



Generación de productos de valor agregado a partir de residuos orgánicos

Idania Valdez Vázquez y Julián Carrillo Reyes

De la cuna a la tumba, fue el término utilizado para referirse al ciclo de vida de un producto desde su producción, uso y disposición final. Esta filosofía de consumo ha promovido el abuso y mal uso de los recursos naturales.¹ Después de la definición de Desarrollo Sostenible publicado en el Informe Brundtland de 1987, los especialistas proponen diversas estrategias enfocadas a mejorar la gestión de los residuos. Ahora, los residuos se consideran sustratos para la obtención de productos de valor agregado. En paralelo, las condiciones ambientales como el cambio climático obligan a los gobiernos a tomar medidas más estrictas en relación al uso de combustibles fósiles. En 2015, México promulgó la Ley de Transición Energética que establece como meta una participación mínima de las energías limpias en la generación de energía eléctrica de 35% para 2024.² El cumplimiento de esta meta hace necesario el desarrollo de nuevas tecnologías, como los biocombustibles. Estos nuevos desarrollos estarán asociados con la cogeneración de productos de valor agregado en el marco de una biorrefinería.

En 2006, se publicó el primer trabajo exhaustivo e integral sobre biorrefinerías.³ Ahora el concepto ha evolucionado a Biorrefinerías de Residuos donde éstos son transformados en biocomhttp://www.iingen.unam.mx/es-mx/Publicaciones/GacetaElectronica/Marzo2017/Paginas/Generaciondeproductos.aspx?ControlMode=Edit&DisplayMode=Design#bustibles y productos de valor agregado mediante diversas rutas de conversión.

El grupo de investigación de la Unidad Académica Juriquilla (UAJ) del Instituto de Ingeniería de la UNAM desarrolla distintos esquemas de biorrefinerías de residuos modulares (Fig. 1). Cada módulo está dirigido a la producción de: 1) biomasa; 2) biocombustibles y electricidad; y 3) otros productos de valor agregado.

Los Sustratos

La Unidad realiza investigación utilizando tres principales sustratos: Fracción Orgánica de Residuos Sólidos Urbanos (FORSU), aguas residuales y biomasa lignocelulósica residual. La FORSU se recolecta de cafeterías o restaurantes, y típicamente presenta un contenido de sólidos totales (ST) menor a 20% base seca (bs) con una demanda química de oxígeno (DQO) cercana a los 140 g/L. La FORSU se utiliza en procesos de fermentación húmeda para la producción de biocombustibles gaseosos con remociones de ST de 10 a 60%.⁴

En la Unidad se han evaluado aguas residuales provenientes de procesos agroindustriales como las vinazas generadas en la producción de vino, tequila y mezcal, así como el suero de leche que proviene de la producción de queso.^{5, 6}

Las aguas residuales municipales con baja carga orgánica también se utilizan en dos líneas de investigación: directamente en procesos bioelectroquímicos para la generación de energía, o bien para la obtención de biomasa microalgal donde se tiene un beneficio extra al fijar CO₂ atmosférico. En esta última línea de investigación, el grupo de investigación es pionero en el desarrollo de sistemas de producción de biomasa microalgal con altas velocidades de sedimentabilidad (> 8m/h), gracias a la formación de aglomerados bacteria-microalga y su posterior transformación a biocombustibles gaseosos.^{7, 8}

En México, la biomasa lignocelulósica residual proveniente de actividades agrícolas y agroindustriales; tiene un potencial estimado de más de 150 millones de toneladas de materia seca.⁹ La Unidad desarrolla biorrefinerías de residuos lignocelulósicos a partir de rastrojos de cereales, así como de bagazos de agave y caña de azúcar. Las líneas de investigación incluyen estudios de campo para caracterizar estos sustratos, determinar su disponibilidad, así como conocer los impactos ambientales que genera su producción.

En el laboratorio, el grupo estudia pretratamientos para la recuperación de azúcares para su posterior fermentación. Se busca maximizar los rendimientos, reducir la formación de subproductos inhibidores de fermentación, e incrementar la eficiencia energética.

