

SISTEMAS MICROALGALES EN PROCESOS AMBIENTALES Y GENERACIÓN DE BIOENERGÍA

GUILLERMO QUIJANO GOVANTES,
GERMÁN BUITRÓN MÉNDEZ, JULIÁN CARRILLO
REYES Y ALEJANDRO VARGAS CASILLAS

1. Tratamiento de aguas residuales

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 pulimiento del agua tratada para remover nutrientes como el nitrógeno y el fósforo. En aquéllos primeros sistemas, conocidos como lagunas de oxidación, las microalgas crecían 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 ha continuado usando ampliamente en Latinoamérica. En los procesos de tratamiento de aguas por métodos biológicos es de suma importancia separar los microorganismos del agua tratada. Generalmente esto se lleva a cabo en tanques llamados sedimentadores. Cuando en el sistema se utilizan únicamente microalgas la separación es extremadamente complicada porque su tamaño es muy pequeño (micras). 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 en los cuales existe una estrecha colaboración entre las microalgas y las bacterias o interacción mutualista microalga-bacteria^[1]. Las microalgas generan oxígeno de manera fotosintética, es decir, a partir de la luz del sol como fuente de energía. El oxígeno generado es entonces utilizado por las bacterias para degradar la materia orgánica y producir bióxido de carbono. A su vez, las microalgas utilizan el bióxido de carbono para reproducirse. Es decir, un microorganismo utiliza los productos generados por el otro y viceversa. Lo interesante es que se obtiene un proceso aerobio de forma natural sin tener que agregar oxígeno vía compresores como se hace en los sistemas tradicionales denominados aerobios. Adicionalmente, el nitrógeno y el fósforo, que también son contaminantes, son

removidos del agua residual por las microalgas que los utilizan para su crecimiento^[2]. Sin embargo, la separación de la biomasa algal generada aún representa un reto tecnológico a superar^[3].

En el grupo de trabajo, con el patrocinio del Fondo de Sustentabilidad Energética de la SENER y la DGAPA-UNAM (PAPIIT) se realizó un proyecto cuyo objetivo fue comprender y evaluar los factores y mecanismos involucrados en la producción de biomasa microalgal cultivada en aguas residuales y con características de fácil separación^[4]. El fin fue obtener agua limpia y biomasa susceptible de ser utilizada en la fabricación de productos de valor agregado como biocombustibles gaseosos. A lo largo de tres años, se llevó a cabo la experimentación en pilotos de laboratorio desde 250 mL hasta 1200 L operados bajo condiciones ambientales. El mayor logro de esta investigación estuvo centrado en entender el mecanismo, posteriormente, desarrollar y aplicar al tratamiento de aguas residuales municipales los agregados y gránulos fototróficos formados por consorcios microalga-bacteria (Fig. 1). El principal interés radica en la fácil separación del medio de cultivo, uno de los mayores problemas, hasta

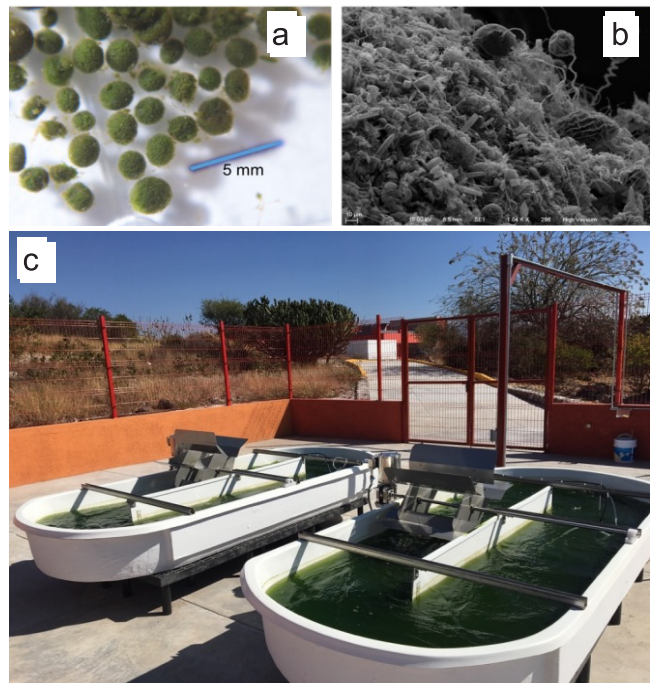


Figura 1. a) Agregados fototróficos de microalgas y bacterias; b) Imágenes de los agregados obtenidas con microscopía electrónica de barrido y c) Reactores algales de alta tasa operados a la intemperie en las instalaciones de la Unidad Académica Juriquilla

ahora en la aplicación de la tecnología algal en el tratamiento de aguas. En el proyecto se evaluaron parámetros operacionales tales como los tiempos de retención hidráulica^[1], de sólidos y de condiciones de irradiancia^[4]. Bajo las mejores condiciones se observó una alta remoción de materia orgánica (>92%), de nitrógeno (>85%) y de fósforo (hasta 30%) del agua residual municipal real utilizada para el estudio. Se constató la formación de flóculos y gránulos con una elevada velocidad de sedimentación (8 m/h) lo que se tradujo en una fácil separación de la biomasa del agua tratada. Por las características del sistema resulta muy apropiado para tratar aguas residuales en comunidades rurales.

