

BIOCOMBUSTIBLES A PARTIR DE RESIDUOS DE FRUTAS Y VEGETALES: PROCESOS DE TRANSFORMACIÓN Y ÁREAS DE OPORTUNIDAD

BIOFUELS FROM FRUIT AND VEGETABLE WASTES: TRANSFORMATION PROCESSES AND AREAS OF OPPORTUNITY

Linares-Luna R.G.¹, Gómez-Castro F.I.^{1*} González-Guerra G.M.², Restrepo-Elorza M.d.P.², Montiel-Carrillo A.P.², Álvarez-Rivera K.Y.² y Hernández S.^{1*}.

¹Universidad de Guanajuato, Campus Guanajuato, División de Ciencias Naturales y Exactas, Departamento de Ingeniería Química, Noria Alta s/n, Colonia Noria Alta CP 36050 Guanajuato México

²Universidad de Guanajuato, Campus Guanajuato, División de Ciencias Naturales y Exactas, Departamento de Química, Cerro de la Venada s/n, CP 36040 Guanajuato Guanajuato México
*fgomez@ugto.mx

RESUMEN

Los residuos de frutas y vegetales son potenciales fuentes para la producción de biocombustibles, debido a su contenido de azúcares y fibra. Al ser residuos no aptos para el consumo humano, representan una importante fuente de carbono. En este trabajo se discutirá el potencial de este tipo de residuos para su uso como materia prima para la obtención de biocombustibles. Asimismo, se describirán las principales alternativas de procesamiento que permiten obtener productos útiles para la sociedad. Finalmente, se describirán algunas áreas de oportunidad para la implementación de esquemas de producción de biocombustibles a partir de este tipo de materia prima.

Palabras clave: biocombustibles gaseosos, biocombustibles líquidos, procesos de producción, residuos de fruta, residuos de vegetales.

ABSTRACT

Fruit and vegetable residues are potential sources for biofuel production, due to their sugar and fiber content. Being waste unfit for human consumption, it represents an important source of carbon. This paper will discuss the potential of this type of waste for use as a feedstock for obtaining biofuels. Likewise, the main processing alternatives that allow obtaining useful products for society will be described. Finally, some areas of opportunity for the implementation of biofuel production schemes from this type of feedstock will be described.

Keywords gaseous biofuels, liquid biofuels, production processes, fruit wastes, vegetable wastes.

INTRODUCCIÓN

Existen diversos sectores que dependen en gran medida de fuentes fósiles, como es el transporte y la industria en general. De acuerdo con la U.S. Energy Information Administration, el 92% de la energía consumida en México en 2019 fue producida a través de petróleo, gas natural o carbón [1]. Desafortunadamente, las fuentes fósiles son no renovables, lo cual implica que son finitas. Existen distintas predicciones referentes al tiempo que durarán las reservas de petróleo al ritmo de producción y consumo correspondiente al año en que se realiza la estimación. Como ejemplos, al año 2000 se estimaban 38 años para el agotamiento de las reservas totales [2], mientras que en 2020 el estimado se encuentra entre 9 y 10 años [3, 4]. Estas predicciones pueden variar, en términos de desarrollos tecnológicos que permitan la extracción a gran profundidad, así como el descubrimiento de nuevos yacimientos. Sin embargo, la naturaleza no renovable de las fuentes fósiles hace que su

agotamiento sea inminente. Por otra parte, la extracción y uso de recursos fósiles representa un gran impacto al medio ambiente. La quema de combustibles derivados del petróleo ocasiona la liberación de grandes cantidades de gases como óxidos de carbono y azufre a la atmósfera, los cuales con el tiempo se acumulan y contribuyen al problema de calentamiento global. Por otra parte, el consumo de recursos no renovables contribuye a incrementar la energía excedente, la cual representa la energía adicional que tendrán que invertir las futuras generaciones para poder obtener dichos recursos. Así pues, el desarrollo e implementación de energías renovables se vuelve indispensable. En los últimos años se ha observado un amplio desarrollo de este tipo de energías, entre las cuales es posible mencionar la solar, eólica y aquella proveniente de la biomasa.

Las fuentes renovables de energía presentan ciclos de regeneración cortos, tal como ocurre con la biomasa, o están disponibles de manera periódica, tal como la energía solar o la energía eólica. En el caso particular de la biomasa, ésta se encuentra distribuida en diversas

regiones del mundo, contando con características particulares en términos de las condiciones del suelo y climáticas de la zona donde se genera. A partir de la biomasa con contenido de azúcares es posible obtener bioalcoholes, tales como el bioetanol, el biobutanol, entre otros; así como otros productos de interés comercial. Por otra parte, los aceites provenientes de semillas pueden tratarse para obtener biodiésel, bioturbosina, diésel verde, entre otros. Así pues, la biomasa representa una alternativa importante al petróleo como motor principal de la economía, teniendo potencial para obtener derivados equivalentes a aquellos del petróleo, y mostrando ventajas como su carácter renovable y el potencial de reducción de impacto ambiental asociado a emisiones de gases de efecto invernadero y de consumo de recursos no renovables. Con el fin de que una industria basada en la conversión de biomasa, o bio-industria, sea posible, es necesario establecer medios para que se convierta en una opción económicamente viable. Uno de los principales obstáculos que se deben superar es el costo de la biomasa, el cual puede ser elevado. Como ejemplo, en los primeros estudios para la producción de

