

Biorrefinerías y Economía Circular

Graciela Carrillo González • Luis G. Torres Bustillos
(Coordinadores)



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA
UNIDAD XOCHIMILCO División de Ciencias Sociales y Humanidades
Departamento de Producción Económica

Graciela Carrillo González Doctora en economía por la Universidad de Barcelona y maestra en economía y política internacional por el CIDE. Profesora-investigadora en el Departamento de Producción Económica de la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Xochimilco; docente en el posgrado en Economía, Gestión y Políticas de la Innovación, así como en la maestría en Sociedades Sustentables. Directora de tesis de maestría y doctorado en temas de economía, gestión ambiental e innovación, ha participado en diversos foros y congresos relacionados con medio ambiente y empresa, así como gestión y política ambiental en el sector público. Es autora de más de 50 artículos y capítulos de libro. Actualmente trabaja temas relacionados con la economía circular, la ecología industrial y las biorrefinerías.

Luis Gilberto Torres Bustillos Doctor en ingeniería ambiental por la Facultad de Ingeniería y maestro en biotecnología (UNAM). Ha trabajado en prestigiosos institutos de investigación como el IBio/UNAM, el IMTA-Semarnat, el Instituto de Ingeniería-UNAM, el Instituto Mexicano del Petróleo y en el UPIBI-IPN. Con estancias de investigación en Canadá, Inglaterra, China, Cuba y Francia, es autor de más de 120 artículos internacionales y coordinador de seis libros en México y Estados Unidos; ha dirigido tesis de licenciatura y posgrado en temas de biotecnología, ingeniería química y ambiental. Actualmente está interesado en el cultivo, cosecha y posproceso de microalgas y cianobacterias con aplicaciones en las áreas de alimentos, ambiente, farmacia y energía, así como en el desarrollo de biorrefinerías basadas en microalgas, semillas, aguas residuales y lodos. Consultor en ingeniería ambiental.



BIORREFINERÍAS
Y ECONOMÍA CIRCULAR



Casa abierta al tiempo

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA

Rector general, Eduardo Abel Peñalosa Castro

Secretario general, José Antonio de los Reyes Heredia

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA-XOCHIMILCO

Rector de Unidad, Fernando de León González

Secretaria de Unidad, Claudia Mónica Salazar Villava

DIVISIÓN DE CIENCIAS SOCIALES Y HUMANIDADES

Directora, Dolly Espínola Frausto

Secretaria académica, Silvia Pomar Fernández

Jefa del Departamento de Producción Económica: Angélica Buendía Espinosa

Jefe de la sección de publicaciones, Miguel Ángel Hinojosa Carranza

CONSEJO EDITORIAL

José Alberto Sánchez Martínez (presidente) / Aleida Azamar Alonso

Alejandro Cerda García / Gabriela Dutrénit Bielous

Álvaro Fernando López Lara / Elsa E. Muñoz García

Jerónimo Luis Repoll / Gerardo G. Zamora Fernández de Lara

Asesores: Rafael Reygadas Robles Gil, Miguel Ángel Hinojosa Carranza

COMITÉ EDITORIAL

Carlos Andrés Rodríguez Wallenius (presidente)

Carlos Muñoz Villarreal / Griselda Martínez Vázquez

Cuauhtémoc Pérez Llanas / Jorge Ruiz Moreno

Ana María Paredes Arriaga / Arturo Torres Vargas

Asistente editorial, Varinia Cortés Rodríguez

Biorrefinerías y Economía Circular

Graciela Carrillo González · Luis G. Torres Bustillos
(coordinadores)

D.R. © 2019 Universidad Autónoma Metropolitana
UAM Xochimilco
Calzada del Hueso núm. 1100
Col.Villa Quietud
04960 Ciudad de México

Sección de Publicaciones,
División de Ciencias Sociales y Humanidades
Edificio A, 3er piso
Teléfono: 54 83 70 60
pubcsh@gmail.com / pubcsh@correo.xoc.uam.mx
<http://dcs.h.xoc.uam.mx/repdig>
<http://www.casadelibrosabiertos.uam.mx/index.php/libroelectronico>

Primera edición: octubre de 2019

Diseño de cubierta: Mónica Zavala

ISBN 978-607-28-1692-3

Esta publicación de la División de Ciencias Sociales y Humanidades de la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Xochimilco y de la Universidad Autónoma de Sinaloa, fue dictaminada por pares académicos externos especialistas en el tema.

Impreso y hecho en México

Índice

Introducción	7
<i>Graciela Carrillo González</i>	
<i>Luis G. Torres Bustillos</i>	
Economía circular, bioeconomía y biorrefinerías	15
<i>Graciela Carrillo González</i>	
<i>José Ignacio Ponce Sánchez</i>	
Evaluación financiera de los proyectos de biorrefinerías con la metodología de opciones reales	37
<i>José de Jesús Brambila Paz</i>	
<i>María Magdalena Rojas Rojas</i>	
<i>Verónica Pérez Cerecedo</i>	
Competitividad de biorrefinerías de sistemas agroindustriales	57
<i>Noé Aguilar Rivera</i>	
<i>Ricardo Serna Lagunes</i>	
<i>Teresita de Jesús Debernardi Vázquez</i>	
Criterios de evaluación técnico-económico-ambiental para la selección de productos y el diseño de biorrefinerías	79
<i>Teresa López Arenas</i>	
<i>Omar Anaya Reza</i>	
Evaluación de la sostenibilidad para el diseño conceptual de biorrefinerías	121
<i>Julio C. Sacramento Rivero</i>	
<i>Freddy S. Navarro Pineda</i>	

Valorización de residuos agroalimentarios, contribución a la economía circular en Guanajuato <i>Gemma Cervantes</i> <i>Estephanie de los Ángeles Solís</i> <i>Sylvie Turpin</i>	147
Biocombustibles: ¿puede México aprovechar estos energéticos? <i>Aleida Azamar Alonso</i> <i>Daniel Tagle Zamora</i>	169
Biorrefinería basada en aguas residuales municipales e industriales: producción de biomasa, lípidos, pigmentos y bioenergía <i>Luis Gilberto Torres Bustillos</i>	185
Pretratamientos de la biomasa para la producción de azúcares fermentables <i>Eulogio Castro Galiano</i> <i>Inmaculada Romero Pulido</i> <i>Encarnación Ruiz Ramos</i>	207
Valorización de residuos lignocelulósicos: materiales, biomoléculas, azúcares fermentables y enzimas <i>Arturo Figueroa</i> <i>Gabriel Viguera</i> <i>Maribel Hernández</i>	227
Retos al desarrollo de biorrefinerías en México <i>Marcela Amaro Rosales</i> <i>Diana Patricia Rivera Delgado</i>	255
Los autores	281

Introducción

Graciela Carrillo González
Luis G. Torres Bustillos

Aun cuando no existe una sola definición de biorrefinería, en general se identifica como una entidad que emplea una o varias fuentes de biomasa y/o residuos para la generación de diversos materiales, productos y formas de energía. Aunque la palabra está fuertemente relacionada con las refinerías que tratan materiales fósiles (i.e., crudo, gas, carbón) para generar materiales, combustibles y energía, su diferencia estriba básicamente en los sustratos que emplea. No debe pensarse que por tratarse de sustratos naturales (vegetales, animales, aguas residuales y residuos sólidos) los procesos de transformación han de ser totalmente biológicos. En una biorrefinería se emplean al mismo tiempo procesos biológicos como la fermentación, digestión anaeróbica, procesos enzimáticos, composteo, etcétera; proceso fisicoquímico/térmicos como son la licuefacción, pirólisis, gasificación, combustión, extracción por solventes, transesterificación, extracciones mecánicas, destilación; y una gran cantidad de otro tipo de procedimientos.

Las biorrefinerías pueden clasificarse por el tipo de residuos que emplean o por el producto que generan. En cuanto al primero, podemos decir que existen biorrefinerías basadas en desechos de la agricultura, cereales, aceites de semilla, de lignocelulósicos, desechos forestales, aguas residuales municipales e industriales, entre otras. Los productos son una lista extensa que puede incluir metano, hidrógeno, biocombustibles, energía, productos químicos, bioetanol, electricidad, aceites, biodiésel, así como otros materiales y formas de energía.

En el contexto actual, las biorrefinerías se colocan como una de las alternativas interesantes que pueden contribuir a reducir la dependencia de los combustibles fósiles, al mismo tiempo que se puede optimizar el uso de los recursos naturales al aprovechar los residuos de la agricultura y otros derivados que ya no son útiles en el

proceso productivo comercial. Esta lógica de aprovechamiento, a partir del reciclaje y la producción en cascada, presente en el proceso de refinación, se integra en la idea de la circularidad de la economía.

En la última década, la economía circular se ha convertido en una estrategia con amplia aceptación en países de la Unión Europea, China, Japón y Estados Unidos, impulsada por organismos internacionales como la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE), se propone romper con el paradigma de la producción lineal que implícitamente asume que los recursos y la capacidad de carga y absorción del planeta son infinitos.

Esta iniciativa de economía circular parte del principio de la escasez de materiales y del impulso hacia un esquema de desmaterialización de la economía, tiene por objetivo reducir tanto la entrada de los materiales vírgenes, como la producción de desechos, cerrando los ciclos ecológicos y económicos a partir del aprovechamiento, al máximo posible, de los materiales y la energía. La Fundación Ellen MacArthur, importante impulsora de la economía circular, la define como “un sistema industrial restaurador o regenerativo por intención [...] que se desplaza hacia el uso de energías renovables, eliminando el uso de químicos tóxicos que perjudican la reutilización y el retorno a la biosfera” (EMF, 2013:15).

El análisis de los flujos físicos proviene de la ecología industrial, un antecedente claro de la economía circular, que surge en la discusión académica y en el sector empresarial, a partir de finales de la década de 1980, cuando se difunde la experiencia de simbiosis industrial en Kalundborg, Dinamarca, y se publica el artículo de Frosch y Gallopoulos, “Industrial ecosystems”, en el *Journal American Review*. El concepto de la economía circular abarca más allá de la producción y consumo de bienes y servicios, incluye un cambio de la manera en que se concibe la sociedad misma, implica asumirse como un ecosistema más que forma parte de la naturaleza y, por tanto, conlleva a la sustitución del uso de combustibles fósiles por energías renovables, a la función de diversidad como característica de resiliencia y sistemas productivos, a la creación de modelos productivos de bajo impacto y consumo.

La producción de materiales y energía por medio de las biorrefinerías encaja perfectamente en los procedimientos de la economía circular, por tanto, es necesario considerarla como una nueva forma de producción en la lógica de los modelos de negocio actuales que se definen bajo sus principios.

Las biorrefinerías basadas en residuos podrían no sólo ayudar a los países en vías de desarrollo a orientarse a una economía circular y podrían contribuir a mejorar la salud pública y ambiental. Ello puede lograrse a partir de tecnologías avanzadas y

sustentables para la biorrefinación y hacer el cambio de un consumo de derivados del petróleo a fuentes renovables y energías alternativas.

La importancia de adoptar la economía circular y de crear biorrefinerías en los países en desarrollo, responde a un contexto actual que demanda atender a las necesidades de una creciente población que pone en riesgo los recursos naturales y las condiciones ambientales para las generaciones del presente y del futuro. En este sentido, transitar hacia una visión que permita el aprovechamiento de los recursos naturales, a partir de un uso racional que garantice su conservación, se convierte en una oportunidad para estos países, cuyo potencial y riqueza natural es abundante para atender a las necesidades de su población y resarcir las carencias y problemas de pobreza, utilizando sus recursos, aprovechando sus capacidades científicas y tecnológicas y reutilizando sus residuos de una manera racional.

En particular, América Latina (AL) tiene un gran potencial para insertarse en una política basada en la economía circular, debido a su gran diversidad biológica y abundancia en recursos naturales: 44% de la producción de cobre a nivel mundial, 49% de la plata, 65% del litio, 20% de las reservas de petróleo, 33% de las reservas de agua dulce, y 20% de los bosques nativos. La región no ha podido traducir esta riqueza en un desarrollo económico equitativo para todos sus habitantes. Por otro lado, se ha reportado que genera 160 millones de toneladas de residuos sólidos al año (no incluye aguas residuales, residuos forestales, ni industriales), con un promedio per cápita de 1.1 kg/día/habitante, del cual menos del 3% se reutiliza o recicla. Afortunadamente, en los últimos años algunos países han empezado a incrementar el reúso de materiales, por ejemplo, Argentina y Colombia superan el 10%, mientras que Bolivia y Perú no alcanzan el 3%, por su parte Ecuador ha hecho también diversos esfuerzos en el tema de reciclado.

Brasil es líder mundial en el reciclado de aluminio. Paraguay ha tenido experiencias interesantes en el reciclado de la chatarra de hierro. Costa Rica avanza en el reciclaje de residuos industriales y comercializa entre 100 y 120 toneladas de materiales semestralmente en este mercado. Nicaragua exporta un promedio anual de 40 millones de dólares en material reciclable.

Las cifras antes señaladas muestran que se ha configurado ya un mercado para el reciclaje en los países de la región y que ahora es necesario sumar una política de incentivos que apoye en la consolidación de las capacidades científicas y tecnológicas de varios de estos países como Brasil, Argentina, México, Colombia, entre otros, para que se genere la infraestructura necesaria para las biorrefinerías y se consoliden proyectos decididos que acorten la brecha tecnológica con los países del norte. Es

necesario encontrar modelos adecuados a las condiciones de América Latina y en las escalas que aporten a la sustentabilidad local, regional y planetaria.

El objetivo de este libro es presentar la situación y grado de desarrollo actual de las biorrefinerías, algunos de sus tipos y los aspectos de factibilidad técnica, económica y ambiental; además, identificar los límites y oportunidades para dicha región, describir cómo se enmarca este tipo de proyectos dentro del planteamiento de la economía circular y de la sustentabilidad, así como describir algunas experiencias concretas que muestran el avance de las investigaciones en esta materia en México.

El libro consta de 11 capítulos en los que se discuten aspectos específicos relacionados con las biorrefinerías y los planteamientos e iniciativas de la economía circular. Los capítulos fueron escritos por expertos de México, España y Portugal; están orientados para apoyar e informar tanto al estudiante de posgrado, como a los tomadores de decisiones en los ámbitos municipal, estatal y nacional.

En el primer capítulo, Carrillo y Ponce de la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Xochimilco (UAM Xochimilco), presentan un rápido recorrido del abordaje del problema ambiental a partir de la década de 1970 para centrarse en la construcción del concepto de economía circular y su relación estrecha con la bioeconomía; posteriormente focalizan el tema de las biorrefinerías como una expresión concreta de la economía circular y la bioeconomía, señalando su evolución, características y principales oportunidades dada la abundancia de biomasa y desafíos por la falta de una estrategia nacional que incentive este tipo de esquemas y por la dominancia de una plataforma productiva basada en los hidrocarburos.