Los Productos

Los tres principales sustratos descritos anteriormente entran en distintos esquemas de biorrefinerías de residuos obteniendo los siguientes productos: electricidad, biocombustibles gaseosos y líquidos, bioplásticos, y biofertilizantes.

Electricidad

Las celdas de combustible microbiano son dispositivos que convierten un sustrato orgánico directamente en electricidad mediante la acción de bacterias electroactivas.

El avance logrado en esta línea de investigación se centra en el estudio de dispositivos de bajo costo¹⁰ y la utilización de sustratos no estériles gracias a consorcios electroactivos integrados por *Pseudomonas*, *Geobacter* y *Shewanella*. Hasta ahora, las densidades de corriente obtenidas oscilan entre 60 y casi 300 mA/m².

Biocombustibles gaseosos

El área de investigación consolidada en la UAJ concierne a la producción biológica de hidrógeno y metano, ambos biocombustibles de naturaleza gaseosa. El hidrógeno es un vector energético con cero emisiones que se usa en celdas electroquímicas para impulsar vehículos y dispositivos eléctricos. Mientras que el metano se utiliza directamente en motores de combustión interna para generar calor, vapor o electricidad, o bien, para ser inyectado en la red de gas natural.

La producción de H₂ por vía biológica tiene tres principales rutas: fermentación oscura, fotofermentación y celdas de electrólisis microbianas. La fermentación oscura mediada por microorganismos anaerobios presenta las mayores velocidades de producción de H₂ (hasta 1L H₂/Lh) al soportar altas cargas orgánicas. El aporte de la Unidad se centra en el desarrollo de sistemas en dos etapas para la coproducción de H₂-CH₄. La primera etapa recibe cualquiera de los sustratos descritos, y parte de los ST se convierten en H₂ y ácidos grasos volátiles (AGV). En una segunda etapa, un reactor metanogénico convierte los AGV en biogás con porcentajes de metano de hasta 60%. El sistema de dos etapas aumenta la eficiencia del proceso en términos del volumen de gas producido y reduce los tiempos de reacción. En estos procesos, el control y la optimización han sido parte fundamental para asegurar la estabilidad de los sistemas biológicos.¹¹ También, se utilizan tecnologías de secuenciación de última generación para la caracterización y seguimiento de las comunidades microbianas responsables de la producción de H₂ y CH₄.

En cuanto a las vías de producción de H₂ por fotofermentación y celdas de electrólisis microbianas, éstas pueden utilizar los efluentes provenientes de la fermentación oscura. De este modo, se incrementa la productividad global de H₂ cerrando el ciclo de la biorrefinería. En los sistemas fotofermentativos se ha logrado desarrollar un consorcio microbiano integrado por *Rhodospseudomonas palustris* con alta eficiencia fotofermentativa, así como determinar el mejor soporte para la fijación de dicho consorcio en sistemas de biopelícula. Además de proponer un modelo mecanístico para determinar el efecto de variables como intensidad de luz, temperatura y pH en el proceso. Por otro lado, en la producción de H₂ mediante celdas de electrólisis microbianas (fig. 2) se ha logrado identificar el rol que juega el inóculo en el desarrollo de la biopelícula en el ánodo, desde el punto de vista de la producción de hidrógeno y la comunidad bacteriana. También se han optimizado concentraciones de AGV alimentados a los sistemas, estudiando diferentes tipos de membranas, electrodos y configuraciones de celda.

Biocombustibles líquidos

La producción de biocombustibles líquidos a partir de biomasa lignocelulósica residual pretende contribuir con el suministro de combustibles para el Sector Transporte sin competir con la producción de alimentos. En la Unidad se trabaja con el diseño de biorrefinerías de residuos celulósicas basadas en cultivos mixtos (BioCel-CM).

El diseño imita procesos naturales para desintegrar la biomasa lignocelulósica en diferentes biocombustibles: H₂, CH₄ y alcoholes.¹² A diferencia de las biorrefinerías convencionales, BioCel-CM conjunta la producción de enzimas, sacarificación y fermentación en una sola unidad de proceso.