biodiésel se usaban aceites refinados. Sin embargo, en los últimos años se ha analizado la posibilidad de emplear residuos como materia prima para la obtención de biocombustibles y otros productos. Entre algunos de estos residuos se pueden mencionar los provenientes de la actividad agrícola (por ejemplo, paja de trigo o bagazo de caña), o aceites de cocina ya usados [5]. El utilizar este tipo de materiales para su conversión en combustibles y otros productos permite evitar su incorrecta disposición, reintegrándolos a la cadena productiva. Así, se contribuye a la creación de un esquema de economía circular. Un tipo de residuo que ha recibido atención en los últimos años corresponde a los residuos orgánicos, particularmente los desechos de frutas y vegetales (hortalizas) que se generan, entre otros, en mercados, supermercados, e incluso desde la etapa de cosecha. En ocasiones estos residuos ya no están en condiciones para consumo humano, por lo que se convierten en un desecho. Sin embargo, sus características los convierten en una posible fuente de biocombustibles. Así, en el presente trabajo se describirán los productos que se pueden obtener a partir

de este tipo de residuos, así como los tratamientos necesarios para transformar los residuos en dichos productos. Finalmente, se establecerán las áreas de oportunidad para la implementación de esquemas de aprovechamiento de residuos de frutas y vegetales.

CONVERSIÓN DE RESIDUOS DE FRUTAS Y VEGETALES A COMBUSTIBLES GASEOSOS

La degradación de la materia orgánica presente en los residuos produce una mezcla de gases compuesta principalmente por metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2); ambos son gases de efecto invernadero que al liberarse a la atmósfera impactan de manera negativa al medio ambiente y contribuyen al cambio climático. El uso de procesos de digestión para la obtención de biogás resulta una alternativa adecuada para el aprovechamiento de residuos orgánicos de frutas y vegetales, con esto se puede evitar la acumulación de estos desechos y disminuir su volumen, reduciendo la emisión de gases de efecto invernadero al ambiente.

El biogás es una fuente de energía renovable que se puede usar directamente o a través de varias vías

para generar calor, electricidad o energía mecánica para el transporte. El biogás consta de una serie de gases cuyos principales componentes son metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2). Como se ha mencionado, este se produce como resultado de la digestión de la materia orgánica en ausencia de aire por la acción de los microorganismos que se emplean, los cuales dependen del tipo de materia prima. El contenido de metano presente en el biogás es de aproximadamente 50%, siendo este el principal componente. Otro componente importante del biogás es el dióxido de carbono (CO_2), que se encuentra en cantidades cerca del 40%. Otros componentes que es posible encontrar en el biogás son agua (H_2O), oxígeno (O_2), trazas de azufre (S) y sulfuro de hidrógeno (H_2S) [6, 7]. Cuando el biogás se procesa para obtener únicamente biometano, es posible que cuente con una pureza cerca del 95 %, si se lleva a cabo a condiciones adecuadas en una planta de tratamiento de biogás, en ciertos casos el biometano obtenido tiene propiedades similares a las del gas natural [8].

El biogás se considera como un suministro de energía neutro respecto al

ciclo del carbono, y la electricidad producida por biogás genera menos dióxido de carbono que otras fuentes de energía convencional. Estudios indican que el potencial de reducción de emisiones de dióxido de carbono al emplear biogás es de hasta 3.9%, aunque por medio de mejoras técnicas esta reducción podría alcanzar el 6.14% [9, 10]. Al transformar los residuos de frutas y vegetales en biogás en un medio controlado, se reduce la emisión de gases de efecto invernadero como metano a la atmósfera debida a las grandes cantidades de materia orgánica en descomposición. Con esto es posible conseguir un mayor aprovechamiento y valor añadido sobre los residuos, reduciendo el uso de recursos energéticos a partir de combustibles fósiles [11].

Se han reportado pruebas para el aprovechamiento de residuos orgánicos de frutas y vegetales obteniendo resultados satisfactorios empleando equipos de digestión anaerobia. Se ha demostrado que los residuos de frutas y vegetales pueden ser utilizados como materia prima mediante tratamientos de digestión anaerobia, debido a las propiedades fisicoquímicas y su alto

contenido de nutrientes [12]. El emplear el conjunto de residuos orgánicos como materia prima con niveles de humedad por encima del 80% permite obtener biogás a través de procesos de digestión anaerobia y una disminución de costos en su disposición final. Este proceso resulta en una alternativa energética sustentable para la producción de biogás, ya que del total de gas obtenido cerca del 70% es metano, una cantidad considerable en comparación con otros procesos para obtención del mismo producto [13]. En estos estudios se han empleado una gran variedad de residuos de fruta, como cítricos, mango, plátano entre otros, los cuales son factibles para la producción de biogás [14]. Se han reportado rendimientos de hasta 0.42 m³ de biogás por kilogramo de sólidos volátiles, donde el contenido de sólidos volátiles reportado por kilogramo de residuo de frutas y vegetales se encuentra en el rango de 30.4 a 176.4 gramos [15]. En países como Perú se han implementado biodigestores familiares para la producción de biogás a partir de residuos orgánicos que son generados por las personas de la zona, estos equipos producen biogás apto para el uso doméstico en estufas

convencionales por lo que disminuye el uso de combustibles tradicionales de materia prima fósil y la contaminación que estos mismos generan. Asimismo, el uso de biodigestores en zonas rurales se plantea como una alternativa adecuada para el uso los residuos orgánicos que no se aprovechan completamente.