Brambila, Rojas y Pérez inician su capítulo con un recuento de los múltiples problemas en la salud humana, en el aire, en los suelos y en el agua, resultado del uso intensivo del petróleo, el carbón y los derivados de la petroquímica; reflexionan sobre el proceso de transición que se vive en el siglo XXI hacia una bioeconomía, que sustituirá el petróleo y la petroquímica, y posteriormente, abordan el tema central describiendo tres características particulares de las biorrefinerías que justifican la adopción de la metodología de las opciones reales, para evaluar un proyecto de biorrefinerías, con la ventaja de que permite adecuarse permanentemente a lo largo de la vida útil del proyecto.

Noé Aguilar, de la Universidad Veracruzana, en México, centra su atención en la competitividad de las biorrefinerías en los sistemas agroindustriales. Su objetivo es analizar el potencial de diversificación y el uso de subproductos para establecer biorrefinerías que aprovechen el material residual de las agroindustrias y con ello se logre una mayor competitividad. Describe algunos sistemas agroindustriales

convencionales como el del maíz, la soya y la caña de azúcar. Concluye que existe un potencial grande en México dadas las características agroecológicas del territorio nacional. Sin embargo, la competitividad tanto de las agroindustrias como de las posibles refinerías está en función de diversos aspectos asociados tanto con características de los productores como con las condiciones socioeconómicas, técnicas y productivas de cada región específica.

Teresa López y Omar Anaya presentan una metodología basada en un enfoque sistemático; utilizando herramientas de modelado y simulación evalúan de forma integral las biorrefinerías e incorporan criterios técnicos, económicos y ambientales con el objetivo de identificar los márgenes de rentabilidad y el impacto ambiental de las mismas para apoyar la toma de decisiones en la etapa inicial del diseño de una planta de biorrefinería. Presentan el caso de la evaluación de una biorrefinería de caña de azúcar, y concluyen que el uso de biomasa en los procesos de biorrefinación es una alternativa para generar una diversidad de productos con valor agregado que contribuiría a la construcción de la bioeconomía.

Julio Sacramento y Freddy Navarro, de la Universidad de Yucatán, en México, parten del concepto de biorrefinería integrada; su objetivo es presentar el diseño de las biorrefinerías y de las herramientas que las vinculen con la sostenibilidad, incorporan en su trabajo la idea de los sistemas bioenergéticos dentro de los cuales ubican a las biorrefinerías y presentan algunas metodologías comúnmente utilizadas para evaluar y certificar estos sistemas. Exponen un caso de evaluación de la sostenibilidad en una biorrefinería que se nutre de biomasa de *jatropha curcas*, en el cual incorporan seis criterios para la valoración en dos escenarios. El primero de una biorrefinería convencional y el segundo de una integrada; se concluye que una evaluación de sostenibilidad de sistemas bioenergéticos, que incluye biorrefinerías, debe ser multidimensional para abarcar los objetivos de sostenibilidad.

Gemma Cervantes, Estephanie Solís y Sylvie Turpin presentan un ejercicio de economía circular en el estado de Guanajuato con Grupo Agroindustrial, ubicado en el municipio de Pénjamo, productor de alimentos y productos derivados de cerdo. El Grupo se encuentra en un predio de 26 hectáreas y comprende seis entidades de cuatro empresas distintas. El capítulo se avoca a la valorización de residuos para hacer una propuesta concreta de cierre de ciclo de materia en dicho sector. Presentan una extensa relación de propuestas de valoración como: la elaboración de aminoácidos con el pelo de cerdo, la fabricación de grenetina a partir de pezuñas y párpados de cerdo, la transformación en biogás y/o energía eléctrica de los excrementos de animales, la obtención de láminas y tableros utilizando el bagazo de agave, la creación de una planta de composta a partir de residuos orgánicos de invernaderos y de

mermas de semillas y alimentos. Concluyen que con las sinergias propuestas se puede minimizar la generación de residuos en el sector agroalimentario y se pueden aprovechar los residuos generados por empresas de diferentes giros agroalimentarios, lo que conlleva un beneficio ambiental y uno económico.

Aleida Azamar Alonso y Daniel Tagle se enfocan en la producción de biocombustibles basados en cereales, analizando los riesgos socioambientales que derivarían de ello. Observan la correlación de variables energéticas y alimentarias a escala internacional para conocer las implicaciones sobre el precio de los granos; de la información presentada señalan que la tendencia a incrementar la producción de biocombustibles en América Latina está presente principalmente en Argentina y Brasil, lo cual impacta en el precio de los cultivos que se utilizan, que también tienen una vocación directa o indirecta para la alimentación. Posteriormente se centran en el caso de México, y revisan el marco legal, mismo que en la letra incentiva la producción de biocombustibles, pero no así en la realidad. Finalmente, concluyen que las consecuencias de una posible producción a gran escala de biocombustibles basados en maíz, caña de azúcar, soya u otro producto, siempre impactan sobre los precios con repercusiones que ponen en riesgo la seguridad alimentaria.

Luis G. Torres, de la Unidad Profesional Interdisciplinaria de Biotecnología (Upibi-IPN), México, presenta una revisión de las biorrefinerías basadas en aguas residuales municipales e industriales, afirma que existe una lista amplia de productos que se pueden obtener a partir del cultivo de microalgas, como biomasa para alimento humano o animal, proteínas, carbohidratos lípidos y pigmentos entre otros, asimismo presentan la ventaja de mayor eficiencia productiva y de costos cuando se utilizan a escala industrial. Concluye que el cultivo de microalgas en aguas residuales permite la reducción de carbono, nitrógeno y fósforo, además de generar productos de mediano y alto valor agregado, así como energía mediante la producción de etanol o metano. Ubica a México como un país con gran potencial aprovechable en los residuos de origen vegetal y en las aguas residuales.

Eulogio Castro y sus colegas, Romero y Ruiz, de la Universidad de Jaén, España, describen los principales pretratamientos físicos, químicos y biológicos que se deben aplicar a la biomasa para la producción de azúcares fermentables para una biorrefinería.

Arturo Figueroa y sus colaboradores, Gabriel Vigueras y Maribel Hernández, presentan algunos desarrollos que pudieran aplicarse para la valorización de los residuos lignocelulósicos, a partir de sus principales moléculas: celulosa, lignina y hemicelulosa. Asimismo analizan algunos de sus usos actuales y describen los posibles usos de azúcares fermentables y otras biomoléculas con las que se obtienen químicos

de plataforma para la obtención de otros químicos que podrían llegar a ser sustitutos del petróleo.

Marcela Amaro y Diana Rivera, de la Universidad Nacional Autónoma de México, parten de la hipótesis de que el desarrollo de biorrefinerías para la producción de biocombustibles es una opción para México ya que existe el recurso de la biomasa en el país; señalan que existen límites importantes de carácter institucional y poca capacidad científica y tecnológica por el reducido número de especialistas dedicados al estudio de las biorrefinerías, y de proyectos académicos y empresariales en la materia. A partir de un estudio de caso muestran la complejidad y las principales barreras con las que se topan las iniciativas para crear refinerías. No obstante, enfatizan que existen los cimientos, principalmente en el ámbito académico, que bajo condiciones institucionales diferentes podrían propiciar el surgimiento de biorrefinerías a distintas escalas en el país.

Economía circular, bioeconomía y biorrefinerías

Graciela Carrillo González

José Ignacio Ponce Sánchez

Introducción

La economía circular y la bioeconomía son dos conceptos nuevos en la agenda internacional, y particularmente en los documentos y políticas de la Unión Europea, a partir de los cuales se busca redireccionar el modelo económico lineal que ha impactado durante décadas en la disminución de los recursos naturales y el deterioro del planeta. La economía circular propone la reducción en el uso de los recursos naturales, por medio de la utilización de los residuos que se generan en los procesos de fabricación con el fin de alcanzar la meta de residuos cero; esto es compatible con la propuesta de la bioeconomía, que se sitúa únicamente en el campo de la utilización de los recursos naturales renovables (RNR) y de los residuos orgánicos (biomasa) como insumos para generar productos y energía que sustituya a los combustibles fósiles y sus derivados que proceden de la refinación. Las biorrefinerías funcionan como el medio para procesar (refinar) esa biomasa y convertirla en diversos productos como biocombustibles, bioplásticos, electricidad y otros derivados de alto valor agregado, que contribuyan a reducir el consumo del petróleo, un recurso natural no renovable (RNNR) cuyos impactos sobre el medio ambiente son severos.

Las biorrefinerías se impulsan en respuesta a la actual problemática ambiental y económica que deriva de la gran dependencia que se tiene de los combustibles fósiles para prácticamente toda actividad humana. Una de las principales motivaciones para que operen las biorrefinerías, es la preocupación por dar respuesta a un posible escenario de escases de combustibles y deterioro acelerado del ambiente, lo que ha llevado a la investigación científica hacia el desarrollo de procesos innovadores que permitan el aprovechamiento de la biomasa renovable y aquella derivada de residuos,

así como a la propuesta de la sustitución del combustible fósil como insumo básico de la industria moderna para la producción de bienes y servicios, y de otro tipo de combustibles y energías alternativas.

El contexto económico ha operado a favor de la búsqueda de alternativas al problema ambiental en la última década, ya que a partir de 2008 la crisis económica mundial se sumó a la preocupación de los efectos generados por el cambio climático y, con ello, a la necesidad de encontrar nuevas opciones para los flujos internacionales de capital. En ese sentido, las empresas fueron inducidas, por políticas impulsadas por la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) y la Organización de las Naciones Unidas (ONU), a la búsqueda de áreas de oportunidad en el reciclaje de los subproductos y en el desarrollo de productos derivados de la refinación de biomasa. Asimismo, el desarrollo de innovaciones y tecnologías limpias se posicionó como una prioridad para atender a los problemas de contaminación, a la reducción en el uso de los recursos naturales y a la minimización de los residuos.

En atención a lo anterior, se han dado una adaptación de las instituciones en los países, que incluye modificaciones a la legislación actual y la creación de nuevas leyes, regulaciones y políticas para la transición hacia otro tipo de tecnologías, la gestión y flujo de materias primas secundarias (las que derivan de los residuos), y la comercialización transfronteriza de productos derivados del reciclaje y del uso de biomasa. En realidad se vive un cambio de paradigma impulsado por la economía circular y la bioeconomía, que redirecciona las instituciones, las inversiones, los mercados y promueve el surgimiento de organismos públicos, privados y civiles que impulsan el cambio hacia un modelo más compatible con el ambiente, que propone el aprovechamiento de la biomasa y la recuperación de subproductos para la generación de energías alternativas, a partir de la innovación y el desarrollo tecnológico, donde las biorrefinerías se posicionan como el centro de la manufactura verde.

En este capítulo se propone explicar el contexto y los planteamientos bajo los cuales surgen, y se insertan como componentes clave de un nuevo paradigma, la economía circular y la bioeconomía, y fundamentar cómo la construcción de biorrefinerías en el mundo, a pesar de las barreras que enfrentan, ha ganado terreno y muestra un potencial importante para el modelo futuro. Se presentan tres apartados: en el primero se explica el contexto que da lugar al surgimiento de la economía circular y algunos antecedentes que sientan las bases y los elementos centrales para la construcción del concepto; en el segundo se señala cómo se vinculan la economía circular y la bioeconomía, ambos elementos clave para la construcción

de un nuevo paradigma; en el tercero se define y explica el funcionamiento de las biorrefinerías, su potencial y sus posibilidades económicas y tecnológicas; finalmente, se presentan algunos casos de biorrefinerías en el mundo, actualmente en funcionamiento.

Antecedentes de la economía circular

La economía circular es un concepto de reciente construcción que impulsa el aprovechamiento eficiente de los RNR y de los subproductos que derivan de los procesos productivos, su objetivo es modificar el modelo productivo actual, altamente dependiente de los RNNR. Esta propuesta no surge como algo casuístico o de coyuntura, es resultado de las experiencias de un proceso social que ha reparado en el impacto que genera la actividad humana y el modelo productivo actual.

Las primeras alertas de los problemas ambientales se discutieron a partir de la publicación, en 1962, de *Silent Spring*, de Rachel Carson, en la cual se denuncia el daño que causaba en el ambiente, en las aves y en la salud humana, el uso de productos químicos como el DDT, mismo que se aplicaba masivamente en los campos agrícolas de Estados Unidos (Carson, 2005). En los años siguientes la reflexión sobre el problema ambiental se centró en la sobreexplotación y escasez de los recursos naturales y minerales, debido a un modelo productivo que debía atender a una tasa de crecimiento exponencial de la población. A petición del Club de Roma¹ se pone en marcha el *Proyecto sobre el dilema de la humanidad* del cual se responsabilizó al doctor Dennis Meadows, experto en informática del Institute Technology Massachusetts (MIT), dicho proyecto concluyó con la presentación del documento *The Limits to Growth*, en el que se propone como alternativa llevar la tasa de crecimiento del producto interno bruto (PIB) mundial al nivel cero.

Duros cuestionamientos se desataron a partir de la postura sobre el crecimiento cero, en tanto que el debate académico giraba sobre ¿cuáles eran las causas reales

¹ En 1968 se reunieron en Roma 35 personalidades de 30 países, entre ellos científicos, investigadores y gente de la política con un rasgo en común: su preocupación por los cambios medioambientales que afectaban a la sociedad y al planeta. Así se funda el “Club de Roma”, precursor del Informe Meadows. Se formalizan como asociación dos años más tarde, con el objetivo claro de investigar sobre la problemática ambiental e interrelacionar los distintos aspectos demográficos, energéticos y alimentarios, entre otros, con los aspectos políticos pensando en los próximos 50 años.

que llevaban a la fuerte presión sobre los recursos naturales? Entre los argumentos señalados destacaron dos posturas: Paul Erlich planteaba como la principal razón el crecimiento exponencial de la población, ya que dicha tendencia implicaba una creciente demanda de todo tipo de productos y servicios; por otro lado, Barry Commoner (1973) en su principal obra *El círculo que se cierra: naturaleza y tecnología*, argumentaba que las principales causas de la degradación eran no sólo la superpoblación, sino también el aumento de la riqueza y los avances tecnológicos, toda vez que el desarrollo tecnológico implicaba un nuevo tipo de consumo con un mayor uso de recursos y energía.²

Hacia finales de la década de 1980 se buscó romper con tales debates y establecer una idea de armonía entre el crecimiento económico y el uso de los recursos naturales, es entonces cuando se difunde el concepto de *desarrollo sostenible* a partir del documento *Our Common Future*, presentado en 1987 por la ministra H. Brundtland a solicitud de la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo de las Naciones Unidas (ONU, 1987). En este informe se reflexiona sobre un escenario donde los mercados internacionales mostraban fallos, expresados tanto en una crisis financiera mundial como en la incapacidad para internalizar los costos ambientales. Sin embargo, y pese a la situación, enfatiza en que el desarrollo y el cuidado del medio ambiente son compatibles, por tanto, es necesario establecer tasas de crecimiento anual para los países en desarrollo, por encima de las tasas de crecimiento de los países desarrollados, lo cual permitiría una distribución más equitativa del ingreso y con ello un desarrollo acompañado del cuidado del medio ambiente.