2. Acondicionamiento de biogás y caracterización cinética

En la Unidad Académica Juriquilla se investiga el potencial de sistemas microalga-bacteria para la purificación (remoción de contaminantes como el H₂S) y enriquecimiento (remoción de CO₂) de biogás. Estos procesos de acondicionamiento son fundamentales para habilitar el uso del biogás en la obtención de energía térmica y eléctrica en motores de ciclo combinado^[3]. La actividad de las microalgas y su eficiencia fotosintética dependen en gran medida de la irradiancia luminosa suministrada, así como de la concentración de CO₂ disponible en la fase acuosa. Por tanto, la caracterización cinética de los cultivos algales puros y consorcios (microalgas-bacterias) es de gran

relevancia para el diseño, operación y optimización de procesos algales de acondicionamiento de biogás^[5].

La caracterización cinética de cultivos algales se ha realizado tradicionalmente a partir de productividad de biomasa, considerando que ésta contiene aproximadamente 50% de carbono, obteniendo así una estimación del CO₂ fijado en un tiempo determinado. Para este fin, se debe asumir que todo el CO₂ consumido se convierte exclusivamente en biomasa, despreciando la formación de otros metabolitos como las sustancias poliméricas extracelulares. Sin embargo, debido a que el CO₂ es un gas poco soluble en agua, la caracterización cinética debe realizarse sin limitación de transferencia de CO₂ de la fase gaseosa a la líquida para obtener parámetros cinéticos confiables. En este contexto, el grupo de investigación ha desarrollado un marco teórico y experimental para la caracterización cinética de cultivos microalgales puros y consorcios de microalgas y bacterias^[6]. Los resultados obtenidos han demostrado que la caracterización cinética por métodos tradicionales basados en productividad de biomasa subestima ampliamente el consumo específico de CO₂. Asimismo, se ha observado que la irradiancia tiene un impacto cinético cuantificable en parámetros como K_s del modelo de Monod. El grupo de investigación ha propuesto también una metodología estandarizada de última generación basada en la secuenciación masiva Illumina MiSeq de fragmentos 18S y 16S de rRNA para la caracterización de comunidades microalgales

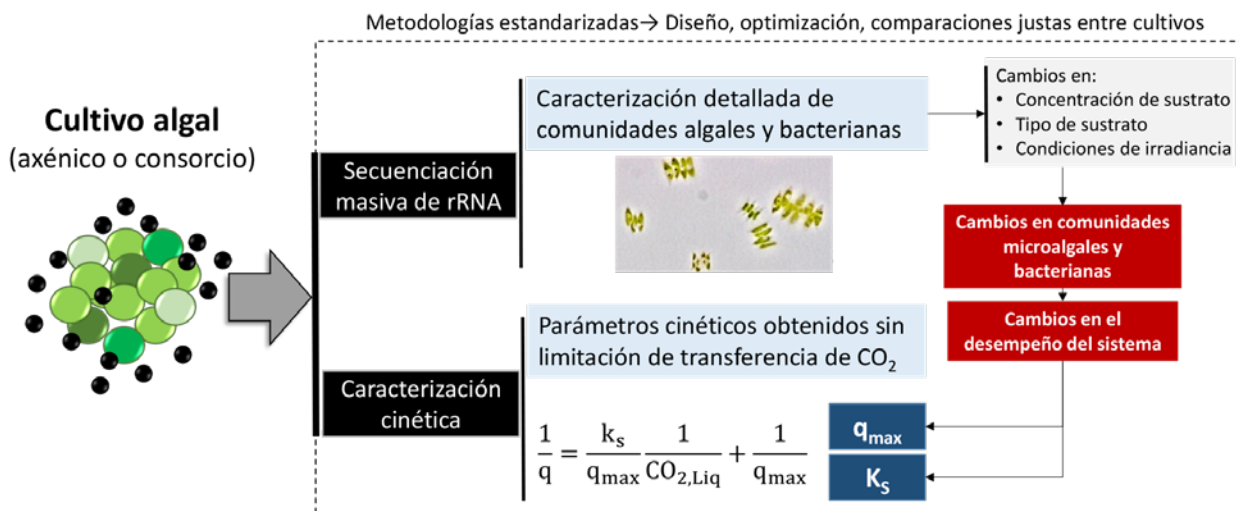


Figura 2. Secuencia de caracterización cinética y microbiológica de cultivos algales

y bacterianas, respectivamente. La figura 2 presenta el flujo de trabajo propuesto por nuestro grupo de investigación para la caracterización de cultivos algales en términos cinéticos y microbiológicos.