Los biodigestores son equipos en donde se lleva a cabo la digestión de desechos orgánicos por bacterias, siendo empleados para la producción de biogás a partir de materia prima orgánica rica en nutrientes. El proceso biológico ocurre cuando la materia orgánica es descompuesta por bacterias en función de la presencia o ausencia de oxígeno en el biodigestor. La digestión anaeróbica es un proceso biológico en los que los microorganismos descomponen el material biodegradable en ausencia de oxígeno [16]. El producto principal que se obtiene en este proceso es biogás. Las bacterias que intervienen en los procesos de digestión anaeróbica dependen de cuatro fases: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis. Existen distintos modelos de biodigestores aptos para el procesamiento de biomasa, entre estos se encuentran el biodigestor de flujo continuo y el biodigestor de flujo

semicontinuo. La degradación de la materia orgánica para la producción de metano depende de la interacción compleja de varios grupos diferentes de bacterias [11]. La operación estable del digestor requiere que estos grupos bacterianos estén en equilibrio dinámico. Los cambios en las condiciones ambientales pueden afectar este equilibrio y dar como resultado la acumulación de compuestos que pueden inhibir el proceso general o disminuir el rendimiento del proceso.

El proceso global de producción de biogás y generación energética se puede dividir en distintas etapas: gestión de los residuos de frutas y vegetales, la digestión anaerobia en biorreactores, almacenamiento y filtrado del biogás obtenido en el proceso, finalizando con la generación de energía dependiendo del uso, ya sea en área doméstica o industrial [17]. El proceso de producción de biogás se representa en la **Figura 1**. La producción de metano o biogás a partir de materia prima orgánica depende de distintos factores: potencial de los residuos (rendimiento), velocidad de carga orgánica, la temperatura de operación, así como de la presencia de compuestos denominados inhibidores.

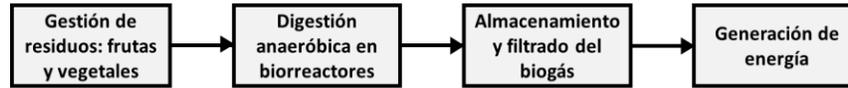


Figura 1. Esquema de producción de biogás a partir de residuos de frutas y vegetales.

CONVERSIÓN DE RESIDUOS DE FRUTAS Y VEGETALES A COMBUSTIBLES LÍQUIDOS

Los residuos de frutas y vegetales son aptos para la fermentación debido a su alto contenido de pectina, celulosa y hemicelulosa. Se han reportado buenos rendimientos de producción de combustibles líquidos a partir del uso de biomasa. La biomasa engloba a toda la materia orgánica que proviene de árboles, plantas y residuos de provenientes de la agricultura (maíz, café, arroz, frutas y vegetales), así como residuos de la industria forestal y la agricultura, y desechos urbanos [18].

A partir de orujos, bagazos y residuos resultantes del procesamiento de pulpa, semillas o tallos para extraer el jugo de frutas y vegetales, es posible obtener dos combustibles (bioetanol y biobutanol), por medio de la fermentación de los azúcares que contienen estos residuos. Se han reportado rendimientos para la producción de bioetanol a partir de

residuos de frutas, empleando fermentación con *Saccharomyces cerevisiae*, en el orden de 0.45 a 0.9 miligramos de etanol por mililitro de caldo de fermentación, dependiendo del tipo de residuo empleado como materia prima [19]. De manera similar, para la fermentación de orujo de uva se han reportado rendimientos de 0.27 litros de bioetanol por kilogramo de materia prima [20]. Por otra parte, las semillas presentes en los residuos de frutas contienen aceite que puede emplearse para la producción de biodiésel. La biomasa lignocelulósica de diversos sectores se considera como una opción sostenible y viable debido a su abundante disponibilidad a lo largo del año en diversas formas, ya que puede ser obtenida del sector agroindustrial y mercados locales.

El bioetanol es considerado un alcohol con niveles altos de octanaje, anticorrosivo y oxigenante que puede ser empleado como combustible mezclándolo

con las naftas en diferentes proporciones, también es conocido por sus diversas aplicaciones en los sectores de la industria, el transporte y la energía. Este compuesto químico se puede producir a partir de materias orgánicas que contienen una cantidad elevada de carbohidratos, específicamente de residuos de frutas y vegetales con altos niveles de azúcares [21]. Sin embargo, la viabilidad económica de la producción de bioetanol y biobutanol depende de la disponibilidad de la materia prima a emplear, del consumo energético del proceso, de su integración con otros sistemas de producción, así como de la efectiva conversión de los sustratos utilizados [22]. Por otra parte, el biobutanol es un alcohol primario con fórmula $C_4H_{10}O$, es un combustible alternativo ideal debido a su alto contenido energético, baja volatilidad y características de ser menos higroscópico y corrosivo que el bioetanol. Es un líquido incoloro con un olor distintivo y es completamente miscible con disolventes orgánicos y parcialmente miscible con agua. La producción de biocombustible mediante el uso de biomasa lignocelulósica sigue un proceso integrado que consta básicamente de tres

pasos: pretratamiento, hidrólisis y fermentación, los cuales serán abordados posteriormente.