A partir de ese momento, la posición oficial internacional sería impulsar el crecimiento como única salida para conservar el ambiente y los recursos naturales, pese a que la realidad, documentada por diversos autores de la ecología política, mostraba cada vez más conflictos ambientales y sociales en la disputa por los recursos naturales (Martínez, 2009).

La década de 1990 enfocó el problema ambiental en el cambio climático, resaltando las repercusiones a nivel planetario de las acciones locales tanto en el consumo

² En la conferencia “Ecology and social action”, impartida en marzo de 1973 en la Universidad de Berkeley, Barry Commoner señaló: “Cuando investigamos cualquier problema ambiental hasta sus orígenes, se revela una verdad ineludible: que la causa fundamental de la crisis [ecológica] no se encuentra en cómo los hombres interactúan con la naturaleza, sino en la forma en que interactúan entre sí. Que, para resolver la crisis medioambiental, hay que resolver los problemas de la pobreza, la injusticia racial y la guerra”.

como en la producción, ejercidos por una fuerte presión sobre los mercados para reorientar su oferta (Cumbre de Río de Janeiro, 1992). La crisis económica y financiera, así como el agotamiento del modelo tecnológico dependiente de los recursos fósiles que ahora mostraban una tendencia a la disminución de este recurso, dio paso a nuevas tecnologías “verdes” que apuntaban hacia la construcción de un nuevo paradigma tecnológico, señalado por Carlota Pérez en su artículo “Dinamismo tecnológico e inclusión social en América Latina: una estrategia de desarrollo productivo basada en los recursos naturales” (Pérez, 2010).

La construcción del nuevo paradigma demandó entonces un cambio institucional en muchos sentidos, los organismos internacionales iniciaron la difusión del enfoque del crecimiento verde (OCDE, 2009) y de la economía verde (PNUMA, 2009).³ La competitividad entre las empresas incorporó como un elemento fundamental para su permanencia en los mercados internacionales la responsabilidad social empresarial, la política ambiental corporativa y los sistemas de gestión ambiental, así como las ecoeficiencias en sus procesos, las ecoinnovaciones en sus productos y el reciclaje (Porter y Linder, 1995; Fussler y James, 1999; WBCSD, 2000).

En ese marco de propuestas de carácter institucional, con el crecimiento verde y la economía verde, los organismos internacionales trataron de establecer una tendencia sobre las decisiones de política económica y ambiental de los diferentes países hacia la bioeconomía, al mismo tiempo que la Unión Europea impulsó, a partir de su estrategia económica al 2020, la economía circular.

El documento *The Bioeconomy to 2030. Designing a policy agenda*, publicado por la OCDE (2009), la define como una estrategia que, sobre la base del conocimiento científico de la biotecnología, supone el aprovechamiento de los RNR, de todo tipo de biomasa y de la energía para dar un giro al modelo industrial, recuperar las tasas de crecimiento y dar un impulso hacia otro tipo de inversiones que motiven el desarrollo de tecnologías y productos verdes, la creación de nuevas carreras y empleos en atención a minimizar los efectos nocivos sobre el medio ambiente, la racionalización el uso de los recursos, la creación de nuevos mercados verdes y con ello responder a sus demandas (OCDE, 2009).

³ El concepto de crecimiento verde deriva de una propuesta de la OCDE que pretende impulsar una reorientación de las inversiones hacia tecnologías e iniciativas vinculadas con el tema del medio ambiente y con ello inducir hacia un comportamiento positivo de las variables macroeconómicas. En tanto que la economía verde surge como iniciativa de la ONU para crear un sistema cuya producción, distribución y consumo integren el cuidado del ambiente y no se ponga en riesgo a las generaciones futuras.

El debate teórico que sustentó la postura oficial en la política pública se fincó, básicamente, en la idea de atribuir a los bienes ambientales un carácter de mercancías,⁴ adjudicando un precio a los recursos naturales y promoviendo las inversiones en este sector, lo que refuerza una posición duramente criticada por su visión lineal que supone una entrada infinita de materias primas y en ese mismo sentido una salida infinita de residuos.

Claramente la postura de la economía lineal no se pudo mantener en la versión heterodoxa de la economía ecológica⁵ y en la propuesta actual de la economía circular, la cual mantiene la idea de “inversiones verdes”, uso de la biomasa, desarrollo de tecnologías limpias y ecoproductos, pero enfatiza en la necesidad de recuperar los residuos y reutilizarlos, reducir el uso de los RNNR, utilizar los RNR a un ritmo que permita su tasa de recuperación y minimizar el volumen de los residuos que ya no es posible aprovechar, a una tasa por debajo de la capacidad de asimilación de la naturaleza.

Estas propuestas derivadas de los planteamientos de la economía ecológica,⁶ sustentan hoy la lógica del reciclaje y la recuperación de los subproductos que derivan de los procesos industriales para que se utilicen como materia prima de otros procesos, y que se ha sistematizado en la estrategia de la ecología industrial (Carrillo, 2014) con experiencias tanto en el ámbito local con la simbiosis industrial, como en el ámbito regional y, en menor medida, en el nacional, a partir de políticas de economía circular (EC).

⁴ En este sentido, se alinean a los principios de la economía ambiental que impulsa el abordaje y tratamiento del medio ambiente en el marco de los derechos de propiedad y el mercado.

⁵ La economía ecológica tiene como principio la no conmensurabilidad y la no sustituibilidad de los recursos naturales, por tanto, no se pueden vender en el mercado y, por el contrario, sugiere que se les debe dar un valor en función de la relevancia que tiene su permanencia en los ecosistemas.

⁶ Autores como Constanza, Boulding, Ayres, entre otros, cuestionan sobre la visión cerrada y lineal de la economía, donde se percibe la entrada (*inputs*) y la salida (*outputs*) y residuos como algo infinito y el ecosistema de mercado como algo aislado, en oposición a ello proponen una visión de economía abierta a la entrada de energía y cerrada a la entrada y salida de biomasa bajo una perspectiva planetaria donde el ecosistema del mercado es sólo un ecosistema más entre miles de ecosistemas en la naturaleza. Esta diferencia de posturas se construye en dos marcos analíticos, la economía ambiental con R. Coase a principios de la década de 1960, frente a la propuesta de la economía ecológica en la de 1980, con autores como Constanza, Naredo, Martínez Alier, y antecedentes de los principios con G. Roegen.

Los críticos de la economía circular señalan que debido a la ley de la entropía⁷ y a la paradoja de Jevons,⁸ los límites de la economía circular están precisamente en los pocos volúmenes de subproductos que se pueden reciclar, como señala Martínez Alier (2016):

En conjunto, lo que se recicla actualmente en el mundo no es más de 6% de los materiales extraídos. Estamos lejísimos de una economía circular, una economía que funcionara exclusivamente con energías renovables también sería entrópica, sin duda, pero dependería del flujo continuo de energía solar.

Bioeconomía y economía circular

La bioeconomía se inserta de manera natural en las propuestas de la economía circular, se difunde a partir del documento de la OCDE de 2009, aunque, como señalan Brambila, Martínez, Rojas y Pérez (2013), ya había sido abordada desde la década de 1970 por Colin (1976), desde la perspectiva de la explotación económica de los recursos renovables, y por Becker (1976) para explicar los comportamientos sociales en términos económicos. Para Hardy (2002), la bioeconomía surge para sustituir la economía basada en petróleo por una economía dirigida hacia la biología: “por lo que esta ciencia adquiere un significado más amplio y completo no centrándose exclusivamente en la optimización de los recursos naturales”.

La producción bibliográfica sobre el tema resurge en el año 2000, cuando aparece el artículo “The New Bioeconomy: Industrial and Environmental Biotechnology in Developing Countries” (Calestous y Konde, 2001), ese mismo año se llevó a cabo la Conferencia para el Comercio y Desarrollo de las Naciones Unidas (UNCTAD) y cinco años más tarde la OCDE publica el libro *The bioeconomy to 2030: Designing a policy agenda* (2009), todo ello apuntó hacia un nuevo modelo productivo basado en el uso de la biomasa. La OCDE centra su propuesta de bioeconomía en la utilización sostenible de la biomasa, incluidos los residuos orgánicos, que se propone sean utilizados como un sustituto de los combustibles fósiles y como un recurso basado en organismos vivos agregando valor a partir del uso de la biotecnología.

⁷ En 1856, Rudolf Clausius definió la entropía como la progresiva incapacidad de los sistemas para regresar a su punto de partida. Podemos mezclar fácilmente pintura blanca con pintura negra, pero resulta muy difícil, por razones entrópicas, separar el blanco del negro en la pintura gris.

⁸ La mayor eficiencia abarata el costo y, por tanto, puede llevar a un mayor uso.

El informe *Strategy for a sustainable bioeconomy to ensure smart green growth in Europe* (DG Research, 2006), publicado por la Unión Europea, establece también una definición de bioeconomía que empata con la de economía circular al señalar que así como los ecosistemas naturales utilizan insumos naturales, gastan cantidades mínimas de energía y no producen residuos, ya que todos los materiales desechados por un proceso son insumos para otro proceso y se reutilizan en el ecosistema, la bioeconomía cubre todos los sistemas de producción que involucran procesos bioquímicos y biofísicos e incluye las tecnologías relacionadas para hacer productos útiles de manera eficiente con el fin de conservar el medio ambiente, proteger la biodiversidad y aprovechar los materiales que la economía actual considera como desechos.

La bioeconomía se apoya en tres principios: *a)* conocimiento biotecnológico para el desarrollo de nuevos procesos y productos; *b)* biomasa renovable y bioprocesos eficientes para lograr una producción sostenible; *c)* la integración entre el conocimiento y las aplicaciones, basado en el conocimiento genérico y cadenas de valor añadido que cruzan las aplicaciones. Hay tres principales campos de aplicación para biotecnología: producción primaria, salud e industria (OCDE, 2009).

Dentro del contexto de la economía del conocimiento, en 2002 la Comisión Europea (CE) declaró que las ciencias de la vida y la biotecnología eran lo más prometedor de la frontera tecnológica con una alta capacidad de contribuir al logro de los objetivos del milenio. A continuación, la bioeconomía se puso en marcha de manera formal en una conferencia internacional en 2005, seguida de otra en 2007, donde se describen las perspectivas sobre la bioeconomía europea para los próximos 20 años. Estos dos hechos ayudaron a establecer como tema prioritario de discusión a la bioeconomía en los círculos políticos y académicos internacionales.

La bioeconomía se ha planteado, desde la OCDE, como parte de una agenda de política, desde esta perspectiva se centra en la utilización sostenible de la biomasa, incluidos los residuos orgánicos (en sentido amplio), dado que son utilizados como sustituto de los combustibles fósiles y como un recurso basado en organismos vivos cuyo valor económico debe ser extraído y transformado por medio del conocimiento de ciencias como la bio y la nano tecnologías.

Por otra parte, desde la economía circular, en coincidencia con la estrategia de la bioeconomía, se propone: proveer los bienes y servicios a partir del uso sustentable de los RNR; hacer negocios enfocándose a la reutilización de materiales y extensión de vida de los productos; y una nueva forma de pensar y rediseñar los sistemas económicos aprovechando la innovación y la creatividad para generar una economía restauradora y sustentable. El enfoque de una economía circular fue teorizado por Walter R. Stahel en 1976, quien se basó en el concepto de que un ciclo

económico puede incrementar la creación de empleo, la competitividad, y reducir el uso de recursos y la generación de desperdicios, incluyendo también principios relacionados con la durabilidad de los productos y la venta de servicios en lugar de productos (Tollin, 2016).

La economía circular se enmarca en una línea de pensamiento que impulsan los organismos internacionales y es adoptada con mucho entusiasmo por diversos países y regiones como la Unión Europea, Japón, China y Estados Unidos. Se plantea como un quiebre de la visión lineal del modelo de producción-consumo, que hoy es vulnerable frente al agotamiento de los recursos naturales y el consecuente comportamiento errático de los precios de dichos recursos en los mercados internacionales, lo cual incrementa los niveles de riesgo para las empresas y las posibilidades de estancamiento de la demanda.

Con la intención de circularidad de la economía se pretende construir una política industrial restauradora que proponga el cierre de ciclos del flujo de materiales en la economía, llevando a que se diseñen, reutilicen, desmonten, renueven y reciclen productos en cantidades considerables para garantizar un alargamiento de su ciclo de vida y la reducción de la tasa de extracción de insumos. Esta visión da un peso relevante a la medición de flujos de biomasa y energía, al proponer el reúso y la reducción del consumo de recursos, y considerar la reducción de los volúmenes de residuos que se generan en el proceso productivo, un elemento esencial de esta visión es comprender la finitud de los recursos y los límites del planeta para la asimilación de residuos (Carpintero, 2006).

En décadas pasadas no representó un problema la conservación y el uso eficiente de los recursos, los bajos precios y la facilidad de acceder a ellos no representaban un freno para el crecimiento económico. Sin embargo, en la actualidad el sistema productivo enfrenta dificultades ante el crecimiento de la población y los mercados, y ante las regulaciones que hoy se imponen en los países con el objetivo de reducir las distorsiones que derivan del modelo lineal como: los grandes volúmenes de residuos que se pierden en la cadena de producción; el destino que se da a los productos al final de su vida útil; el uso intensivo y pérdida de energía en los procesos productivos; la erosión de los servicios ecosistémicos. A ello se suman factores que propician desbalances en el sistema como la tendencia demográfica creciente, la necesidad cada vez mayor de infraestructura, los riesgos políticos que desencadenan en crisis económicas y sociales, la globalización de los mercados y el cambio climático.

La economía circular se propone como un enfoque sistémico con cinco principios simples: *a)* los residuos no existen si esto se considera en el diseño de los productos; *b)* la resiliencia se construye a partir de la diversidad; *c)* la dependencia de

energía es de fuentes renovables; d) prevalece un pensamiento sistémico; e) los residuos siempre son un tipo de alimento (MacArthur, 2013). Una particularidad de la EC es la recuperación de materiales para su reutilización en cascada, tal y como se genera en el sistema natural donde los “desechos” son nutrientes biológicos con diferentes aplicaciones que se retroalimentan hasta finalmente reintroducirse en la biósfera.

Algunos países como Alemania, Japón y China impulsan una política de economía circular que involucra planes en tres niveles básicos de acción: el micro-nivel o nivel de la firma individual en empresas manufactureras y agrícolas, donde se busca mayor eficiencia implementando la producción más limpia a partir de las “tres eres” (*reducir* consumo de recursos, emisiones de polución y generación de residuos; *reutilizar* los recursos; *reciclar* los subproductos), el desarrollo de productos ecológicos y el diseño de procesos ecoeficientes. Las biorrefinerías son plantas de procesamiento de biomasa que, al ser compatibles con la economía circular, se ubican en este nivel de acción.

