text{O}_2 \Rightarrow \text{NO}_3^-$ . El proceso de nitrificación se evidencia mejor en el incremento de la concentración de nitrato en el efluente del reactor respecto al afluente. Entonces se demuestra que el reactor realiza el proceso de nitrificación-desnitrificación en una sola etapa (Nguyen *et al.*, 2018).

Cuando los valores promedio de remoción del nitrógeno total son próximos al 60%, esto indica que no existen condiciones anóxicas disponibles en el reactor para la desnitrificación, por lo que el nitrato se convertirá en gas nitrógeno. Por ello, los investigadores recomiendan realizar experimentos proporcionando zonas anóxicas en el reactor para mejorar el tratamiento de nutrientes presentes en el agua residual (Nguyen *et al.*, 2018).

Se ha demostrado que el sistema conjunto UASB-DHS es capaz de reducir hasta en un 95% el consumo de energía requerido para tratar las aguas residuales y cerca de un 98% la descarga excesiva de lodo. También permite recuperar el metano y convertirlo en una fuente de energía que puede utilizarse en el proceso de tratamiento (Onodera *et al.*, 2016; D. Tanikawa *et al.*, 2016). (Nguyen *et al.*, 2018). Asimismo, el costo de operación y mantenimiento es relativamente bajo comparado al proceso convencional de lodos activados (Liao *et al.*, 2017). Por lo que es viable y rentable implementar este sistema a gran escala para el tratamiento de aguas residuales municipales, especialmente en los países en vías de desarrollo por los bajos costos operacionales que presenta (Onodera *et al.*, 2016).

Los estudios de Liao *et al.* (2017) y Nomoto *et al.* (2018) demostraron la viabilidad y la eficiencia del uso del reactor DHS (G3) en el tratamiento de aguas residuales de alta resistencia con altas concentraciones de materia orgánica y sulfatos, como las aguas residuales de refrescos sintéticos y de procesamiento de caucho natural, debido a la gama de microorganismos existentes.

Al momento de seleccionar una tecnología que sea aplicable se debe considerar los costos de inversión, operación y mantenimiento y la simplicidad (Yaya *et al.*, 2015). Además, se debe considerar la capacidad de recuperación de la tecnología ante posibles interrupciones. Al respecto, en la bibliografía se encuentra la investigación realizada por Onodera *et al.* (2016), quienes evaluaron un sistema DHS a gran escala luego de 10 días sin suministro de agua residual y encontraron que este sistema posee una alta resistencia ante interrupciones a largo plazo y es capaz de estabilizarse rápidamente después del reinicio.

## CONCLUSIONES

Los resultados de las investigaciones revisadas demuestran que el sistema DHS (G3) presenta altas eficiencias de remoción de contaminantes (materia orgánica, patógenos y nutrientes).

Además, que es una excelente opción para ser aplicado a escala debido a su estructura compacta y bajos costos de operación y mantenimiento.

## RECOMENDACIÓN

Se recomienda realizar más estudios sobre el reactor DHS de tercera generación a escala real para que las plantas de tratamiento de aguas residuales, así como las industrias que tratan sus efluentes, reemplacen sus sistemas actuales en el menor tiempo posible y brinden un mejor tratamiento a sus aguas residuales.

## Referencias

- Bundy, C. A., Wu, D., Jong, M. C., Edwards, S. R., Ahammad, Z. S., & Graham, D. W. (2017). Enhanced denitrification in Downflow Hanging Sponge reactors for decentralised domestic wastewater treatment. *Bioresource Technology*, 226, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.11.122>
- Centeno, E. M., Rodríguez, D. C., & Ugalde, J. L. H. (2018). Evaluación de una planta piloto para el tratamiento de aguas residuales ordinarias por medio de un filtro percolador con relleno de esponjas colgantes de flujo descendente (DHS) como postratamiento de un efluente de sedimentador primario. *Revista Ingeniería*, 28(1), 60–79. <https://doi.org/10.15517/ri.v28i1.30931>
- El-Tabl, A. S., Wahaab, R. A., & Mohamed, S. Y. (2013). Downflow Hanging Sponge (DHS) Reactor as a Novel Post Treatment System for Municipal Wastewater. *Life Science Journal*, 10(3), 3552–3557.
- Hatamoto, M., Okubo, T., Kubota, K., & Yamaguchi, T. (2018). Characterization of downflow hanging sponge reactors with regard to structure, process function, and microbial community compositions. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 102(24), 10345–10352. <https://doi.org/10.1007/s00253-018-9406-6>
- Liao, J., Fang, C., Yu, J., Sathyagal, A., Willman, E., & Liu, W. T. (2017). Direct treatment of high-strength soft drink wastewater using a down-flow hanging sponge reactor: performance and microbial community dynamics. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 101(14), 5925–5936. <https://doi.org/10.1007/s00253-017-8326-1>
- Lier, J. B. Van, Mahmoud, N., & Zeeman, G. (2017). Tratamiento Anaerobio de Aguas Residuales.
- Machdar, I., Onodera, T., Syutsubo, K., & Ohashi, A. (2018). Effects of sponge pore-size on the performance of a down-flow hanging sponge reactor in post-treatment of effluent from an anaerobic reactor treating domestic wastewater. *Sustainable Environment Research*, 28(6), 282–288. <https://doi.org/10.1016/j.serj.2018.07.001>