La producción de biobutanol es considerada prometedora y económicamente viable empleando procesos sustentables [23]. De los diferentes tipos de biocombustibles disponibles (biodiesel, biohidrógeno, biometanol), el biobutanol tiene características similares a la gasolina, superando los principales problemas que poseen otros tipos de combustible renovable. Tanto el biobutanol como el bioetanol tiene un gran potencial en el mercado de biocombustibles [24].

La conversión en bioproductos de materiales con contenido de celulosa y hemicelulosa, como residuos de frutas y vegetales, regularmente necesita de cuatro fases: pretratamiento, hidrólisis, fermentación y separación o destilación del producto. Una vez analizada la composición de la materia prima a emplear, es decir, de los orujos de frutas y vegetales que se emplearán en los distintos procesos, es necesario estudiar los pretratamientos que es posible emplear para cada uno de los orujos y residuos de frutas.

En primera instancia se necesita disminuir el tamaño y llevar a cabo el pretratamiento mediante deslignificación de la materia prima lignocelulósica para liberar la celulosa y hemicelulosa presentes en la materia prima. Previo a la hidrólisis enzimática, se debe realizar dicho pretratamiento de la biomasa lignocelulósica para alterar la compleja estructura de este tipo de materiales, facilitando así la acción de las enzimas [25]. Se ha reportado que el uso de pretratamientos altera o elimina los impedimentos en la composición para un mayor acceso durante la hidrólisis, aumentando el rendimiento en el proceso de fermentación. Posteriormente, es necesario realizar la despolimerización de los polímeros de carbohidratos (celulosa y hemicelulosa) presentes en los orujos de frutas y vegetales empleando hidrólisis ácida o enzimática para producir azúcares libres. El tercer paso conlleva varios procesos de fermentación, los azúcares de las etapas de pretratamiento e hidrólisis son fermentados por bacterias, levaduras u hongos filamentosos, dependiendo del método de fermentación a emplear [25]. Como paso final del proceso los productos obtenidos en la fermentación se separarán y

recuperarán en un proceso posterior, regularmente se emplea un proceso de destilación acorde a las propiedades de los productos [26].

Los pretratamientos se pueden clasificar en pretratamientos físicos (mecánicos y térmicos), y químicos (empleando ácidos o bases), así como la combinación entre ambos. A continuación, se describen los pretratamientos más empleados en esta clase de procesos, así como las ventajas y desventajas generales cada uno.

Pretratamiento mecánico. Esta clase de tratamiento previo consiste en realizar cortes a la biomasa lignocelulósica para disminuir su tamaño y aumentar la superficie específica. La característica principal de dicho tratamiento es la reducción del tamaño de las partículas que componen la biomasa. La disminución en el tamaño de las partículas provoca de igual manera una reducción en el grado de polimerización. Estos factores incrementan el rendimiento de la hidrólisis de la biomasa lignocelulósica [27].

Pretratamiento térmico. Este pretratamiento consiste en la aplicación de calor a la biomasa lignocelulósica para aumentar la temperatura entre un rango

de 150-200 °C; sin embargo, este rango depende de la composición de la materia prima que se está empleando, la elección adecuada de la temperatura incrementa el rendimiento del tratamiento [28].

Pretratamiento con vapor de agua. En el pretratamiento con vapor de agua la biomasa se lleva a condiciones más elevadas que en el pretratamiento térmico, empleando temperaturas alrededor de 250°C durante tiempos cortos, en el orden de minutos. Después de un tiempo, el vapor se libera y la biomasa se enfría rápidamente. El objetivo de un pretratamiento con vapor, es solubilizar la hemicelulosa presente en la materia prima y así tener mayor acceso para la hidrólisis enzimática de la

celulosa, evitando la formación de los inhibidores [29].

En los esquemas de aprovechamiento se emplean distintos procesos de fermentación para la obtención de productos como los biocombustibles. Los métodos más adecuados para la materia prima orgánica, como los residuos de frutas y vegetales, son principalmente 2 tipos de fermentación: fermentación ABE (Acetona-Butanol-Etanol) y fermentación IBE (Isopropanol-Butanol-Etanol). El esquema completo para el aprovechamiento de residuos de frutas y vegetales mediante estos métodos de fermentación se muestra en la **Figura 2**. A continuación, se describe brevemente cada uno de estos procesos.