El segundo nivel o meso-nivel se asocia con el reciclaje de recursos dentro de los parques ecoindustriales donde los recursos circulan dentro del sistema de producción local, en sistemas agroecológicos y en mercados de residuos como las bolsas de subproductos. En este nivel la simbiosis industrial ha arrojado ya diversas experiencias en el mundo, cuando una biorrefinería se instala dentro de un parque o de un corredor industrial fácilmente puede generar sinergias con procesos de otras plantas, por lo que también sería compatible en el nivel meso.

El tercer nivel o macro-nivel, es integrar diferentes sistemas de producción y consumo en una región; así, los recursos circulan entre las industrias y los sistemas urbanos. Este nivel requiere el desarrollo municipal o regional de sistemas de recolección, almacenaje, procesado y distribución, por producto; China ha experimentado este nivel en un proyecto piloto en tres ciudades del país (Su, Heshmati, Geng y Yu, 2013). Finalmente, si se considera a las biorrefinerías como parte de una estrategia regional, colocándola en la etapa de procesado dentro de la cadena de valor, éstas también formarán parte del nivel macro. La apuesta de los impulsores de la economía circular es que se logre abordar de manera simultánea los tres niveles y, con ello, se aporte al desarrollo económico con el surgimiento de empresas de producción más limpia, la creación de empleos, la recuperación de recursos y la reducción de impactos ambientales.

Ya se visualiza un grado de avance en la implementación de la economía circular, en China se ha convertido en una política de Estado para superar el modelo de consumo actual que se inserta en la cultura del país. Se propone avanzar hacia una política de cierre de ciclos impulsada desde las políticas del gobierno para promover

la mayor eficiencia en el uso de los recursos y de los residuos agrícolas, urbanos e industriales (Ghisellini *et al.*, 2015). La Unión Europea también avanza con la propuesta del paquete de economía circular; éste consiste en un plan de acción concreto y ambicioso, con medidas que abarcan todo el ciclo: desde la producción y el consumo hasta la gestión de residuos y el mercado de materias primas secundarias, para ello se revisa y reformula la legislación con el fin de generar incentivos hacia esa meta, resaltando la posibilidad de un crecimiento económico sustentable y ventajas adicionales como la creación de nuevos empleos.

La puesta en marcha de la economía circular en otros países de Europa, Norteamérica e incluso Japón y Australia, se impulsa de manera distinta, básicamente a partir de experiencias locales de ecología industrial desde parques y corredores industriales; aun cuando las experiencias se han incrementado en las últimas décadas y los sistemas de gestión de residuos han avanzado, las experiencias de implementación de una política pública nacional de economía circular es prácticamente inexistente en el mundo.

No obstante, existe un avance paulatino y firme de las empresas, de productores y de consumidores que en el nivel micro contribuyen a la economía circular con la adopción de patrones de producción más limpios, el uso de productos y tecnologías verdes, un aumento de la responsabilidad social, una mayor conciencia sobre la necesidad de cuidar el ambiente y los recursos naturales. Algunas empresas, principalmente transnacionales, han instalado y operan, aunque a pequeña escala, biorrefinerías. Lo que se observa hasta hoy es que la transición hacia la economía circular se da de manera paulatina a distintos niveles y con la participación de diversos actores de la sociedad, a partir de un acoplamiento lento de los factores económicos y tecnológicos que privan en el modelo productivo actual. Esto significa que transitar de un modelo basado en el uso de RNNR y de patrones de producción lineales requiere de más de una generación.

Potencial de las biorrefinerías

De acuerdo con los principios de la bioeconomía y de la economía circular, el aprovechamiento de la biomasa y de los residuos orgánicos de los procesos productivos resulta la mejor alternativa tanto para reducir la dependencia de los hidrocarburos como para dar paso a la transición hacia un paradigma ambiental. Dicha transición se presenta aprovechando parte de las viejas tecnologías en combinación con las más novedosas y con el paulatino cambio de los patrones de consumo frente a la oferta de

nuevos productos que satisfacen necesidades ya reconocidas y otras nuevas, en todo este proceso es necesario instalar modificaciones a los procesos productivos, que al incorporar los criterios ambientales las podemos definir como ecoeficiencias y al hacer transformaciones más radicales se enmarcan en estrategias como la producción más limpia, la simbiosis industrial o el análisis de ciclo de vida, el funcionamiento de biorrefinerías, las cuales se encuentran fuertemente ligadas a esta tendencia.

Las biorrefinerías forman parte de este proceso de transición donde el insumo clave de todo producto generado es algún tipo de biomasa, se componen de una variedad de estructuras productivas integradas que optimizan el procesamiento de los insumos utilizados. Una biorrefinería utiliza procesos de refinación básicos, similares a los de una refinería convencional; sin embargo, contrario a ésta rompe con la dependencia del petróleo y opera con mayor eficiencia al utilizar fuentes renovables de energía que minimizan su impacto a la atmósfera.

Una biorrefinería se puede definir como una instalación o planta industrial donde se generan productos químicos, biocombustibles y bioenergía de uso comercial a partir de distintos tipos de biomasa, utilizando diversas tecnologías y procesos biológicos, químicos y termoquímicos. También se ha definido como “la combinación óptima de procesos biológicos, termoquímicos y químicos para la obtención de una variada gama de productos, que posibilita el empleo de numerosas materias primas gracias a las sinergias establecidas entre las tecnologías” (Bioenarea, 2012:4).

En este sentido, las biorrefinerías, en el micro-nivel, son el espacio físico donde se aprovechan todos los componentes de la biomasa⁹ y también se convierte en el lugar donde se puede concretar el intercambio de subproductos entre plantas industriales, como lo propone la ecología industrial a nivel meso. El origen de la materia a procesar está en la madera, los cultivos energéticos, los subproductos industriales, residuos agrícolas, forestales, industriales y domésticos (orgánicos). Los productos que se pueden obtener de una biorrefinería son: productos energéticos como los biocombustibles líquidos, sólidos y gaseosos; y productos de base biológica como productos químicos; polímeros y resinas; biomateriales; alimento para animales y fertilizantes.

En particular, la producción de biocombustibles determina la clasificación de las biorrefinerías en primera, segunda y tercera generación.

⁹ Bioenarea, 2012 señala que la biomasa en general se compone de 95% de carbohidratos, lignina, grasas y proteínas y 5% de vitaminas, colorantes, aromatizantes y otras moléculas, su composición química es bastante parecida a la del petróleo y por ello puede procesarse de manera similar.

Se denominan combustibles de primera generación a aquellos que son elaborados a partir de cultivos de interés alimentario (plantas ricas en almidón o cultivos oleícolas), mientras que los biocombustibles de segunda generación utilizan la biomasa no empleada con fines alimentarios, como paja de cereal y madera (material lignocelulósico); y una tercera generación a base de algas y microalgas. Mientras que la tecnología de la primera categoría está muy desarrollada, la producción de combustibles de segunda generación está en fase de demostración dada la complejidad estructural de la materia lignocelulósica y la escasa viabilidad económica actual de esta tecnología (Bioenarea, 2012:6).

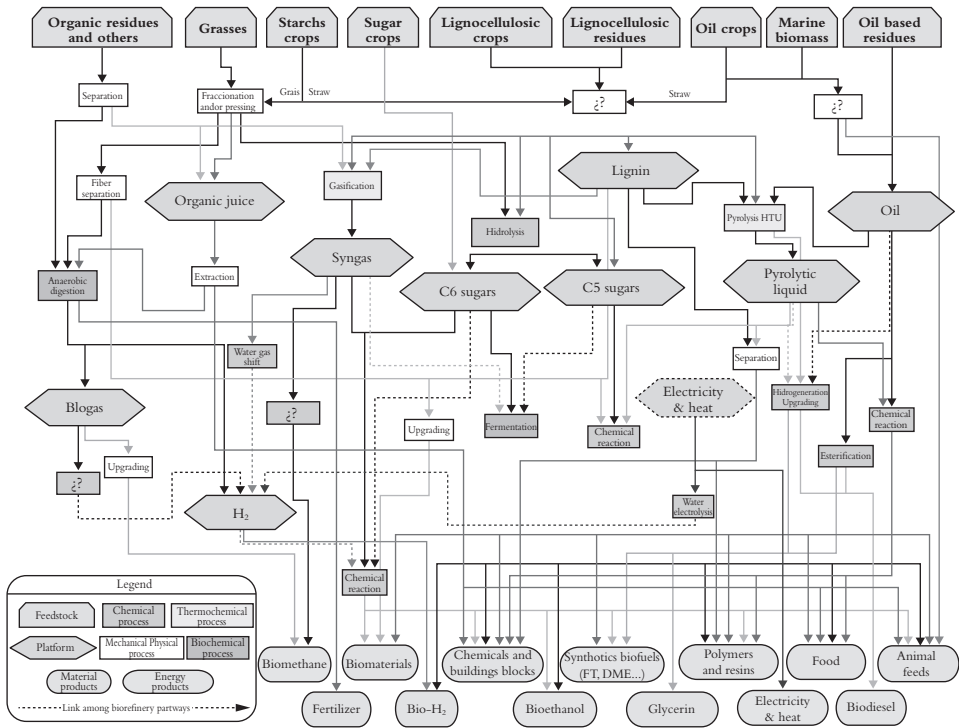
No obstante, para 2018 esto continúa en desarrollo y la segunda generación avanza y se comercializa en Europa, Estados Unidos y Brasil.

Las tecnologías que se utilizan varían en función del proceso empleado y el producto que se pretende obtener, de manera sintética se pueden señalar: los procesos termoquímicos como la gasificación y la pirólisis a partir de los cuales se obtienen combustibles o energía eléctrica; los procesos bioquímicos como la fermentación y la digestión anaerobia para producir bioetanol, gas metano y diversos ácidos; los procesos químicos como la hidrólisis y la transesterificación para la obtención de diversos productos químicos; y los procesos mecánicos. En el siguiente gráfico se observan las rutas que definen, en función del tipo de proceso y los productos a generar.

De acuerdo con el tipo de biomasa que utilizan y los productos que generan las biorrefinerías se clasifican en:

- *Biorrefinerías verdes*. Utilizan sistemas sustentables y biomasa húmeda que no es de prioridad alimentaria y proviene de pasturas y cultivos como alfalfa y soya con un alto contenido en fibras y nutrientes, así como la papa, la yuca, la remolacha azucarera y la caña de azúcar, esto se realiza con base en un rápido procesamiento primario.
- *Biorrefinerías de cultivo completo (cereales)*. Utilizan molienda seca o húmeda de granos para fabricar etanol, almidón, glucosamina, polihidroxitirato, almidón acetilado, carboximetilado, bioplásticos adhesivos, aglutinantes, cementos, etcétera. Utilizan materias primas con alto contenido en almidón como el maíz, la cebada y el trigo. Generan subproductos que pueden ser aprovechados por sus características alimenticias y como complemento alimenticio para el ganado.
- *Biorrefinerías de insumos lignocelulósicos*. Procesa materias primas ricas en celulosa, hemicelulosa y lignina para generar biomateriales, compuestos químicos

Diagrama 1. Procesos y productos de la biorrefinación



Fuente: Bioarena (2012:9).

cos, biocombustibles y energía. Las principales barreras que dificultan este tipo de biorrefinerías son fundamentalmente tecnológicas, sobre todo por el fraccionamiento de los componentes de la biomasa y el pretratamiento necesario para el aprovechamiento de la lignina y celulosa.

- *Biorrefinerías de semillas oleaginosas.* Estas instalaciones se corresponden con las plantas de biodiésel que utilizan como materias primas cultivos con alto contenido en aceite como la colza, girasol y soja. Los coproductos que se obtienen son la glicerina y otros componentes con alto contenido en proteína para fines alimentarios.
- *Biorrefinerías syngas.* Generan gas de síntesis al someter a temperaturas extremas la biomasa en presencia de oxígeno (mezcla monóxido o dióxido de carbono con hidrógeno) y posteriormente limpiar el gas de síntesis para producir alcoholes inferiores y combustibles (Salazar y Cárdenas, 2013).

En el contexto económico, por el lado de la demanda, el mercado se transforma paulatinamente y el consumo de productos ecológicos o bioproductos es cada vez mayor; pese a que las escalas de producción aún no permiten ofrecer precios más bajos, el componente de educación ambiental y la información que se difunde sobre los conflictos ambientales y el deterioro de los recursos sensibilizan a más personas, dispuestas a modificar sus hábitos de consumo.

Por el lado de la oferta existe básicamente una restricción de costos, ya que la infraestructura, la formación del capital humano, la cadena de suministro, los insumos, los proveedores, etcétera, operan sobre una plataforma basada en los hidrocarburos y ello hace imposible una transición acelerada. Sin embargo, algunos gobiernos y empresas grandes ya vislumbran un escenario futuro donde el abasto y el precio de los hidrocarburos puede llegar a representar un problema por escasez, ello los ha llevado a impulsar la investigación en el área de bioeconomía y, en particular, en el tema de biorrefinerías.

Actualmente muchas universidades y centro de investigación en diferentes países trabajan en este tema; por otro lado, países como Alemania, Suecia, Finlandia, Canadá, Japón, Brasil, Argentina, entre otros, ya tienen instaladas biorrefinerías de primera y segunda generación que se alimentan con diferentes tipos de biomasa, pese a que aún compiten, en algunos casos, con la producción de alimentos, de acuerdo con sus características y entorno.

El reporte “El futuro de las biorrefinerías industriales”, del Foro Económico Mundial, señala que las biorrefinerías tienen un rol destacable en el combate al cambio climático, este reporte realizado en conjunto con Royal DSM, Novozymes, DuPont y Braskem, explica que la industria de las biorrefinerías puede fungir como suplemento para la demanda de la energía sustentable y química, añadiendo seguridad energética. Sin embargo, se reconoce que existen una serie de obstáculos que se interponen en el camino para que las biorrefinerías puedan alcanzar su potencial económico (Alto Nivel, 2010).

En cuanto a los aspectos tecnológicos, existe aún una barrera importante para el tratamiento en biorrefinerías de segunda generación, dado que en éstas hay heterogeneidad de la biomasa y ello dificulta que un solo tipo de pretratamiento sea válido para toda la biomasa. No obstante, se tiene clara la importancia de desarrollar este tipo de biorrefinerías ya que en este caso se reduce una parte importante de la competencia por recursos (tierra, agua, energía) para la producción de alimentos.

También se suma el aspecto institucional del cual dependen los ajustes a las regulaciones, la disponibilidad de recursos financieros y de otro tipo para la puesta en marcha de instalaciones de biorrefinerías, ya que ello sólo se justifica y está

supeditado a alcanzar un aprovechamiento eficiente de la biomasa para que se logre mejorar la situación medioambiental y no afecte la seguridad alimentaria, tal es el caso de empresas de capital de riesgo en Estados Unidos, que han decidido no apoyar la producción de etanol que proceda del cultivo del maíz e incentivar las inversiones en la producción a partir de algas y residuos agrícolas, forestales o domésticos.

