



Figura 1. Reactores piloto de alta tasa (1m³) operados con el sistema microalga-bacteria instalados en el exterior de la UAJ

TECNOLOGÍAS NOVEDOSAS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

GERMÁN BUITRÓN, IVÁN MORENO ANDRADE,
GLORIA MORENO, JAIME PÉREZ

Desde su fundación, la Unidad Académica Juriquilla (UAJ) ha tenido como eje central la investigación para el tratamiento de aguas residuales incluyendo aguas municipales e industriales. Los efluentes industriales (industria química, farmacéutica y textil), poseen características inhibitorias para los microorganismos presentes en los sistemas biológicos. En la UAJ se ha trabajado en el desarrollo de procesos y tecnologías eficientes empleando principalmente sistemas biológicos, aplicando soluciones holísticas por medio del estudio de varias áreas de la ingeniería ambiental incluyendo aspectos de bioprocesos, la teoría de sistemas y la microbiología.

Las investigaciones llevadas a cabo nos han permitido generar conocimiento para aplicarlo a la solución de problemas presentes en el arranque y la operación de plantas de tratamiento. En este sentido, se ha generado la suficiente experiencia para llevar a cabo procedimientos para la aclimatación de microorganismos aerobios a efluentes recalcitrantes.¹ Los resultados se han aplicado a problemas reales para tratar aguas residuales de la industria química con alto contenido de fenoles y aminas, por ejemplo.

Al aplicar el control de bioprocesos, en estrecha colaboración con el Dr. Jaime Moreno,² se desarrollaron estrategias para mantener altas velocidades de degradación de compuestos inhibitorios (fenoles) en reactores

discontinuos secuenciales o SBR (Sequencing Batch Reactor). Con esta estrategia se logró que los microorganismos aerobios aclimatados se mantuvieran por debajo del nivel inhibitorio. El proceso se basa en el seguimiento en línea de la concentración de los contaminantes dentro del reactor y la regulación del flujo de entrada a la planta. Esta tecnología escaló de nivel laboratorio a planta piloto y fue financiada por la Unión Europea. También en esta área colaboramos en dos proyectos de redes, uno con la Unión Europea a través de los fondos Marie Curie, y otro con Iberoamérica a través de CYTED.

En 2014 el proceso de tratamiento de aguas por lodos activados cumplió cien años de su invención por Arden y Lockett. Actualmente, por mucho, es el proceso biológico más utilizado en México y el mundo. No es hasta después de la Segunda Guerra Mundial que el proceso se masifica industrialmente. Desde hace cincuenta años el principio de esta tecnología no ha sufrido mayores cambios, hasta la llegada de las membranas y los reactores granulares más recientemente.

En el proceso tradicional los microorganismos se agrupan formando flóculos. Los flóculos son más densos que las bacterias libres, y por ende, sedimentan más fácilmente. Cuando los flóculos no se forman o se dispersan, el proceso no funciona. También en situaciones particulares, las bacterias crecen en cadena formando filamentos, como cabellos, que ocupan gran volumen en el tanque sedimentador. Este es un problema que se llama crecimiento filamentos, ocasiona que las plantas de tratamiento no funcionen adecuadamente, pues al no sedimentar la biomasa, ésta se pierde, aumentando el contenido de sólidos en el agua tratada.

Un hito importante en la industria del tratamiento de aguas fue la aplicación de procesos con membranas para solventar el problema anteriormente descrito. En nuestro

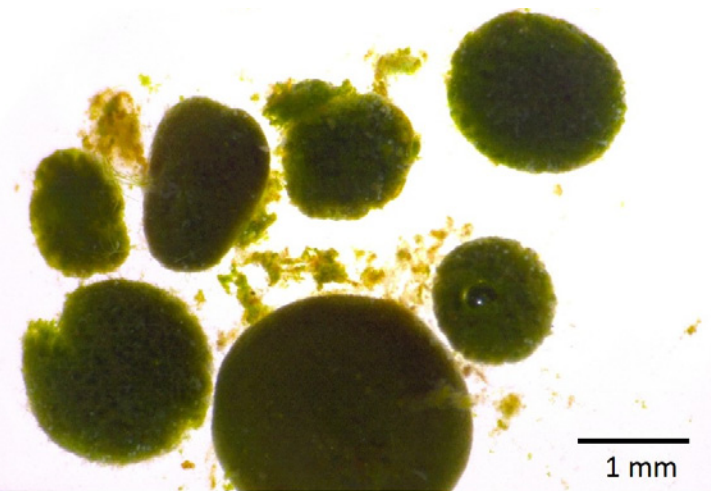


Figura 2. Gránulos microalga-bacteria desarrollados por el sistema depurador de aguas residuales municipales y de muy fácil separación del agua