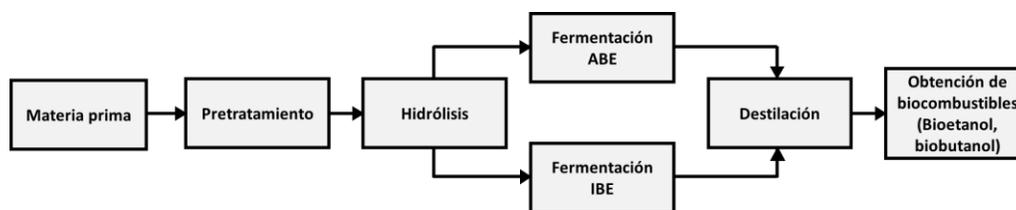


Figura 2. Esquema general para la obtención de bioalcoholes a partir de residuos de frutas y vegetales.

Fermentación ABE. La fermentación ABE es un método que hace uso de procesos bacterianos para la obtención de acetona, n-butanol y etanol a partir de carbohidratos tales como el almidón y la glucosa. El proceso de fermentación ABE, se encuentra relacionado con los

procesos de fermentación llevados a cabo por levaduras en la producción de vinos, cerveza, o combustibles. En estos procesos las levaduras fermentan azúcares para producir etanol, sin embargo, a diferencia de lo que ocurre en las fermentaciones industriales clásicas,

los organismos que llevan a cabo la fermentación ABE son estrictamente anaerobios. La fermentación ABE produce solventes en una proporción de 3 partes de acetona, 6 partes de butanol y 1 parte de etanol. Por lo general hace uso de una cepa de las bacterias pertenecientes a la clase de las *Clostridias*, (familia *Clostridiaceae*) [30]. Se ha reportado la producción de biobutanol por fermentación ABE a partir de residuos de frutas, particularmente cáscaras de manzana y pera, reportando rendimientos de hasta 14 gramos de butanol por litro de caldo de fermentación [31].

Fermentación IBE. La fermentación IBE es un proceso para la obtención de isopropanol, n-butanol y etanol empleando bacterias en conjunto a partir de los carbohidratos de la materia prima. Generalmente en este proceso se emplean cepas *Clostridium beijerinckii*. A diferencia de la fermentación ABE, no se produce acetona, sino isopropanol, así como butanol y etanol, por lo que se genera en conjunto una mezcla de alcoholes, la cual puede emplearse directamente como combustible [32]. La bacteria *Clostridium beijerinckii* ha sido empleada con éxito en la fermentación

IBE para procesos de obtención de biocombustibles a partir de residuos orgánicos. Son pocos los estudios relacionados con la fermentación IBE de residuos de frutas y vegetales. Un análisis propuso este tipo de fermentación para la conversión de cáscara de mandarina, empleando simultáneamente dos variantes de *Clostridium* (*beijerinckii* y *cellulovorans*). De esta manera se han obtenido rendimientos máximos de 0.046 gramos de butanol por cada gramo de sedimento seco [33].

El uso de los orujos de frutas y vegetales también hace posible emplear las semillas presentes en estos como materia prima para la producción de otros biocombustibles, tal como el biodiésel. Existen distintos métodos de extracción de aceites a partir de residuos de semillas, entre los que se encuentran métodos mecánicos y químicos. Se ha demostrado que los métodos de extracción químicos son eficaces debido a su alto rendimiento de extracción de aceite y por su rendimiento constante a lo largo del proceso. En la producción de biocombustibles se han desarrollado métodos de extracción específicos que cuentan con antecedentes de

rendimientos aceptables en la obtención del producto deseado. La **Figura 3** muestra el esquema para la producción de biodiesel a partir de residuos orgánicos.

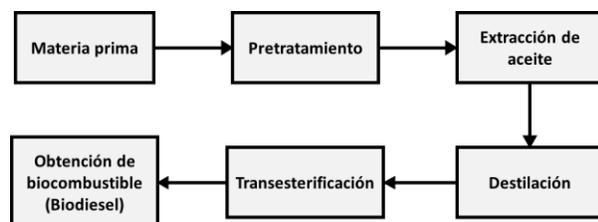


Figura 3. Esquema para la obtención de biodiésel a partir de residuos de frutas y vegetales.

Existen distintos métodos de extracción de aceite para la producción de biodiésel, entre los que se encuentran el método de extracción con solvente, mediante el cual el aceite se extrae de un sólido por medio de un solvente líquido. También se encuentra el método de extracción enzimática, apto para la extracción de aceite a partir materia prima vegetal, y el método de extracción con fluido supercrítico, mediante el cual se busca evitar el uso de disolventes y aumentar la velocidad de extracción del aceite. Una vez obtenido el aceite, éste reacciona con un alcohol para obtener el biodiésel y glicerol, lo cual se conoce como transesterificación.

El desarrollo de cada uno de los esquemas anteriormente mencionados, empleando los distintos métodos de fermentación y de extracción, son procesos eficaces para la obtención de biocombustibles (bioetanol, biobutanol, biodiésel y biogás), así como productos adicionales (acetona e isopropanol). El desarrollo de los distintos esquemas para el aprovechamiento de residuos puede ser considerado como una alternativa con menor impacto ambiental a la producción de combustibles fósiles.