La crisis petrolera y los acuerdos internacionales sobre medio ambiente, en particular todo lo que deriva del Protocolo de Kioto, han motivado a Estados Unidos, Japón, China y varios países de Europa a tomar medidas de carácter regulatorio, institucional, financiero y tecnológico para impulsar acciones específicas como las biorrefinerías, a favor de la bioeconomía. Estos países ya incorporan en sus estrategias y programas el desarrollo de una industria basada en la biomasa. Para ello el primer paso ha sido la arquitectura de un marco legal y la creación de instancias que dirijan el desarrollo en el sentido deseado, así como la asignación de fondos y políticas de apoyo a la investigación y desarrollo (I+D) para la innovación (Sacramento *et al.*, 2010).

En América Latina, Brasil es el país con la plataforma tecnológica más favorable para establecer biorrefinerías dada su experiencia en la producción de combustible a partir de la caña de azúcar desde hace más de cuatro décadas (Moreira y Goldemberg, 1999). Actualmente existen varios casos de plantas de biocombustible a partir de biomasa en el mundo, también hay varios casos de biorrefinerías experimentales de segunda generación, que se citan en el artículo de Sacramento *et al.* (2010), donde se señala que una de las plantas de demostración más exitosa es la biorrefinería de Islandia, que produce etanol lignocelulósico.

En México se cuenta con un potencial importante que se sustenta en las reservas de biomasa del país y en el número de investigadores y proyectos científicos que se desarrollan en el ámbito de la bioeconomía; sin embargo, no existe una estrategia nacional que apoye las inversiones y la participación de los empresarios en el desarrollo de una política de bioeconomía que dé prioridad al desarrollo de biorrefinerías.

En el ámbito internacional se pusieron en marcha procesos industriales en biorrefinerías, muchas de éstas enfocadas a la fabricación de biocombustibles de segunda y tercera generación, así como de productos derivados. En el Cuadro 1 se presentan las más representativas en términos de tamaño o capacidad de producción, así como de su principal fuente de biomasa.

Si bien en el Cuadro 1 se presentó información de las plantas de biorrefinería en todo el mundo, se debe recalcar que dada la información disponible solamente se presentaron biorrefinerías que se encuentran en una etapa de producción industrial y que ya están en pleno funcionamiento en Europa, Estados Unidos y Brasil,

Cuadro 1. Biorrefinerías en el mundo

NOMBRE DEL PROYECTO	LOCALIZACIÓN	FUENTE DE BIOMASA	PRODUCTO	PRODUCCIÓN (TON/AÑO)	FUENTE
Dupont	Nevada, Iowa, Estados Unidos	Rastrojo de maíz	Ethanol y biogás	90 000	[http://www.dupont.com/]
Abengoa Bioenergy Biomass of Kansas	Hugoton, Kansas, Estados Unidos	Rastrojo de maíz	Ethanol y biodiésel y 18 MW de electricidad	75 000	[http://www.abengoabioenergy.com/web/en/2g_hugoton_project/]
GranBio	São Miguel dos Campos, Alagoas, Brasil	Caña de azúcar	Ethanol y 50 Mw de electricidad	65 000	[http://www.granbio.com.br/]
POET/DSM	Emmetsburg, Iowa, Estados Unidos	Maíz y rastrojo de maíz	Ethanol y biogás	60 000	[http://www.projectliberty.com/]
Biochemtex	Crescentino, Italia	Avena, Arundo donax	Ethanol, biogás, 13 Mw de electricidad	60 000	[www.Betarenewables.com/]
Raíz en Energía	Piracicaba, São Paulo, Brasil	Caña de azúcar y bagazo	Ethanol, biodiésel y electricidad	32 000	[http://www.raizen.com/]
Inbicon/DON G Energy	Kalundborg, Dinamarca	Paja, rastrojo de maíz y bagazo	Ethanol y biodiésel	29 600	[http://www.inbicon.com/en]
Chempolis Biorefining Plant	Oulu, Finlandia	Paja, junco, rama de fruta vacía, bagazo y rastrojo de maíz	Ethanol (3G)	5 000	[http://www.chempolis.com/]
Abengoa Bioenergía	Babilafuente, Salamanca, España	Paja de trigo y cebada	Ethanol y biogás	4 000	[http://www.abengoa-bioenergy.com/web/es/]
BornBioFuel 2	Aakirkeby, Bornholm, Dinamarca	Paja, va pastos y desechos de jardín	Ethanol (3G), biogás, e hidrogeno	4 000	[http://www.biogasol.com/]
Iogen Corporation	Ottawa, Canada	Paja de cereales, rastrojo de maíz, bagazo de caña de azúcar	Ethanol (3G)	1 600	[http://www.iogen.ca/]
Clariant	Straubing, München, Alemania	Paja de trigo y otros residuos de agricultura	Ethanol (3G)	1 000	[http://www.sunliquid.com/]
Enchi Corporation	Rome, Nueva York, Estados Unidos	Virutas de madera, pastos y otra biomasa lignocelulósica	Ethanol (3G)	500	[http://www.enchicorp.com/]
SP Plant	Örnsköldsvik, Suecia	Residuos de madera blanda, bagazo de Caña de azúcar	Ethanol (3G)	160	[http://www.sekab.com/biorefinery/demo-plant/]
Weyland AS	Bergen, Noruega	Residuos de madera (pino) y residuos agrícolas	Biodiésel (3G)	158	[http://www.weylano.no/]

Fuente: elaboración propia.

por parte de empresas que lideran las tecnologías actuales para biorrefinación en el mundo. Sin embargo, se debe resaltar que, en países como México, si bien no hay plantas de tamaño o capacidad industrial como las aquí presentadas, se realizan esfuerzos en los desarrollos de tecnologías para combustibles de tercera generación¹⁰ en varias universidades y centros públicos de investigación.

Las materias primas orgánicas, especialmente los residuos de biomasa, tanto agrícola como de maderas, están bien posicionadas para convertirse en las materias primas del futuro, dado que predominan en las biorrefinerías actuales, satisfaciendo la continua y creciente necesidad de energía, productos químicos y materiales. Sin embargo, se debe mencionar que la presencia de combustibles de tercera generación en las biorrefinerías más importantes del planeta aún es reducida si se compara con los niveles del etanol y biodiésel de segunda generación.

Conclusiones

La propuesta de la economía circular tuvo su más claro antecedente en 1972 con el planteamiento de poner límites al crecimiento, en esa misma lógica se ha recuperado, aunque de manera incipiente, la idea de frenar el consumo de recursos naturales y reconocer la finitud de los mismos. Sin embargo, los discursos y posturas actuales en torno al debate ambiental suelen ofrecer posiciones encontradas, toda vez que las posturas de los organismos oficiales que marcan tendencia en la conducción de las economías insisten en proponer una lógica de mercado a los recursos naturales y al medio ambiente, lo que choca con la idea del agotamiento de los mismos.

La bioeconomía, en coincidencia con la economía circular, representa una oportunidad para reorientar la visión del mundo, al identificar claramente al consumo excesivo como la principal causa del desastre ecológico y ofrecer una idea concreta de cómo se puede reducir la presión que se genera sobre el planeta limitando el uso de materia prima virgen y fomentando el uso de materias primas secundarias y residuos de biomasa tanto para la generación de productos como de energía.

A pesar de las ventajas y oportunidades que se perciben con respecto a la economía circular y en particular, a la bioeconomía, existen importantes riesgos para los países en desarrollo, toda vez que la puesta en marcha de una nueva estrategia

¹⁰ La biorrefinación de cuarta generación es una tecnología novedosa que se desarrolla a partir de modificaciones genéticas en algas y microalgas.

que apunta hacia un cambio de paradigma, debe ir necesariamente acompañada de procesos de innovación que se presentan, sí y sólo sí, existe una acumulación de conocimiento y capacidades científicas ligadas a condiciones de carácter económico, social e institucional favorables para ello. La brecha tecnológica y de conocimiento entre unos países y otros empieza a manifestarse en este terreno, donde es claro que los países que están reaccionando rápidamente a modificaciones institucionales están ya a la vanguardia en tecnologías y procesos de biorrefinación.

El proponer una transición del uso de hidrocarburos al uso de biomasa como insumo básico de la producción podría colocar a los países con abundantes recursos naturales en una mejor posición, sin embargo, carecer del avance científico y de una política nacional decidida los puede llevar nuevamente a una condición de explotación, al tener acceso sólo a procesos y fases elementales de la bioeconomía.

Las biorrefinerías técnicamente ofrecen mayores posibilidades para dar una pronta respuesta a las barreras tecnológicas, la rápida evolución de la primera y segunda generación y los avances a una tercera no representan un límite mayor que las cuestiones sociales y los intereses predominantes del modelo económico, en ese sentido la instrumentación de políticas para la economía circular y la bioeconomía han avanzado un poco más rápido en los niveles micro y meso.

En este sentido, uno de los principales desafíos que enfrentan las biorrefinerías a futuro, considerando la complejidad de la producción que realizan, son principalmente ampliar su base de conocimientos disponibles con el objetivo de generar un proceso de biorrefinación más flexible (diversas opciones de entrada/salida), reducir el costo total de producción e incrementar la variedad de productos realizados de los desechos de procesos anteriores para buscar la sustentabilidad indicada en la economía circular.

Las biorrefinerías son una posibilidad interesante, sin embargo, dado el actual contexto donde toda la plataforma productiva está instalada para los hidrocarburos, se hacen presentes fuertes límites y retos de carácter económico, tecnológico e institucional, de modo que sólo las grandes empresas de los países desarrollados ganan terreno, ya que los gobiernos de esos países son los que se han comprometido a impulsar este tipo de biorrefinación a fin de prepararse para el futuro.

Bibliografía

Alto Nivel (2010). Biorrefinerías la industria del futuro [<http://www.altonivel.com.mx/4970-biorefinerias-la-industria-del-futuro.html>].

- Becker, G.S. (1976). “Altruism, Egoism and Genetic Fitness: Economics and Sociobiology”, *Journal of Economic Literature*, vol. 14, núm. 3, septiembre, American Economic Association, pp. 817-826.
- Bioenarea (2012). *Biorrefinerías. Una oportunidad de negocio para las zonas rurales y las industrias. Guía de actuación en las regiones participantes en el Proyecto Bioref*. Ávila, España: Centro Tecnológico Cartif/Agencia Provincial de la Energía Diputación de Ávila.
- Brambila, J.J. (2011). *Bioeconomía: instrumentos para su análisis económico*. México: Sagarpa/Colpos.
- Brambila, J.J., M.Á. Martínez, M.M. Rojas, V. Pérez (2013). “La bioeconomía, las biorrefinerías y las opciones reales: el caso del bioetanol y el azúcar”, *Agrociencia*, vol. 47 núm. 3, México abril/mayo, pp. 281-292.
- Calestous, J. y V. Konde (2001). *The New Bioeconomy: Industrial and Environmental Biotechnology in Developing Countries*. Ginebra: United Nations Conference on Trade and Development, preparado por Calestous Juma y Victor Konde Belfer, Center for Science and International Affairs Kennedy School of Government, Harvard University.
- Carpintero, O. (2006). “Biocombustibles y uso energético de la biomasa: un análisis crítico”, *Boletín CF+S 37*. Madrid, España.
- Carrillo, G. (2014). “La ecología industrial: una alternativa innovadora y sustentable”, *Revista innovación y competitividad*, año XIV, núm. 54, abril-junio. ADIAT.
- Carson, R. (2005). *Primavera silenciosa*. Madrid: Ed. Crítica.
- Colin, C.W. (1976). *Mathematical Bioeconomics: The Optimal Management of Renewable Resources*. Nueva York: The Wiley-Interscience Paperback Series.
- Commoner, B. (1973). *El círculo que se cierra*. Barcelona: Plaza y Janés.
- Cuervo, L., J.L. Folch y R.E. Quiroz (2009). “Lignocelulosa como fuente de azúcares para la producción de etanol”, *BioTecnología*, vol. 13, núm. 3, pp. 11-25.
- Ellen MacArthur Foundation (2013). *Towards the Circular Economy. Economic and Business Rationale for an Accelerated Transition*. Unión Europea: Ellen MacArthur Foundation.
- Fussler, C. y P. James (1999). *Eco-innovación. Integrando el medio ambiente en la empresa del futuro*. Barcelona: Mundi-Prensa.
- Ghisellini, P. et al. (2015). “A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems”, Elsevier, *Journal of Cleaner Production*, vol. 114, febrero 2016, pp. 11-32.
- Hardy, R. (2002). “The Bio-based economy”, en Janik, J. y A. Hipkey (eds.), *Trends in New Crops and Uses*. Alexandria, Virginia: ASHS Press, pp. 11-16.
- Martínez, A. (2009). *El ecologismo de los pobres*. Barcelona: Editorial Icaria.
- Moreira, J.R. y J. Goldemberg (1999). “The Alcohol Program”, *Energy Policy*, núm. 27, pp. 229-245.
- OCDE (2009). *The Bioeconomy to 2030. Designing a policy agenda*. Main findings and policy conclusions. París: Organisation for Economic Cooperation and Development.

- ONU (1987). *Nuestro Futuro Común*, conocido como *Reporte Brundtland*, preparado por Gro Harlem Brundtland. Noruega.
- Ortiz Lechuga, E.G. (2015). D. López (ed.), “México: entendiendo el concepto de biorrefinería”, *Latinoamérica Renovable* [<http://latinoamericarenovable.com/2015/10/25/7281/>].
- Pérez, C. (2010). “Dinamismo tecnológico e inclusión social en América Latina: una estrategia de desarrollo productivo basada en los recursos naturales”, *Revista CEPAL*, núm. 100, abril, pp. 123-145.
- Porter, M. y Linder Vander C. (1995). “Towards a New Conception of the Environment Competitiveness Relationship”, *Journal of Economic perspectives*, vol.9, núm. 4, pp. 97-118.
- Sacramento-Rivero et al. (2010). “Diagnóstico del desarrollo de biorrefinerías en México”, *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, vol. 9, núm. 3, pp. 261-283.
- Salazar, R. y G. Cárdenas (2013). “La bioeconomía y las biorrefinerías”, *EEAOC. Avance Agro-industrial*, núm. 34, vol. 3, pp. 31-34.
- Su, Biwei, Almas Heshmati, Yong Geng y Xiaoman Yu (2013). “A review of the circular economy in China: moving from rethoric to implementation”, *Journal of Cleaner Production*, vol. 42, pp. 215- 227.
- Tollin, N. (2016). “Economía circular para una innovación territorial: un enfoque metabólico”, *Plataforma de Territorios Inteligentes*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [<http://www.unescosost.org/project/moravia-florece-para-la-vida/>].
- WBCSD (2000). “Ecoeficiencia. Creando más valor con menos impacto” [<http://www.wbcsd.org>].
- Wedgerdt, P. (2016). “Circular Economy. Closing the loop an EU Action Plan for the Circular Economy”. European Commission [https://ec.europa.eu/environment/circular-economy/index_en.htm].