grupo se desarrollaron procesos con membranas para retener la biomasa y producir agua tratada con menor contenido de sólidos. En particular, se desarrollaron estrategias de control para hacer que las membranas se colmaten lentamente, y para mantener microorganismos capaces de degradar contaminantes emergentes.³⁻⁴ El entendimiento de los mecanismos del ensuciamiento de las membranas permitió proponer soluciones originales a empresas que emplean el proceso de membranas con una producción excesiva de espuma en el proceso.

Debido al problema que representa el ensuciamiento de las membranas, se desarrollaron procesos alternativos más económicos y eficientes para la separación de sólidos. En dichos procesos las bacterias se agrupan creando gránulos, en lugar de producir flóculos. Estos gránulos son más densos que los flóculos, por tanto, se separan mejor del agua tratada.⁵⁻⁷ Para formar dichos gránulos se debe someter a las bacterias a un estrés que induzca una presión de selección. Cuando las bacterias están frente a condiciones adversas generan un pegamento llamado exopolímeros. Estos exopolímeros son los responsables de la formación de gránulos densos. El desarrollo de la tecnología con gránulos se basa en la inducción de las bacterias para formar exopolímeros a través del cambio de las condiciones hidrodinámicas en el reactor biológico. Los gránulos pueden llegar a medir hasta 5 milímetros, en contraste

con unas cuantas micras que miden los flóculos. El incremento de tamaño incrementa su velocidad de sedimentación, por tanto, se obtiene mejor separación de la biomasa del agua.

Desde hace varios años se ha trabajado con la aplicación de la tecnología de microalgas.⁸⁻⁹ El uso de microalgas se ha asociado a la producción de biodiesel. Sin embargo, es posible generar otros productos de valor agregado a partir de esta biomasa, lo que ha facilitado el desarrollo de una plataforma de biorrefinería basada en estos microorganismos. La utilización de las microalgas para el tratamiento de aguas residuales fue planteada hace ya más de cinco décadas en la Universidad de California, sobre todo como un pulimento del agua tratada para remover nutrientes como nitrógeno y fósforo. En aquéllos primeros sistemas, conocidos como lagunas de oxidación, las microalgas crecen en la superficie de agua mientras que las bacterias anaerobias (que no necesitan oxígeno) se reproducen en el fondo de la laguna. Este tipo de lagunas se sigue usando en Latinoamérica ampliamente. En México las lagunas de oxidación ocupan el segundo lugar como tecnología de tratamiento de aguas, después de los lodos activados.



Figura 3. Gránulos bacterianos desarrollados para producir hidrógeno a partir de aguas residuales

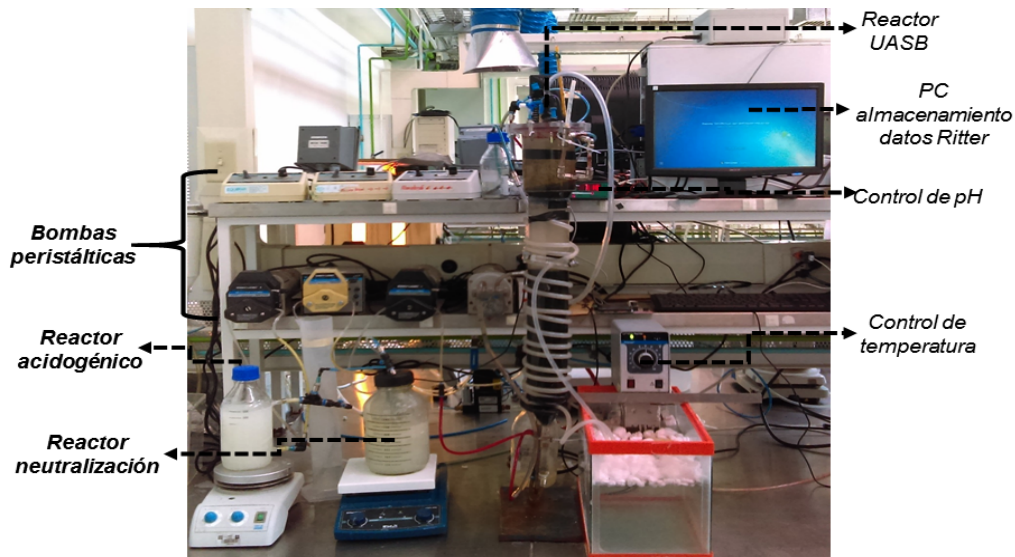


Figura 4. Montaje experimental del laboratorio para el tratamiento de aguas de una industria de quesos y obtención de metano