ÁREAS DE OPORTUNIDAD

Si bien la producción de biocombustibles a partir de residuos de frutas y vegetales es técnicamente factible, existen diversas áreas de oportunidad que deben atenderse para que la producción a mayor escala sea económicamente redituable. Uno de los primeros retos está relacionado con la escasa información en torno a la generación de este tipo de residuos. Solo en casos particulares se conoce el volumen de residuos de frutas y vegetales generados por día, mientras que en otros casos se reporta en lo general la cantidad de residuos orgánicos [34,35]. Por otra parte, no existe información disponible respecto a la

naturaleza de los residuos, es decir, la proporción de residuos con alto contenido de azúcares, o de residuos con contenido de aceite. Es deseable contar con esta información con el fin de determinar el tipo de productos que se pueden obtener a partir de los residuos de frutas y vegetales. Más aún, es posible que la naturaleza de los residuos cambie con las temporadas, lo cual a su vez implicaría la necesidad de planear la producción en términos de los residuos disponibles por temporada.

Otro aspecto que se debe tomar en cuenta es la dispersión de los residuos, los cuales se encuentran en distintas fuentes, tales como centrales de abasto, mercados y supermercados. Esto implica la determinación de una logística apropiada para la recolección de los residuos y su transporte a los centros de tratamiento. Tal cadena de suministro debe planearse de tal manera que se logre obtener la mayor cantidad de materia prima con el menor costo de transporte. Por otra parte, el movimiento de materiales conlleva un impacto ambiental debido a las emisiones generadas por los medios de transporte. Al planear la cadena de suministro, debe procurarse también que el impacto

ambiental asociado a este factor sea el menor posible. Este tipo de estudios se han realizado para la recolección de residuos agroindustriales y de aceites de cocina usados [36,37]. Por otra parte, es importante incorporar fuentes adicionales de materia prima. En el caso de residuos de frutas y vegetales, otra posible fuente es con los propios agricultores, quienes a su vez tienen productos que se desechan desde las etapas de cosecha y postcosecha. Al adquirir a precios justos esos productos que no cumplen con los estándares para su consumo, se tendría una contribución a la economía del sector agrícola. Adicionalmente, los esquemas de procesamiento pueden desarrollarse de manera tal que sean capaces de transformar otros tipos de residuos, tales como pajas, bagazos, entre otros, con el fin de satisfacer una mayor demanda de productos.

Un área de oportunidad adicional está relacionada con la diversificación de los productos generados. Si bien los residuos de frutas y vegetales tienen potencial para la producción de diversos biocombustibles, esta no es en lo general económicamente competitiva [38,39]. Con el fin de incrementar el potencial económico de la transformación de los

residuos, es necesario incluir en el esquema de aprovechamiento esquemas de co-producción de productos de alto valor agregado. La composición de algunas fracciones de los residuos permite esta alternativa. Como ejemplos, se ha reportado la producción de ácido succínico a partir de residuos de frutas y vegetales [40], así como la extracción de pectina a partir de cáscara de plátano [41]. Esta diversificación de productos permitirá el uso de todas las fracciones de los residuos en esquemas de biorefinería. Finalmente, es necesario desarrollar esquemas eficientes de procesamiento para los residuos, derivándose en bajos requerimientos de energía y bajo consumo de agua, así como reducciones en los costos de capital y de operación. Con este fin, es deseable la aplicación de herramientas como la intensificación de procesos, la integración energética y másica, así como la optimización rigurosa de los procesos. La intensificación de procesos promueve el desarrollo de tecnologías eficientes, de manera que los requerimientos de servicios auxiliares en los procesos, así como las dimensiones de los equipos, el costo de inversión y la generación de residuos sean reducidos

de forma dramática [42]. Por otra parte, la integración energética promueve el aprovechamiento de la energía de las corrientes del proceso para reducir los requerimientos de servicios de calentamiento y enfriamiento [43]; la integración másica establece estrategias para aprovechar los agentes másicos disponibles, reduciendo a su vez los costos de producción y el impacto ambiental de los procesos [44]. Finalmente, la optimización rigurosa permite, empleando técnicas matemáticas adecuadas, determinar el diseño de los procesos y las condiciones de operación que permiten el mejor aprovechamiento posible de los recursos, reduciendo tanto como sea posible indicadores como el costo total anual, el impacto ambiental, entre otros [45].

CONCLUSIONES

Los residuos de frutas y vegetales presentan un gran potencial para su conversión a biocombustibles. Asimismo, este tipo de residuos tienen una alta disponibilidad y se generan de manera continua. La naturaleza de los residuos de frutas y vegetales permite la obtención de diversos productos a partir de las fracciones que los componen, entre los

que se incluyen bioalcoholes, biodiésel, biogás, así como productos de alto valor agregado. Esto último permite mejorar la economía de los procesos de transformación. Por otra parte, es importante desarrollar tecnologías que permitan mejorar el rendimiento de los esquemas de producción, así como reducir los requerimientos energéticos asociados a los procesos de transformación.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen profundamente el apoyo de la Universidad de Guanajuato.