Evaluación financiera de los proyectos de biorrefinerías con la metodología de opciones reales

*José de Jesús Brambila Paz
Magdalena Rojas Rojas
Verónica Pérez Cerecedo*

Introducción

El siglo XX fue el siglo del petróleo. Su vastedad, maleabilidad y versatilidad, permitieron que se pudiera refinar (hacer más pura una sustancia o materia) para obtener desde combustible, ceras, plásticos, caucho, detergente, asfalto, pinturas, fibras sintéticas, hasta fertilizantes, plaguicidas, herbicidas, medicamentos para animales y humanos, aditivos para los alimentos como son sabores, colores, olores, conservadores, o bien, productos para cosméticos, espumantes y estabilizadores.

El petróleo, la petroquímica y las refinerías permitieron obtener múltiples productos que elevaron el bienestar de la población y sus bajos precios permitieron masificar, por ejemplo, los medicamentos, los plásticos, las fibras sintéticas. De hecho, el petróleo y sus derivados sustituyeron a los productos naturales como las fibras de algodón, henequén, yute, seda, etcétera, que fueron base no sólo de la ropa sino de cuerdas e hilos o los aceites de coco, linaza, higuera que se usaron para hacer jabón y lubricantes, o la loza que fue sustituida por plásticos.

Pero la civilización del siglo XX acumuló conocimiento acerca de la contaminación, deterioro de los recursos naturales y cambio climático (Mathez, 2009), lo que lleva a revisar las consecuencias negativas de la producción, uso y desechos del petróleo, del carbón y de sus derivados, así como a buscar sustitutos.

El excesivo y masivo uso del petróleo y carbón ha llevado a que el crecimiento de su demanda supere en mucho los nuevos yacimientos descubiertos, por lo que ahora se empiezan a extraer de lugares más recónditos, con mayor riesgo de contaminar y provocar desastres ecológicos como: el “Fracking” (fraccionar la tierra) y el “TarSands” (arenas con bitumen). Aunque algunos autores consideran que se tiene

suficiente petróleo y carbón para abastecer a las economías del mundo hasta por 150 años más. El problema es que ya no se va a tener petróleo barato y de fácil acceso, que fue la razón por la que se usó en forma masiva (Downey, 2009; Ponting, 2007; Brown *et al.*, 2015).

El petróleo y el carbón son los principales responsables del deterioro de los recursos naturales (el uso de fertilizantes, plaguicidas, herbicidas y su producción misma afecta al suelo, el agua, los mares y la biodiversidad), el principal emisor de gases invernadero como es el dióxido de carbono (CO₂) y ozono (O₃), el principal productor de desechos (plásticos, empaques, aceites) que tardan cientos de años en degradarse y se encuentran en carreteras, campos, ríos, lagos y hoy sabemos que se forman, por las corrientes marinas, islas de plástico, sumamente dañinas para la vida acuática (Sachs, 2015; Klein, 2015).

Al principio del siglo XXI se comenzó la transición de una petroeconomía a una bioeconomía (Brambila, 2011a). El petróleo es materia orgánica que se “cocinó por cientos de años”. Lo lógico es sustituirlo por materia orgánica fresca, por biología, cuyos productos y subproductos se degradan y no deben contaminar. Ahora, en el siglo XXI, se busca obtener biocombustibles (bioetanol y butanol), biomateriales (bioplásticos, biopolímeros), biomedicinas (del sauce usado para reducir el dolor o del anís estrella usado contra la influenza), bioaditivos en alimentos y excipientes (colores, olores, sabores, conservadores naturales), biopinturas (como el añil, la cochinilla), y todo lo que hoy empieza a llamarse *bio-based products and services* y que tienen como eje central obtener productos bioquímicos (como antes los petroquímicos) mediante el refinado de las plantas, productos animales, desperdicios orgánicos.

La bioeconomía (*Bio-Based Economy*) es la producción y distribución de los bienes y servicios que se obtienen de la transmutación dirigida de los seres vivos y sus sustancias (plantas, animales, bacterias, virus, enzimas) para satisfacer las necesidades individuales del consumidor (del ser humano) según sus características y circunstancias (Brambila, 2011a).

Los proyectos de la bioeconomía serán económicamente más riesgosos porque los mercados que atenderán todavía no están maduros en diferentes aspectos, en tecnología (ésta puede cambiar rápidamente y dejar obsoleta la que se usa), en productos (pueden ofrecerse sustitutos de mejor calidad y dejar fuera el que se produce), en volatilidad de precios (éstos no sólo se determinan por costos de producción sino también por costos de intangibles como conocimiento y por subsidios, impuestos y aranceles), en preferencia del público (éste puede cambiar por mayor información que tenga la persona acerca de los bioproductos).

El objetivo de este capítulo es mostrar que, debido a las particularidades de los proyectos de la bioeconomía, como son las biorrefinerías, se deben evaluar financieramente con la metodología de opciones reales que permite incorporar el riesgo y la incertidumbre a lo largo de la vida útil de una inversión.

Las biorrefinerías son un sistema productivo con el que se hacen más puras las sustancias que se obtienen de las plantas y animales (Kamm *et al.*, 2010). Son las industrias que proveen la biomasa (materia orgánica que puede ser usada para obtener productos y servicios útiles) en forma sustentable para obtener múltiples productos que pueden sustituir a los derivados del petróleo. Éstas no necesariamente son grandes instalaciones como las petro-refinerías, pueden ser desde procesadoras para captar el gas de los desechos de orina y estiércol de granja porcícola, hasta grandes instituciones que generan bioetanol u otro tipo de biocombustibles. Pueden ser manejadas con procesos simples mediante los biodigestores (Lee y Shah, 2013), hasta procesos complejos y de alta tecnología para producir biomateriales médicos que deben tener en cuenta la biocompatibilidad de los materiales (Chen y Thouas, 2015; Langeveld *et al.*, 2010; De Jong, 2010).

Las biorrefinerías tienen tres particularidades que las hacen negocios de inversión particulares y, por tanto, deben ser analizadas con instrumentos de evaluación diferentes a los tradicionales, como ha sido el valor actual neto, beneficio/costo y tasa interna de retorno (Baca, 2016). La primera particularidad consiste en que la materia prima, la biomasa, puede cambiar sus características físicas y químicas en la medida que la bioeconomía los transmuta (hacer de una cosa otra distinta) para adecuarla a las necesidades nuevas del consumidor y las redes de valor. Así, la biorrefinería debe ser lo suficientemente flexible para adecuarse al cambio de las características de la materia prima (Dean *et al.*, 2016).

Segunda particularidad: los productos que ofrece una biorrefinería pueden volverse obsoletos rápidamente por descubrimiento de nuevas características más beneficiosas de otros productos, o bien, por avances en la biotecnología. Por ejemplo, el bioetanol que creó tantas esperanzas en la primera década del siglo XXI, ahora se considera que no es el producto más indicado para el combustible y la industria automotriz apunta más a carros híbridos (eléctricos y gasolina), completamente eléctricos y quizás, en un futuro, impulsados por hidrógeno. Aunque se sigue trabajando en producción de bioetanol, ya no de primera generación que fue de caña de azúcar, maíz, remolacha, sorgo y hasta trigo, con el problema de competir por suelos con la producción de alimentos o combustibles; la segunda generación jatrofa, lignocelulosa y otros desechos; la tercera generación más prometedora por tener menor impacto

ecológico y menor cuestionamiento al problema de alimento o combustible es el caso de algas para energía y materiales.

Así, las biorrefinerías deben prever que sus productos deben adecuarse al constante cambio de tecnología, de criterios ecológicos y de otro tipo como: políticos, legales y de opinión pública (Bachman y Riese, 2016).

Tercera particularidad: hasta ahora la mayoría de los bioproductos son una opción para sustituir a los petro-productos, por lo que además de tener las fluctuaciones propias del mercado (demanda y oferta), enfrentan una fuerte correlación con los precios, así como enorme volatilidad del mercado tanto de las políticas del petróleo como del carbón. Difícil planear la producción de un sustituto del petróleo cuando el barril tuvo un precio de 40 dólares en 2005, de 110 dólares en 2011 y de 38 dólares en 2015.

Una biorrefinería debe adaptarse para ser polivalente (producir diferentes bienes), para adecuarse a los cambios de precio de los productos y a las variaciones en las características de los mismos y de las materias primas.

Para evaluar un plan de negocios de cualquier biorrefinería es necesario tomar en cuenta los posibles riesgos y las acciones que la administración del proyecto puede aplicar. Las técnicas de evaluación de proyectos con opciones reales pueden ser el instrumento necesario para una evaluación financiera de proyectos de este tipo.

La metodología para evaluar un proyecto de biorrefinería con opciones reales

Las opciones reales (Copeland y Antikarov, 2001; Mun, 2002; Mascareñas *et al.*, 2004; Brambila, 2011b; Álvarez *et al.*, 2012) son una metodología de evaluación de proyectos complementaria a la tradicional (valor presente neto, beneficio/costo o tasa interna de retorno), la cual permite considerar que la administración puede tomar decisiones a lo largo de la vida útil de la inversión para adecuarse a los cambios de circunstancias. La administración puede decidir ampliar o reducir la escala de producción, cambiar de materias primas por razón de costos o calidad, cambios de tecnología, ofrecer diferentes productos, invertir en reúso, reciclaje de agua, en aprovechamiento de desechos o en generación de energía y muchas más posibilidades.

La empresa tiene el derecho de tomar la opción real que más le convenga, pero no es su obligación, exactamente como son las opciones financieras que el poseedor de acciones tiene, es decir: el derecho a vender o comprar, pero no la obligación (Hull, 2003).

Si una biorrefinería se evaluó de forma tradicional (cálculo de valor actual neto) se puede calcular el valor que agrega al proyecto una opción real (como puede ser ampliarse, cambiar de tecnología, reducirse, cambiar de materia prima o hasta cambiar de producto). La suma del valor tradicional y del valor de la opción real es el valor total del proyecto. Debe resaltarse que si un proyecto de biorrefinería tiene una evaluación tradicional negativa (se rechaza la inversión), al considerar el valor que tienen las opciones reales puede resultar que el valor actual total neto de la inversión sea positivo (se acepta invertir en el proyecto), esto es, se puede revertir la decisión.

Con varios ejemplos se puede apreciar mejor la metodología. Los casos que se presentan son datos reales que se adecúan para hacer la presentación más didáctica y para la mejor comprensión de los no especialistas en evaluación de proyectos (Brambila, 2011b). El primer ejemplo es una inversión en biogás con opción de ampliarse, es un caso real que hemos usado para presentar la metodología de las opciones reales en la forma más sencilla posible. Esto nos permite presentar después el caso de una biorrefinería que puede optar por producir bioetanol o azúcar, o bien, una combinación de ambos, este es un caso real pero más complejo. El último caso es acerca de una biorrefinería que produce biomaterial médico, pero durante la vida útil del proyecto se determinará si es o no biocompatible, esto es, si el proyecto mejora económicamente o se liquida. Estos tres ejemplos son considerados como proyectos de biorrefinerías entendiendo éstas como el sistema productivo con el que se hacen más puras las sustancias que se obtienen de las plantas y animales para derivarlos en nuevos bienes que sustituyen a los derivados del petróleo o que satisfagan las nuevas necesidades del consumidor. El uso de opciones reales para evaluar decisiones de los inversionistas en biorrefinerías, con un mayor nivel matemático, se pueden encontrar en Bastian-Pinto *et al.* (2009), Awudu y Zhang (2013), Mezey y Conrad (2010), Schmit *et al.* (2009), Serra *et al.* (2011) y Vedenor *et al.* (2006).

Caso de ampliación de un proyecto de biogás

Se trata del proyecto de un biodigestor que permite usar de manera sustentable la orina y el estiércol en una granja porcícola. Los datos para realizar una evaluación tradicional sencilla son:

- Inversión inicial: construcción de laguna receptora, biodigestores e instalación para usar el gas para generar electricidad: 250 mil pesos.

- El costo de mantenimiento de la laguna y todo el equipo es de 25 mil pesos. Nótese que no hay costo de materia prima porque es el desperdicio.
- Ingreso por generación de energía usando el gas: 100 mil pesos.
- La vida útil de todo el proyecto es de cinco años.
- El valor de rescate es 50 mil pesos y la tasa de descuento es de 15%. El valor actual neto tradicional se calcula de la siguiente manera.

Cuadro 1. Valor actual tradicional

AÑO	MILES DE PESOS REALES					
	0	1	2	3	4	5
Inversión	250					
Ingreso	0	100	100	100	100	100+50
Costo	0	25	25	25	25	25
Flujo real neto	0	75	75	75	75	125
Flujo a valor presente (15%)	0	65.2174	56.7108	49.3137	42.8815	62.1471
Suma del flujo a valor presente	306.2705					

Fuente: elaboración con datos de Mercado.

El flujo real neto se descontó por la tasa de interés de referencia, en este caso 15 por ciento.

$$I. \frac{125}{(1.15)^5} = 62.1471$$

El valor actual neto (VAN) es:

$$VAN = -250,000 + 306,270.50 = 56,2705$$

Si el VAN es positivo el proyecto es rentable, esto significa que el beneficio es mayor que el costo, todo calculado a pesos del año cero.

Ahora, como el precio del biogás o la energía es muy volátil, la administración de la empresa puede decidir en el tercer año ampliar sus instalaciones, ésta es una opción real. Pero también al tercer año si hay pérdidas puede decidir cerrar y vender en 50 mil pesos, que es el valor de rescate.

La volatilidad del proyecto se puede medir por la varianza de la tasa de cambio continua de los precios reales del producto (en este caso el biogás) o bien para

abarcar más variables (como precios, costos, producción, impuestos, subsidios) se puede considerar la varianza de la tasa de crecimiento continua del ingreso real neto.

La tasa de cambio continua del precio real o ingreso real se obtiene:

$$Y_t = \ln\left(\frac{P_t}{P_{t-1}}\right)$$

Donde:

Y_t = tasa de cambio continua

\ln = logaritmo natural

P_t = precio real o ingreso real en el periodo t

Se obtiene la media $\bar{\alpha}$ y la varianza σ^2 de la tasa de cambio continua γ_t .

Con la desviación σ , se pueden estimar escenarios cuando los precios o ingresos suben, $u = e^\sigma$, o bien cuando bajan $d = e^{-\sigma}$. Donde u , es sube de up y la d es baja de $down$, e , es el número de Euler y Γ es la desviación estándar.

Los cálculos son:

$$\begin{aligned} \bar{\alpha} &= 0.30 & \sigma^2 &= 0.25, & \sigma &= 0.50 \\ u &= 1.6487 = e^{0.50} & d &= 0.6065 = e^{-0.50} \end{aligned}$$

El árbol binomial del proyecto se puede construir multiplicando el VAN inicial por u para arriba o por d para abajo y en cada nodo se repite lo mismo hasta el último periodo, que en nuestro caso es el quinto año.