BioCel-CM tiene el potencial de operar en condiciones no asépticas lo que reduce el consumo de energía. Con todo ello, la estructura de costos de BioCel-CM se asemeja a procesos con tecnología madura. Los avances obtenidos hasta ahora incluyen el diseño conceptual de una planta con capacidad de 1000 ton/d, así como datos experimentales de producción de H₂ y butanol a partir de paja de trigo.

Bioplásticos

La industria de los plásticos tiene gran importancia económica debido a su volumen de producción y versatilidad. Sin embargo, esta industria enfrenta dos problemas: el aumento constante en los precios del petróleo y graves problemas de contaminación por la acumulación de los plásticos

desechados en el ambiente. Una propuesta de solución es la sustitución parcial de los petroplásticos, por materiales que sean biodegradables. Los polihidroxialcanoatos (PHAs) son poliésteres lineales producidos por bacterias que poseen características termoplásticas semejantes a los petroplásticos.

El grupo de investigación de la Unidad propone integrar la producción de PHAs en los esquemas de biorrefinerías de residuos al utilizar como sustrato los AGVs contenidos en los efluentes de la fermentación oscura.¹³

Biofertilizantes

La materia orgánica que no es consumida en los procesos de obtención de biocombustibles, es susceptible de ser utilizada como biofertilizante de lenta liberación de nutrientes. En este sentido, se ha logrado identificar el potencial de microalgas provenientes de un sistema de tratamiento de aguas residuales, digeridas y sin digerir como potencial biofertilizante de hortalizas.

La investigación y desarrollo tecnológico que se lleva a cabo en la Unidad para la generación de productos de valor agregado es exitosa gracias a un enfoque multi e interdisciplinario, desde la bioingeniería de reactores, incluyendo distintas configuraciones de reactores, materiales de soporte y optimización de los parámetros operativos, hasta el control e instrumentación de los sistemas. De la misma manera, se hace uso de técnicas de última generación para la identificación molecular de microorganismos, lo que ha permitido avanzar en el conocimiento de las interacciones microbianas relevantes de los sistemas biológicos.

Referencias

1. Matharu, AS; de Melo, EM; Houghton, J A (2016). *Bioresour Technol* 215:123–130.
2. Ley de Transición Energética. DOF, México, 24 de diciembre de 2015.
3. Kamm, B; Gruber, P R; Kamm, M (2006). *Biorefineries - Industrial Processes and Products*. Wiley-VCH. Germany.
4. Ramos, C; Buitrón, G; Moreno-Andrade, I; Chamy, R (2012). *Int J Hydrogen Energy* 37, 13288-13295.
5. Buitrón, G; Carvajal, C (2010). *Biores Technol*, 101, 9071–9077.
6. Buitrón, G; Kumar, G; Martínez-Arce, A; Moreno, G (2014). *Int J Hydrogen Energy* 39, 19249-19255.
7. Arcila, JA; Buitrón, G (2016). *J Chem Technol Biotechnol* 91: 2862-2870.
8. Carrillo-Reyes, J; Buitrón, G (2016). *Biores Technol*, 221, 324-330.
9. Valdez-Vazquez, I; Acevedo-Benítez, J A; Hernández-Santiago, C (2010). *Renew Sustain Energy Rev* 14: 2147–2153.
10. Buitrón, G; Cervantes-Astorga, C (2013). *Water, Air, & Soil Pollution*, 224 (3), 1-8
11. Torres Zuñiga, I; Vargas, A; Latrille, E; Buitrón, G (2015). *Chem Eng Sci* 129:126-134.
12. Valdez-Vazquez, I; Pérez-Rangel, M; Tapia, A; Buitrón, G; Molina, C; Hernández, G; Amaya-Delgado, L (2015). *Fuel* 159:214-222.
13. Cardeña, R; Moreno, G; Valdez-Vazquez, I; Buitrón, G (2015). *Int J Hydrogen Energy* 40: 17212-17223.
14. Energy 40: 17212-17223.