REFERENCIAS

- [1] EIA (Energy Information Administration). 2020. Overview – Mexico is a major producer of petroleum and other liquids and is one of the largest providers of U.S. oil imports. <https://www.eia.gov/international/analysis/country/MEX>
- [2] Centro de Estudios de las Finanzas Públicas. 2021. Evolución y perspectiva del sector energético en México, 1970-2000. <https://www.cefp.gob.mx/intr/edoc/mentos/pdf/cefp/cefp0512001.pdf>
- [3] Nava D. 2020. México tiene reservas probadas de petróleo para 10 años. <https://www.elfinanciero.com.mx/economia/mexico-tiene-reservas-probadas-de-petroleo-para-10-anos/>
- [4] Solís A. 2020. México tiene reservas probadas de gas y petróleo para 9 años. <https://www.forbes.com.mx/economia-mexico-reservas-probadas-petroleo-gas-anos/>
- [5] Gómez-Castro FI, Gutiérrez-Antonio C, Hernández S, Conde-Mejía C, López-Molina A, Morales-Rodríguez R (2019) Producción de biocombustibles en México. Parte 1. Materias primas. Digital Ciencia@UAQRO 12: 41-50
- [6] Herout M, Malatak J, Kucera L, Dlabaja T. (2011) Biogas composition depending on the type of plant biomass used. Research in Agricultural Engineering 57: 137-143
- [7] Padilla Sevillano AW, Rivero Méndez JF. (2016) Producción de biogas y compost a partir de residuos orgánicos recolectados del complejo arqueológico Huaca de la Luna. Ciencia y Tecnología 12: 29-43
- [8] dos Santos LA, Valença RB, da Silva LCS, Holanda SH de B, da Silva AFV, Jucá JFT, Santos

- AFMS. (2020) Methane generation potential through anaerobic digestion of fruit waste. *Journal of Cleaner Production* 256: 120389
- [9] Cuéllar AD, Webber ME. (2008) Cow power: the energy and emissions benefits of converting manure to biogas. *Environmental Research Letters* 3: 034002
- [10] Was A, Sulewski P, Krupin V, Popadynets N, Malak-Rawlikowska A, Szymanska M, Skorokhod, Wysokinski M. (2020) The potential of agricultural biogas production in Ukraine – impact on GHG emissions and energy production. *Energies* 13: 5755
- [11] Çalışkan Eleren S, Öziş Altınçekiç Ş, Altınçekiç E. (2018) Biofuel potential of fruit juice industry waste. *Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste* 22: 05018002
- [12] López R, Quinto P, Aguilar H, Garibay C. (2015) Evaluación de la producción de biogás a partir de residuos orgánicos putrescibles en la ciudad de México. *Revista de La Facultad de Ciencias Químicas* 3: 1-9
- [13] Al-Wahaibi A, Osman AI, Al-Muhtaseb AH, Alqaisi O, Baawain M, Fawzy S, Rooney DW. (2020) Techno-economic evaluation of biogas production from food waste via anaerobic digestion. *Scientific Reports* 10: 15719
- [14] Achinas S, Krooneman J, Euverink GJW. (2019) Enhanced biogas production from the anaerobic batch treatment of banana peels. *Engineering* 5: 970-978
- [15] Garcia-Peña EI, Parameswaran P, Kang DW, Canul-Chan M, Krajmalnik-Brown R. (2011) Anaerobic digestion and co-digestion processes of vegetable and fruit residues: process and microbial ecology. *Bioresource Technology* 102: 9447-9455
- [16] Dubrovskis V, Plume I. (2017) Biogas from wastes of pumpkin, marrow and apple. *Agronomy Research* 15: 69-78
- [17] Sandhu S, Kaushal R. (2019) Anaerobic digestion of vegetable, fruit and cafeteria wastes with cow dung by chemical pretreatment for biogas production in batch digester. *Journal of Physics: Conference Series* 1240: 012132
- [18] Pfaltzgraff LA, De Bruyn M, Cooper EC, Budarin V, Clark JH. (2013) Food waste biomass: a resource for high-value chemicals. *Green Chemistry* 15: 307-314
- [19] Gosavi P, Chaudhary Y, Durve-Gupta A. (2017) Production of

biofuel from fruits and vegetable wastes. *European Journal of Biotechnology and Bioscience* 5: 69-73

[20] Corbin KR, Hsieh YSY, Betts NS, Byrt CS, Henderson M, Stork J, DeBolt S, Fincher GB, Burton RA. (2015) Grape marc as a source of carbohydrates for bioethanol: chemical composition, pre-treatment and saccharification. *Bioresource Technology* 193: 76-83

[21] Casabar JT, Unpaprom Y, Ramaraj R. (2019) Fermentation of pineapple fruit peel wastes for bioethanol production. *Biomass Conversion and Biorefinery* 9: 761-765

[22] Micic V, Jotanovic M. (2015) Bioethanol as fuel for internal combustion engines. *Zastita Materijala* 56: 403-408

[23] Gustavsson J, Cederberg C, Sonesson U, Emanuelsson A. 2013. Global food losses and food waste: extent, causes and prevention. SIK Report No. 857. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:944159/FULLTEXT01.pdf>

[24] Ibrahim MF, Ramli N, Kamal Bahrin E, Abd-Aziz S. (2017) Cellulosic biobutanol by Clostridia: challenges and improvements.