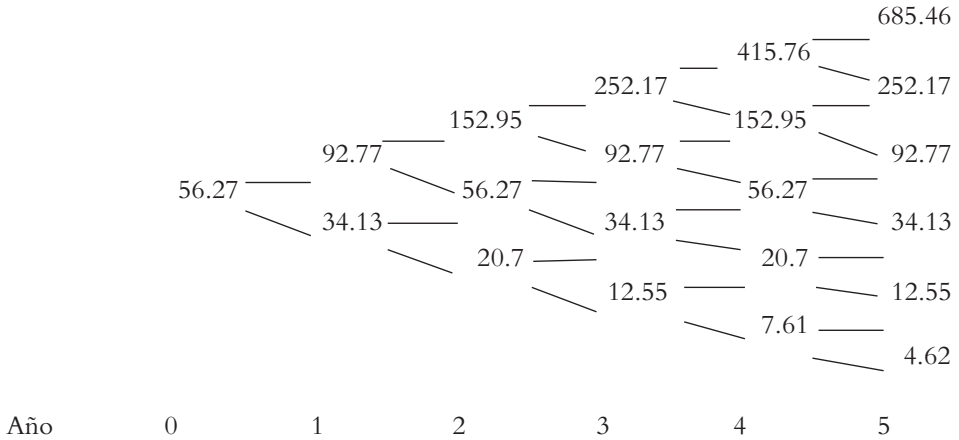
Nótese que en promedio el valor del proyecto sigue siendo de 56.27 miles de pesos, pero si las cosas van bien (las ganancias son mayores a los 56.27 miles de pesos esperados) pueden llegar a 685.46 miles de pesos, aunque la probabilidad es baja o, si las cosas van mal (que el valor del proyecto está por debajo de los 56.27 miles de pesos esperados) el valor puede caer a 4.62 miles de pesos.

La fórmula para calcular la probabilidad de ascender y descender (Copeland y Antikarov, 2001; Brambila, 2011b) es:

$$P = \frac{(1+r) - d}{u - d}$$

Donde P es la probabilidad de ascender y $1 - P$ es la probabilidad de descender, r es la tasa libre de riesgo, que en el caso de México puede ser la tasa real de los

Figura 1. Árbol binomial de un proyecto de biogás



Fuente: elaboración con datos de mercado.

certificados de la tesorería (cetes) de largo plazo, cinco años, que es de alrededor de cinco por ciento. Se usa cetes porque en finanzas se usa como la tasa libre de riesgo.

Aplicando la fórmula con los datos del proyecto de biogás sería:

$$P = \frac{1.05 - 0.6065}{1.6487 - 0.6065} = 0.4255$$

$$1 - P = 0.5745$$

Así, la probabilidad de alcanzar el valor de 685.46 miles de pesos el quinto año será de $(0.4255)^5 = 0.01395 \approx 1.4\%$ y de llegar al valor de 4.62 es de $(0.5745)^5 = 0.06258 \approx 6.26\%$.

Para calcular la probabilidad de estar en cualquier nodo “n” en el momento t, se usa la fórmula de probabilidades binomiales (Copeland y Antikarov, 2001), que es:

$$B\left(\frac{n}{t}, P\right) = \binom{t}{n} P^n (1 - P)^{t-n} = \frac{t!}{(t-n)!n!} P^n (1 - P)^{t-n}$$

Donde:

B = probabilidad de estar en el nodo “ n ” en tiempo t

n = número de nodos en el periodo t en cualquier año se cuenta el número de nodos empezando en cero.

t = tiempo evaluado de 1, 2., 5 P = Probabilidad de ascender

$1 - P$ = probabilidad de descender

! = factorial

Por ejemplo, para calcular la probabilidad de estar en el $t = 5$, en el $n = 5$ que tiene un valor de 685.46 miles de pesos es:

$$B\left(\frac{5}{5,P}\right) = \frac{5 \star 4 \star 3 \star 2 \star 1}{(5-5)!5 \star 4 \star 3 \star 2 \star 1} (0.4255)^5 (0.5745)^{5-5} = 0.01395 \approx 1.4\%$$

Que es el resultado ya obtenido.

Para $t = 5$, $n = 0$ que tiene un valor de 4.62

$$B\left(\frac{5}{0,P}\right) = \frac{5 \star 4 \star 3 \star 2 \star 1}{(5-0)!0!} (0.4255)^0 (0.5745)^{5-0} = 0.06258 \approx 6.26\%$$

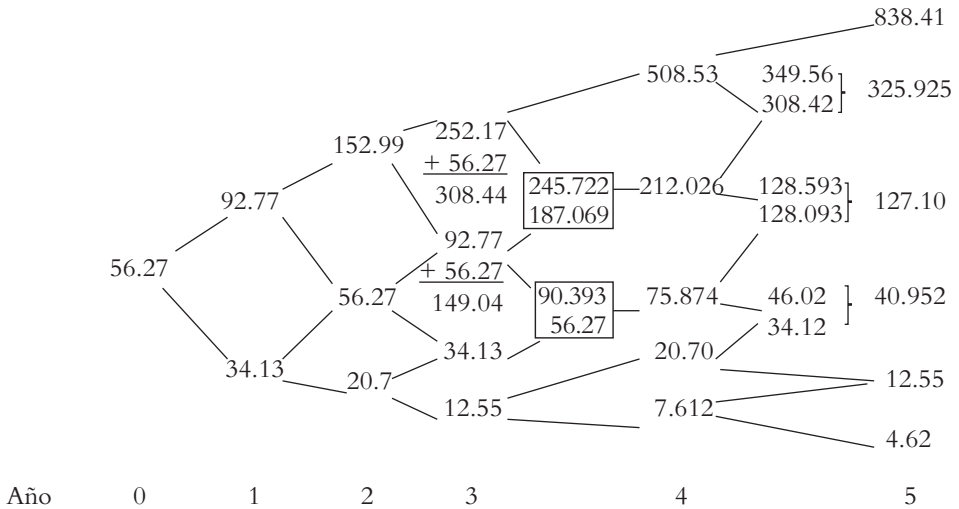
Que es resultado ya obtenido.

Para $t = 5$, $n = 4$ que tiene un valor de 252.17 miles de pesos.

$$B\left(\frac{5}{4,P}\right) = \frac{5 \star 4 \star 3 \star 2 \star 1}{(5-4)!4 \star 3 \star 2 \star 1} (0.4255)^4 (0.5745)^{5-4} = 5(0.0328)(.5745) = 0.0942 \approx 9.42\%$$

Ahora, si la empresa está en el tercer año, si está en los valores 92.72 miles de pesos o 252.17 miles de pesos y si decide que se debe ampliar (digamos que el proyecto crece al doble de su capacidad) o bien si está en los valores 34.13 miles de pesos o 12.55 miles de pesos, significa que el valor del proyecto está por debajo de 56.27 miles de pesos esperados, decide cerrar y obtener un valor de rescate (se vende lo que queda del proyecto) de 50 mil pesos. Nótese que son dos opciones reales que se tiene para el tercer año, una es duplicar capacidad, la otra es cerrar y vender. Estas opciones reales se deben valorar por separado cada una, porque no se pueden ejercer ambas al mismo tiempo. En el año tres, suponemos que se decide duplicar la capacidad del proyecto. El valor de la opción real de ampliar el proyecto se estimó de la manera siguiente.

Figura 2. Árbol binomial de biogás con opción de ampliarse en el tercer año



Fuente: elaboración propia.

Los valores a partir del tercer año se calculan usando las probabilidades como sigue:

$$(0.4255) (245.722) + (0.5745) (187.069) = 212.026$$

$$(0.4255) (56.27) + (0.5745) (90.393) = 75.874$$

$$(0.4255) (349.56) + (0.5745) (308.42) = 325.925$$

$$(0.4255) (125.093) + (0.5745) (128.593) = 127.1038$$

$$(0.4255) (34.12) + (0.5745) (46.02) = 40.957$$

Ahora para calcular el valor actual neto total se calculan los valores de los nodos de atrás para adelante y se elige el valor máximo. Se calcula el valor del nodo con la fórmula:

$$V_m = \frac{P(V_u) + (1 - P)(V_d)}{1 + r}$$

Donde:

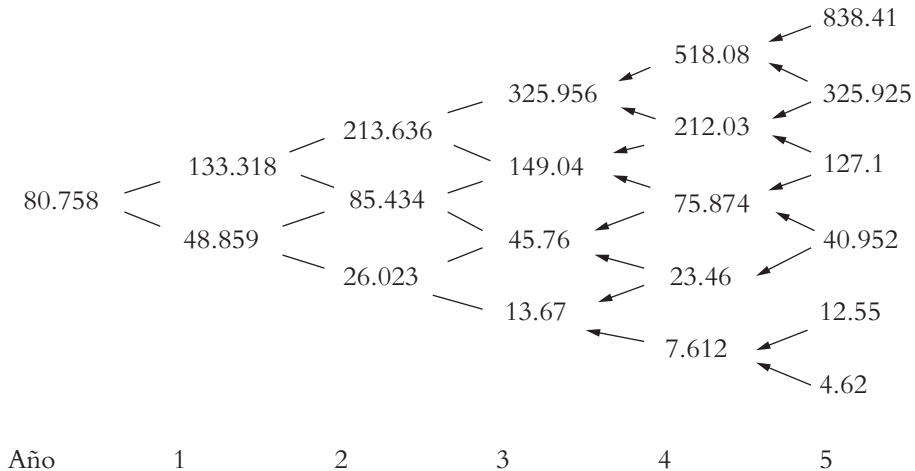
V_m = es el valor del nodo n en el tiempo t y se elige el de mayor valor, entre el VALOR CALCULADO con opción y el VALOR SIN OPCIÓN.

V_u = valor ascendente en el periodo $t + 1$ V_d = valor descendente en el periodo $t + 1$

r = tasa libre de riesgo

Se calcula el valor actual neto total considerando sólo desde el quinto año. Se debería calcular desde el octavo año, pero entonces se tendrían que hacer los ajustes correspondientes a que el sexto año ya se terminó el proyecto inicial, o bien, seguir simulando que el proyecto se repite, pero se complican los cálculos y no agrega nada para entender la metodología.

Figura 3. Valor actual neto total del proyecto de biogás con la opción real de ampliarse



Fuente: elaboración propia.

En el quinto año los valores son los mismos. Para el cuarto año se calculan como sigue:

$$V_{4,4} = \frac{0.4255(838.41) + (0.5745)(325.925)}{1 + .05} = 518.08$$

Como 518.08 miles de pesos es mayor que 508.53 miles de pesos del árbol binomial anterior, entonces se selecciona el nuevo cálculo.

$$V_{4,3} = \frac{0.4255(325.925) + (0.5745)(127.10)}{1 + .05} = 201.619$$

Como 201.62 miles de pesos es menor que 212.026 miles de pesos del árbol binomial anterior, entonces se selecciona el valor del árbol anterior.

El valor actual neto total es de 80.76 miles de pesos y el valor actual neto tradicional es de 56.22 miles de pesos, por lo que la opción real de ampliar en el tercer año vale 24.54 miles de pesos. Se acepta invertir en el proyecto de biogás, porque su valor actual neto es positivo, y se acepta tener una opción de crecer en el tercer año si el valor del proyecto está por encima de 56.22 miles de pesos.

Caso de polivalencia en una biorrefinería

Brambila *et al.* (2013) presentan el caso de una biorrefinería que produce bioetanol o azúcar, pero que con la volatilidad de precios busca la opción real de alternar entre azúcar y bioetanol para ajustarse a los cambios de precios. Esto es, de ser una biorrefinería monovalente y producir bioetanol o azúcar a ser una biorrefinería polivalente de bioetanol y azúcar, ajustando las cantidades según los precios.

Los datos que se usan se presentan en el Cuadro 2. El caso del portafolio es cuando se decide como mejor opción dedicar 35% de la capacidad a azúcar y 65% a bioetanol, estos porcentajes pueden variar según los cambios de precios. Cuando se usa portafolio la varianza se calcula al estilo de Markowisk (Ross *et al.*, 2016) que es:

$$\sigma_p^2 = x_1^2\sigma_1^2 + 2x_1x_2\sigma_2 + x_2^2\sigma_2^2$$

Donde:

σ_p^2 = varianza del portafolio = Proporción dedicada a azúcar, 35 por ciento

x_2 = proporción dedicada a bioetanol, 65 por ciento

σ_1^2 = varianza de la tasa de cambio continua de los precios reales del azúcar

σ_2^2 = varianza de la tasa de cambio de los precios reales del etanol

Cuadro 2. Indicadores para cada proyecto: azúcar, bioetanol y portafolio

CONCEPTO		AZÚCAR	BIOETANOL	PORTAFOLIO
Media	α	-0.0011	0.0073	0.0044
Varianza	σ^2	0.0669	0.0349	0.0380
Desviación estándar	σ	0.2587	0.1869	0.1951
Covarianza	σ_{12}			0.0332
Tasa de interés de libre riesgo	r	0.0500	0.0500	0.0500
Valor del proyecto hacia arriba	$u = e^{\sigma}$	1.2953	1.2055	1.2154
Valor del proyecto hacia abajo	$u = e^{-\sigma}$	0.7720	0.8295	0.8228
Probabilidad de subir	$P = ((1 + r) - d) (u - d)^{-1}$	0.5312	0.5864	0.5788
Probabilidad de bajar	$(1 - P)$	0.4688	0.4136	0.4212
Proporción	X	0.35	0.65	

Fuente: datos de Brambila *et al.* (2013).

$$\begin{aligned} \sigma_p^2 &= x_1^2 \sigma_1^2 + 2x_1 x_2 \sigma_{12} + x_2^2 \sigma_2^2 = (0.4255)(0.0349) + 2(0.65)(0.35)(0.0332) \\ &\quad + (0.1225)(0.0669) = 0.038 \end{aligned}$$

Los árboles binomiales obtenidos para el 100% de azúcar o 100% de bioetanol y el portafolio con 35% de azúcar y 65% de bioetanol, se presentan en el Cuadro 3 y se parte de un valor actual neto de 100 millones de dólares.

Cuadro 3. Dinámica del valor del proyecto monovalente (azúcar o bioetanol) y polivalente (azúcar y bioetanol)

VALORES "/AÑO	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
AZÚCAR	100	130	168	217	282	365	472	612	792	1026	1330
		77	100	130	168	217	282	365	472	612	792
			60	77	100	130	168	217	282	365	472
				46	60	77	100	130	168	217	282
					36	46	60	77	100	130	168
						27	36	46	60	77	100
							21	27	36	46	60
								16	21	27	36
									13	16	21
										10	13
											8

Cuadro 3. Dinámica del valor del proyecto monovalente (azúcar o bioetanol) y polivalente (azúcar y bioetanol)

VALORES €/AÑO	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Bioetanol	100	121	145	175	211	255	307	370	446	538	648
		83	100	121	145	175	211	255	307	370	445
			69	83	100	121	145	175	211	255	307
				57	69	83	100	121	145	175	211
					47	57	69	83	100	121	145
						39	47	57	69	83	100
							33	39	47	57	69
								27	33	39	47
									22	27	33
										19	22
										15	
Portafolio	100	122	148	180	218	265	322	392	476	579	703
		82	100	122	148	180	218	265	322	392	476
			68	82	100	122	148	180	218	265	322
				56	68	82	100	122	148	180	218
					46	56	68	82	100	122	148
						38	46	56	68	82	100
							31	38	46	56	68
								26	31	38	46
									21	26	31
										17	21
										14	

Fuente: Brambila, 2013.