- Miyaoka, Y., Yoochatchaval, W., Sumino, H., Banjongproo, P., Yamaguchi, T., Onodera, T., ... Syutsubo, K. (2017). Evaluation of the process performance of a down-flow hanging sponge reactor for direct treatment of domestic wastewater in Bangkok, Thailand. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 52(10), 956–970. <https://doi.org/10.1080/10934529.2017.1324708>
- Nguyen, H. T., Le, H. T. T., Dinh, N. T., & Phan, T. D. (2018). A research on the performance of down-flow hanging sponge (DHS) reactor treating domestic wastewater. *Vietnam Journal of Science and Technology*, 56(4), 482–492. <https://doi.org/10.15625/2525-2518/56/4/10878>
- Nomoto, N., Hatamoto, M., Ali, M., Jayaswal, K., Iguchi, A., Okubo, T., ... Harada, H. (2017). Characterization of sludge properties for sewage treatment in a practical-scale down-flow hanging sponge reactor: Oxygen consumption and removal of organic matter, ammonium, and sulfur. *Water Science and Technology*, 77(3), 608–616. <https://doi.org/10.2166/wst.2017.557>
- Nomoto, N., Hatamoto, M., Hirakata, Y., Ali, M., Jayaswal, K., Iguchi, A., ... Harada, H. (2018). Defining microbial community composition and seasonal variation in a sewage treatment plant in India using a down-flow hanging sponge reactor. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 102(10), 4381–4392. <https://doi.org/10.1007/s00253-018-8864-1>
- Okubo, T., Kubota, K., Yamaguchi, T., Uemura, S., & Harada, H. (2016). Development of a new non-aeration-based sewage treatment technology: Performance evaluation of a full-scale down-flow hanging sponge reactor employing third-generation sponge carriers. *Water Research*, 102, 138–146. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.06.035>
- OMS. (2017). Saneamiento y aguas residuales. Retrieved September 20, 2019, from [https://www.who.int/water\\_sanitation\\_health/sanitation-waste/es/](https://www.who.int/water_sanitation_health/sanitation-waste/es/)
- OMS. (2019). Saneamiento. Retrieved September 20, 2019, from <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/sanitation>
- Onodera, T., Okubo, T., Uemura, S., Yamaguchi, T., Ohashi, A., & Harada, H. (2016). Long-term performance evaluation of down-flow hanging sponge reactor regarding nitrification in a full-scale experiment in India. *Bioresource Technology*, 204, 177–184. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.01.005>
- Onodera, T., Takayama, D., Ohashi, A., Yamaguchi, T., Uemura, S., & Harada, H. (2016). Evaluation of the resilience of a full-scale down-flow hanging sponge reactor to long-term outages at a sewage treatment plant in India. *Journal of Environmental Management*, 181, 832–837. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.06.058>
- Onodera, T., Tandukar, M., Sugiyana, D., Uemura, S., Ohashi, A., & Harada, H. (2014). Development of a sixth-generation down-flow hanging sponge (DHS) reactor using rigid sponge media for post-treatment of UASB treating municipal sewage. *Bioresource Technology*, 152, 93–100. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.10.106>
- Tanikawa, D., Syutsubo, K., Hatamoto, M., Fukuda, M., Takahashi, M., Choeisai, P. K., & Yamaguchi, T. (2016). Treatment of natural rubber processing wastewater using a combination system of a two-stage up-flow anaerobic sludge blanket and down-flow hanging sponge system. *Water Science and Technology*, 73(8), 1777–1784. <https://doi.org/10.2166/wst.2016.019>
- Tanikawa, Daisuke, Nakamura, Y., Tokuzawa, H., Hirakata, Y., Hatamoto, M., & Yamaguchi, T. (2018). Effluent treatment in an aquaponics-based closed aquaculture system with single-stage

nitrification–denitrification using a down-flow hanging sponge reactor. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 132(April), 268–273. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2018.04.016>

Uemura, S., Suzuki, S., Abe, K., Kubota, K., Yamaguchi, T., Ohashi, A., ... Harada, H. (2010). Removal of organic substances and oxidation of ammonium nitrogen by a down-flow hanging sponge (DHS) reactor under high salinity conditions. *Bioresource Technology*, 101(14), 5180–5185. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.02.040>

Watari, T., Mai, T. C., Tanikawa, D., Hirakata, Y., Hatamoto, M., Syutsubo, K., ... Yamaguchi, T. (2017). Development of downflow hanging sponge (DHS) reactor as post treatment of existing combined anaerobic tank treating natural rubber processing wastewater. *Water Science and Technology*, 75(1), 57–68. <https://doi.org/10.2166/wst.2016.487>

Yaya, R. E. B., Kujawa-Roeleveld, K., Zeeman, G., & Van Lier, J. B. (2015). A downflow hanging sponge (DHS) reactor for faecal coliform removal from an upflow anaerobic sludge blanket (UASB) effluent. *Water Science and Technology*, 72(11), 2034–2044. <https://doi.org/10.2166/wst.2015.427>