Renewable and Sustainable Energy Reviews 79: 1241-1254

[25] Chattopadhyay S, Mukerji A, Sen R. (2009) Biofuels. En P. Singh nee'Nigam y A. Pandey (Eds.), *Biotechnology for Agro-Industrial Residues Utilisation: Utilisation of Agro-Residues*. Springer

[26] Zhang Z, O'Hara IM, Mundree S, Gao B, Ball AS, Zhu N, Zhihui B, Jin B. (2016) Biofuels from food processing wastes. *Current Opinion in Biotechnology* 38: 97-105

[27] Che Kamarludin SN, Jainal MS, Azizan A, Safaai NSM, Daud ARM. (2014) Mechanical pretreatment of lignocellulosic biomass for biofuel production. *Applied Mechanics and Materials* 625: 838-841

[28] Mahmood H, Moniruzzaman M, Iqbal T, Khan MJ (2019) Recent advances in the pretreatment of lignocellulosic biomass for biofuels and value-added products. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry* 20: 18-24

[29] Sui W, Chen H. (2016) Effects of water states on steam explosion of lignocellulosic biomass. *Bioresource Technology* 199: 155-163

- [30] Bankar SB, Survase SA, Singhal RS, Granström T. (2012) Continuous two stage acetone-butanol-ethanol fermentation with integrated solvent removal using *Clostridium acetobutylicum* B 5313. *Bioresource Technology* 106: 110-116
- [31] Raganati F, Procentese A, Olivieri G, Russo ME, Marzocchella A. (2016) Butanol production by fermentation of fruit residues. *Chemical Engineering Transactions* 49: 229-234
- [32] Ferreira dos Santos Vieira C, Maugeri Filho F, Maciel Filho R, Pinto Mariano A. (2020) Isopropanol-butanol-ethanol (IBE) production in repeated-batch cultivation of *Clostridium beijerinckii* DSM 6423 immobilized on sugarcane bagasse. *Fuel* 263: 116708
- [33] Tomita H, Okazaki F, Tamaru Y. (2019) Direct IBE fermentation from mandarin orange wastes by combination of *Clostridium cellulovorans* and *Clostridium beijerinckii*. *AMB Express* 9: 1
- [34] SEMARNAT. 2013. Informe de la situación del medio ambiente en México – Compendio de estadísticas ambientales, indicadores clave y de desempeño ambiental, México. https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe15/tema/pdf/Informe15_completo.pdf
- [35] SMAOT. 2020. Programa estatal para la prevención y gestión integral de los residuos de manejo especial de Guanajuato (BORRADOR PARA CONSULTA). <https://smaot.guanajuato.gob.mx/sitio/manejo-integral-de-residuos/197/Programa-Estatal-para-la-Prevencion-y-Gesti%C3%B3n-Integral-de-los-Residuos-de-Manejo-Especial-de-Guanajuato>
- [36] Jiang Y, Zhang Y. (2016) Supply chain optimization of biodiesel produced from waste cooking oil. *Transportation Research Procedia* 12: 938-949
- [37] Espinoza Vázquez YM, Gómez-Castro FI, Ponce-Ortega JM. (2022) Multiobjective optimization of the supply chain for the production of biomass-based fuels and high-value added products in Mexico. *Computers and Chemical Engineering* 157: 107598
- [38] Gebremariam SN, Marchetti JM. (2018) Economics of biodiesel production: Review. *Energy Conversion and Management* 168: 74-84
- [39] Carrillo-Nieves D, Rostro Alanís MJ, de la Cruz Quiroz R, Ruiz HA, Iqbal HMN, Parra-Saldívar R. (2019) Current status and future trends of bioethanol production from agro-industrial wastes in Mexico. *Renewable and*

Sustainable Energy Reviews 102:
63-74

[40] Li C, Yang X, Gao S, Chuh AH, Lin CSK. (2018) Hydrolysis of fruit and vegetable waste for efficient succinic acid production with engineered *Yarrowia lipolytica*. Journal of Cleaner Production 179: 151-159

[41] Rivadeneira JP, Wu T, Ybanez Q, Dorado AA, Migo VP, Nayve FRP, Castillo-Israel KAT (2020) Microwave-assisted extraction of pectin from "Saba" banana peel waste: optimization, characterization, and rheology study. International Journal of Food Science 2020: 8879425

[42] Stankiewicz AJ, Moulijn JA. (2000) Process intensification: transforming chemical engineering. Chemical Engineering Progress: 22-34

[43] Aldana-González MG, Gómez-Castro FI, Romero-Izquierdo AG, Conde-Mejía C, Gutiérrez-Antonio C, Morales-Rodríguez R. (2022) Supercritical biodiesel production: feasibility of energy integration with a bioethanol production process. Revista Mexicana de Ingeniería Química 21: Proc2534

[44] Velázquez-Guevara MA, Uribe-Ramírez AR, Gómez-Castro FI, Ponce-Ortega JM, Hernández S, Segovia-Hernández JG, Alfaro-

Ayala JA, Ramírez-Minguela JdJ. (2018) Synthesis of mass exchange networks: a novel mathematical programming approach. Computers and Chemical Engineering 115: 226-232

[45] Segovia-Hernández JG, Gómez-Castro FI (2017) Stochastic process optimization using Aspen Plus®. Taylor and Francis, Boca Raton.