3. Producción de bioenergía a partir de biomasa microalgal

Una vez producida la biomasa microalgal, ya sea en sistemas de tratamiento de agua o sistemas de enriquecimiento de biogás, esta biomasa se puede utilizar como sustrato para la producción de biocombustibles gaseosos, metano o hidrógeno. En este sentido, la recuperación de biocombustibles favorece la sustentabilidad energética del sistema de tratamiento de agua donde se producen las microalgas. En nuestro grupo de investigación hemos acoplado el sistema de tratamiento de agua con la digestión anaerobia de las microalgas-bacterias, obteniendo potenciales de generación de hasta 348 L de metano por cada kg de microalga-bacteria^[1]. Otro biocombustible de interés es el hidrógeno, el cual puede ser producido a partir de los carbohidratos contenidos en la biomasa microalgal. Recientemente demostramos que aplicando un tratamiento ácido a biomasa microalgal se recupera hasta 90% de los carbohidratos disponibles, produciendo 45 L de hidrógeno por kg de biomasa, y en una segunda etapa hasta 432 L de metano por kg de biomasa. De esta manera, la producción secuencial de hidrógeno-metano maximiza la potencial recuperación energética de la

biomasa microalgal^[7]. Al acoplar los sistemas de producción de biomasa microalgal a la producción de biocombustibles se tendrá doble beneficio ambiental, el tratamiento de agua y la generación de energía, favoreciendo el desarrollo de sistemas energéticamente autónomo (Fig. 3).

4. Modelado y control de procesos algales

También hemos propuesto modelos matemáticos para explicar la dinámica de los procesos biológicos que emplean consorcios de microalgas y bacterias para el tratamiento de agua residual. Contar con modelos matemáticos es importante en el desarrollo de nuestras investigaciones porque permite simular el proceso en una computadora sin necesidad de hacerlo físicamente en el laboratorio. Además, un modelo matemático es útil para hacer el diseño de los sistemas microalgales desde su dimensionamiento hasta el establecimiento de las variables operacionales. Además, realizar un análisis matemático del modelo permite descubrir propiedades o comportamientos que podrían no manifestarse bajo la operación usual, pero que en caso de falla o bajo otras condiciones de operación podrían aparecer. Finalmente, los modelos matemáticos sirven para proponer estrategias de operación dinámicas basadas en controladores de procesos, mediante la retroalimentación de la información obtenida de señales de variables medidas en línea.