Recientemente, se ha estudiado una variante de esta tecnología que presenta ventajas sobre las lagunas tradicionales. Estos nuevos sistemas se denominan lagunas microalgales de alta tasa y en ellos existe una simbiosis microalga-bacteria, que llevan a cabo la remoción de la materia orgánica a velocidades significativamente mayores que en los sistemas lagunares convencionales. Esta ventaja, reduce el área necesaria para llevar a cabo el tratamiento de aguas. Además, en las lagunas de alta tasa es posible tratar el agua residual para remover tanto la materia orgánica como los nutrientes (nitrógeno y fósforo). Todo está basado en la interacción simbiótica microalga-bacteria. En esta asociación las microalgas facilitan el crecimiento bacteriano pues generan fotosintéticamente el oxígeno necesario por las bacterias aerobias. A su vez las bacterias consumen la materia orgánica y generan el bióxido de carbono necesario para el crecimiento de las microalgas. El nitrógeno y el fósforo son removidos del agua residual por las microalgas que utilizan también estos nutrientes para su crecimiento.

En los procesos de tratamiento de aguas por métodos biológicos, es de suma importancia separar los microorganismos del agua tratada. Cuando en el sistema se utilizan únicamente microalgas, su separación es extremadamente complicada porque se encuentran dispersas en el agua. Otra ventaja por el uso de una combinación de microalgas y bacterias es que estas últimas generan exopolímeros que forman partículas de hasta 5 milímetros que se separan fácilmente por sedimentación del agua residual, al igual que los gránulos anteriormente descritos.

La factibilidad del uso de microalgas y bacterias para tratar aguas residuales es evaluada en nuestro grupo de investigación

gracias al patrocinio de proyectos como fondo mixto entre el Gobierno de Querétaro-CONACYT, la Secretaría de Energía, la Universidad Estatal de Arizona, y la DGAPA-UNAM. Con el proceso mencionado y aplicado al caso de las aguas residuales municipales se logró remover hasta 96% de la contaminación, tanto de materia orgánica como de nutrientes. Se evaluaron también aguas residuales generadas en las granjas porcícolas y los digestatos de reactores metanogénicos. Por otro lado, con la biomasa microalga-bacteria generada, es posible obtener metano a partir de su digestión o productos de valor agregado como fertilizantes, ya que contienen el nitrógeno y fósforo previamente removido del agua residual, o producir biocombustibles como el hidrógeno y metano.⁹⁻¹⁰

¹ Moreno, G; Buitrón, G (2004). *Biores. Technol.* 94 (2), 215-218.

² Moreno, J; Buitrón, G; Betancur, M (2010). Patente mexicana No. 273556.

³ Vargas, A; Moreno-Andrade, I; Buitrón, G (2008). *J. Membrane Sci.*, 320 (1-2): 185-190.

⁴ Buitrón, G; Torres-Bojorges, A X; Cea-Barcia, G (2015). *Chem. Eng. J.*, 281, 860-868.

⁵ Arellano-Badillo, V M; Moreno-Andrade, I; Buitrón, G (2014). *CLEAN – Soil, Air, Water*, 42, 429-433.

⁶ Vital-Jacome, M; Buitrón, G; Moreno-Andrade, I; Garcia-Rea, V; Thalasso, F (2016). *J. Haz. Mat.*, 313, 112-121.

⁷ Buitrón, G; Moreno-Andrade, I; Arellano-Badillo, V M; Ramírez-Amaya, V (2014). *Wat. Sci. Technol.*, 69, 1759-1767.

⁸ Arcila, J S; Buitrón, G (2016). *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, 91, 2862-2870

⁹ Carrillo-Reyes, J; Buitrón, G (2016). *Biores. Technol.* 221, 324-330.

¹⁰ Carrillo-Reyes, J; Barragán-Trinidad, M; Buitrón, G. (2016). *Algal Res.*, 18, 341-351.