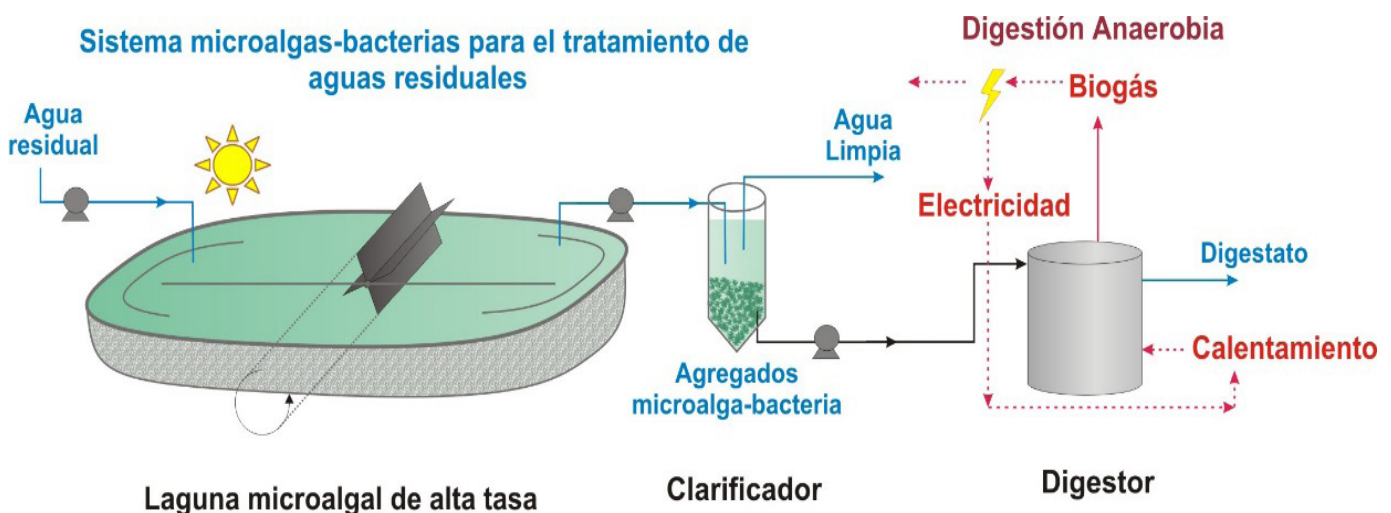


Figura 3. Esquema general de tratamiento de agua residual y generación de biocombustibles gaseosos a partir de la biomasa producida

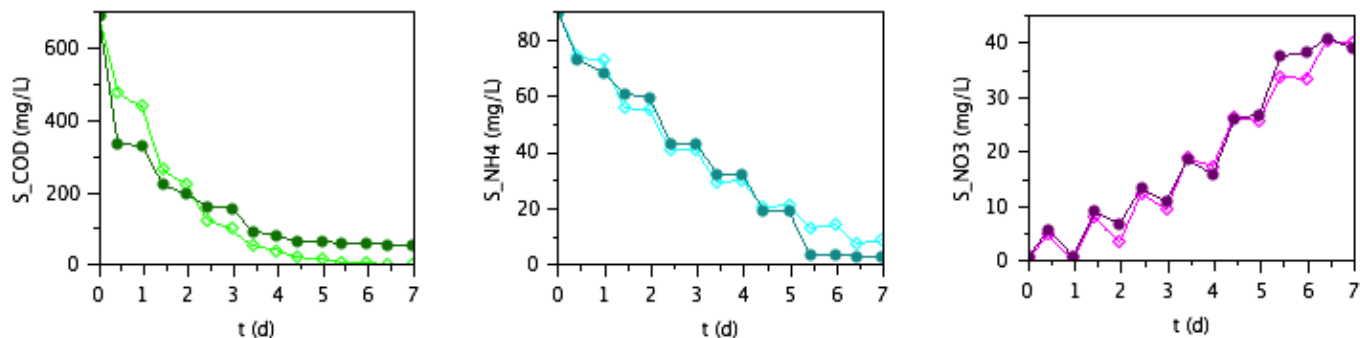


Figura 4. Ajuste de datos del modelo matemático en uno de varios experimentos en lote en el sistema experimental. Las predicciones hechas por el modelo matemático (colores oscuros) corresponden muy bien para las mediciones experimentales de tres variables de proceso (colores claros): demanda química de oxígeno (S_{COD}), nitrógeno de amonio (S_{NH_4}) y nitrógeno de nitrato (S_{NO_3})

Recientemente se ha trabajado en la propuesta de un modelo matemático simplificado para explicar la dinámica de consumo de sustrato, crecimiento de microorganismos y producción, así como de consumo de oxígeno disuelto y bióxido de carbono en un sistema microalgal operado en un reactor de tipo *raceway*. El modelo considera las dos poblaciones de microalgas y bacterias así como la forma en que ambas cambian su dinámica de acuerdo a la presencia o ausencia de luz. El modelo predice muy bien los resultados experimentales y ha servido para hacer simulaciones numéricas del proceso. La figura 4 muestra el desempeño del modelo matemático desarrollado para un reactor algal, el cual describe el comportamiento escalonado esperado debido a la alternancia de ciclos de oscuridad (noche) e iluminación (día). El siguiente paso de nuestras investigaciones es emplear este modelo para proponer estrategias de control retroalimentado para mejorar la eficiencia del proceso.

Referencias

- [1] Arcila, J. S. y Buitrón, G. (2016). *Journal of Chemical Technology and Biotechnology* 91:2862-2870.
- [2] Arango, L.; Cuervo, F. M.; González-Sánchez A. y Buitrón, G. (2016). *Water Science and Technology* 73(3):687-696.
- [3] Quijano, G.; Arcila, J. S. y Buitrón, G. (2017). *Biotechnology Advances* 35:772-781.
- [4] Arcila, J. S. y Buitrón, G. (2017). *Algal Research* 27:190-197.
- [5] Buitrón, G.; Figueroa-González, I. y Quijano, G. (2018). *Journal of Chemical Technology & Biotechnology* 93:842-848.
- [6] Coronado-Apodaca, K. G.; Vital-Jácome, M.; Buitrón, G. y Quijano, G. (2019). *Biochemical Engineering Journal* 145:170-176.
- [7] Carrillo-Reyes, J. y Buitrón, G. (2016). *Bioresource Technology* 221:324-330.