* Estos cálculos se realizaron utilizando la metodología Brach (2003).

El Cuadro 4 presenta el árbol binomial cuando se tiene la opción de producir ambos productos, pero en cantidades variables. El valor actual neto total del proyecto polivalente que se ajusta a los cambios de precios es de 106 millones de dólares, el valor actual neto tradicional es de 100 millones de dólares por lo que la opción real tiene un valor de 6 millones de dólares.

Cuadro 4. Valor de la opción real del proyecto al ser polivalente
(azúcar o bioetanol o ambos)

VALORES*/AÑO	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	106	133	169	218	282	365	472	612	792	1026	1330
		87	105	132	169	218	282	365	472	612	792
			71	86	105	131	168	217	282	365	472
				58	70	85	104	131	168	217	282
					48	58	70	84	103	130	168
						39	47	57	69	83	100
							33	39	47	57	69
								27	33	39	47
									22	27	33
										19	22
											15

Fuente: Brambila *et al.* (2013).

* Los valores de los nodos se obtienen de atrás para adelante y siempre bajo la regla de seleccionar el mayor valor (Brach, 2003).

Se concluye que es más rentable tener una biorrefinería polivalente, que puede producir diferentes bienes según los cambios de precios, a una monovalente, que sólo produce un producto sin poder hacer ajustes a los cambios de precios.

El caso de una biorrefinería de biomateriales médicos

Se produce un biomaterial médico que está en contacto con tejido vivo, por lo que tiene que ser biocompatible para evitar daños que, por lo general, no se presentan de inmediato sino tiempo después del implante. La biorrefinería que produce sustancias de alta tecnología como materiales médicos (Chen y Thouas, 2015) tiene el riesgo de que en el mediano plazo su biomaterial médico resulte no biocompatible y tenga que abandonar el proyecto o rematar activos para cambiar de giro, o bien que se acepte que es biocompatible y sube su precio en el mercado.

Se producen biomateriales que permitan implantes o fijación de los dientes en las encías. Pero existe una posibilidad de 30% que se detecte en tres años un daño al tejido vivo y sea prohibido el biopolímero. Por lo que se abandona el proyecto si se da el caso. El problema es si el valor actual neto total del proyecto recomienda invertir en esta biorrefinería teniendo en cuenta el riesgo de abandonarla después de tres años.

Los datos para la inversión se toman de proyectos generales de productos médicos y son de 2 millones de dólares, como todo proyecto de medicina la principal inversión de 1.5 millones de dólares es un intangible (patentes). Al salir al mercado el producto tiene un precio de 500 mil dólares la tonelada, y se reduce a 250 mil dólares el tercer año y 100 mil dólares a partir del cuarto año, hasta el octavo año cuando el proyecto termina. La capacidad de producción es de una tonelada los dos primeros años y, a partir del tercero, se pueden producir tres toneladas. Los costos por tonelada son de 100 mil dólares, porque el costo importante fueron los intangibles.

Cuadro 5. Valor actual neto de un biomaterial médico con opción de venta en el octavo año

MILES DE DÓLARES									
Inversión intangible	1500								
Inversión tangible	500								
Ingreso		500	500	750	300	300	300	300	300
Costos		10	10	30	30	30	30	30	30
Valor de rescate									1000
Total	2000	490	490	720	270	270	270	270	1270
Año	0	1	2	3	4	5	6	7	8

Fuente: elaboración con datos de mercado.

*Nótese que en este escenario no se ha confirmado la biocompatibilidad.

En la evaluación tradicional del proyecto, valor actual neto (VAN), considerando que en el octavo año se remata todo en un millón de dólares y que la tasa de descuento es de 15%, se calcula como sigue:

$$VAN = -200 + 426.09 + 370.51 + 473.41 + 154.37 + 134.24 + 116.73 + 101.50 + 415.16 = 192.01$$

Ahora, si se considera la opción de salida en el cuarto año porque no es biocompatible, se vende todo en un millón de dólares con 30% de posibilidad, o bien al confirmarse que sí es biocompatible, el precio sube a 150 mil dólares por tonelada a partir del cuarto año.

Cuadro 6. Valor actual neto de un biomaterial médico cuando se confirma su biocompatibilidad

		MILES DE DÓLARES							
Inversión intangible	1500								
Inversión tangible	500								
Ingreso		500	500	750	450	450	450	450	450
Costo		10	10	30	30	30	30	30	30
		490	490	720	420	420	420	420	420
		1	2	3	4	5	6	7	8

Fuente: elaboración propia.

El valor actual neto total cuando no hay biocompatibilidad y se vende en el cuarto año con 30% de probabilidad, y cuando sí hay biocompatibilidad y el precio sube con 70% de probabilidad se calcula:

VAN cuando no hay biocompatibilidad

$$VAN = -2000 + 426.09 + 370.51 + 473.41 + 571.75 = -158.24$$

VAN cuando sí hay biocompatibilidad

$$VAN = -2000 + 426.09 + 370.51 + 473.41 + 240.14 + 208.81 + 181.68 + 157.89 + 464.20 = 522.73$$

Valor esperado del proyecto

$$VAN = .30(-158.24) + .70(522.73) = 318.439$$

Se recomienda invertir en el proyecto de biomateriales porque el valor del proyecto es positivo 318.43 miles de dólares, significa que los beneficios son mayores que los costos. En economía este valor de 318.43 es conocido como el valor esperado del proyecto. Nótese que si no es biocompatible el material entonces con una probabilidad del 30% tendrá que vender y perder 158.24, pero si es biocompatible los beneficios serán con 70% de probabilidad de 522.73 miles de dólares.

Conclusión

Los productos de la petroquímica dañan el medio ambiente y la salud humana; tienden a ser cada vez más caros y sus precios son muy volátiles. La bioeconomía es una tendencia a sustituir los productos derivados del petróleo por bienes que se obtienen de la biomasa y que pasan por procesos de biorrefinerías.

Los proyectos de los productos de la bioeconomía, en particular las biorrefinerías, tienen particularidades económicas, tecnológicas y sociales que hacen que su evaluación financiera tenga que adecuarse a escenarios de riesgo e incertidumbre.

La metodología de las opciones reales es relativamente nueva, se empezó a usar para evaluar proyectos en escenarios de riesgo e incertidumbre a comienzos del siglo XXI (Copeland y Antikarov, 2001; Hull, 2003; Brambila, 2011b; Mascareñas *et al.*, 2004; Támara y Aristizabal, 2012; Vedovoto y Prior, 2015) y permite medir a valor actual los posibles cambios en la vida útil de éste. La evaluación financiera de proyectos de biorrefinerías con opciones reales es algo novedoso que se precisará y perfeccionará con cada nueva inversión en esta área.

Bibliografía

- Álvarez Echeverría, Francisco Antonio, Pablo López Sarabia, Francisco Venegas-Martínez (2012). “Valuación financiera de proyectos de inversión en nuevas tecnologías con opciones reales”, *Contaduría y Administración*, vol. 57, núm. 3, julio-septiembre, México: Universidad Nacional Autónoma de México, pp. 115-145.
- Awudu, Iddrisu y Jun Zhang (2013). “Stochastic production planning for a biofuel supply chain under demand and price uncertainties”, *Applied Energy*, vol. 103, pp. 189-196.
- Baca Urbina, Gabriel (2016). *Evaluación de proyectos*, México: McGraw Hill.
- Bachmann, Rolf y Jens Riese (2016). “Industrial biotech—setting conditions to capitalize on the economic potential”, en Birgit Kamm, Patrick R. Gruber, Michael Kamm (eds.), *Biorefineries-Industrial Processes and Products: Status Quo and Future Directions*. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA: cap. 16, vol. 2, pp. 445- 462.
- Bastian-Pinto Carlos, Luis Brandao, Warren J. Hahn (2009). “Flexibility as a source of value in the production of alternative fuel: the ethanol case”, *Energy Economics*, núm. 31, pp. 411-422.
- Brach, Marion A. (2003). *Real options in practice*. Estados Unidos: John Wiley & Sons.
- Brambila Paz José de Jesus (2011b). *Bioeconomía: instrumentos para su análisis económico*. México: Sagarpa/Colpos.

- Brambila Paz José de Jesus, Miguel Ángel Martínez Damián, Magdalena Rojas Rojas y Verónica Pérez-Cerecedo (2013). “La bioeconomía, las biorefinerías y las opciones reales: el caso del bioetanol y el azúcar”, *Agrociencia*, abril-mayo, 47(3), México, pp. 281-292.
- Brambila Paz, José de Jesús (2011a). *Bioeconomía, conceptos y fundamentos*. México: Sagarpa/Colpos.
- Brown, Lester R., Janet Larsin, J. Mathew Roney y Emily E. Adams (2015). *The Great Transition: Shifting from Fossil Fuel to Solar and Wind Energy*. Nueva York: Earth Policy Institute. W.W. Norton and Company.
- Chen, Qizhi y George Thouas (2015). *Biomaterials: A Basic Introduction*. Londres: CRC Press, Taylor and Francis Group.
- Copeland, Tom y Vladimir Antikarov (2001). *Real options*. Nueva York: Texere.
- De Jong, E., R. Van Ree, J.P.M. Sanders y J.W.A. Langeveld (2010). “Biorefineries: Giving Value to Sustainable Biomass Use”, *The Biobased Economy: Biofuels, Materials and Chemicals in the Post-Oil Era*. Londres: Earthscan, pp. 111-130.
- Dean, Bill, Tim Dodge, Fernando Valle y Gopal Chotani (2016). “Development of Biorefineries—Technical and Economic Considerations”, en Birgit Kamm, Patrick R. Gruber, Michael Kamm (eds.), *Biorefineries-Industrial Processes and Products: Status Quo and Future Directions*. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA: cap. 3, vol. 1, pp. 67-83.
- Downey, M.P. (2009). *Oil 101*. Estados Unidos: Wooden Table Press.
- Hull, John C. (2003). *Options, futures and other derivatives*. Nueva Jersey: Prentice Hall.
- Kamm, Birgit, Patrick R. Gruber y Michael Kamm (2010). *Biorefineries-Industrial Processes and Products: Status Quo and Future Directions*. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Klein, Naomi (2015). *This changes everything: Capitalism vs. the climate*. Nueva York: Simon & Schuster.
- Langeveld, Hans, Johan Sanders y Marieke Meeusen (eds.) (2010). *The Biobased Economy: Biofuels, Materials and Chemicals in the Post-Oil Era*. Section two biomass refining and conversion. Londres/Nueva York: Earthscan.
- Lee, Sunggyu y Yatish T. Shah (2013). *Biofuels and Bioenergy: Processes and Technologies*. Londres: CRC Press, Taylor and Francis Group.
- Mascareñas, Juan, Prosper Lamonthé, Francisco Lopez Lubian, Walther de Luna (2004). *Opciones reales y valoración de activos: como medir la flexibilidad operativa en la empresa*. Madrid: Prentice Hall.
- Mathez, Edmond A. (2009). *Climate Change: The Science of Global Warming and our Energy Future*. Nueva York: Columbia University Press.
- Mezey, Esther W. y Jon M. Conrad (2010). “Real option in resources economics”, *The annual review of resource economics*, vol. 2, pp. 33-52.
- Mun, Johnathan (2002). *Real Options Analysis: Tools and Techniques for Valuing Strategic Investments and Decisions*. Nueva Jersey: John Wiley & Sons.

- Ponting, Clive (2007). *A New Green History of the World: The Environment and the Collapse of Great Civilizations*. Londres: Vintagebooks.
- Ross, Stephen A., Randolph W. Westerfield y Bradford D. Jordan (2015). *Fundamentals of corporate finance*. Nueva York: McGraw-Hill.
- Ross, Stephen A., Randolph W. Westerfield, Jeffrey F. Jaffe y Bradford Jordan (2016). *Corporate Finance*. Nueva York: Mc Graw Hill, pp. 302-396.
- Sachs, Jeffrey D. (2015). *The Age of Sustainable Development*. Nueva York: Columbia University Press.
- Schmit, Todd M., Jianchuanluo, Loren W. Taver (2009). "Ethanol Plant Investment Using Net Present Value and Real Options Analyses", *Biomass and Bioenergy*, vol. 33, pp. 1442-1451.
- Serra Teresa, David Zilberman y José Gil (2011). "Price volatility in ethanol markets", *European Review of Agricultural Economics*, vol. 38, núm. 2, pp. 259-280.
- Támara Ayús Armando Lenin y Raúl E. Aristizabal Velasquez (2012). "Las opciones reales como metodología alternativa en la evaluación de proyectos de inversión", *Ecos de Economía*, año 16, núm. 35, julio-diciembre, Medellín, pp. 30-49.
- Vedenov, Dmitry, James A. Duffield y Michael E. Wetzstein (2006). *Journal of Agricultural and Resource Economics*, vol. 31, núm. 1, pp. 1-13.
- Vedovoto, Graciela Luzia y Diego Prior (2015). "Opciones reales: una propuesta para valorar proyectos de I+ D en centros públicos de investigación agraria", *Contaduría y Administración*, 60(1), enero-marzo, México: Universidad Nacional Autónoma de México, pp. 145-179.

Competitividad de biorrefinerías de sistemas agroindustriales

Noé Aguilar Rivera
Ricardo Serna Lagunes
Teresita de Jesús Debernardi Vázquez

Introducción

El aumento de la urbanización en todo el mundo ha dado lugar a un incremento del consumo de energía base fósil y demanda de materias primas de origen biológico, así como a la generación de residuos antropogénicos con un gran impacto sobre el medio ambiente. Por lo tanto, la producción de bioenergía y biomateriales, como nuevo paradigma industrial, tiene un potencial significativo para satisfacer una demanda cada vez mayor. En este sentido, el concepto de biorrefinería visualiza los subproductos de origen biológico, residuos agroindustriales y urbanos, valorados negativamente, como una posible materia prima renovable para producir, a partir de ellos, diversos productos comercializables a la par de la refinería petroquímica con modelos tecnológicos basados en bioprocesos (Mohan *et al.*, 2016; Kuisma *et al.*, 2013; Forster *et al.*, 2013). De acuerdo con Pérez *et al.*, (2017), la creciente población mundial y sus efectos sobre la seguridad alimentaria y energética mundial, así como las acciones de mitigación del cambio climático, son temas que requieren innovaciones tecnológicas, sociales y políticas para aumentar la eficiencia de recursos naturales, como la biomasa, entre otros, a partir de los esfuerzos de investigadores e industriales para desarrollar procesos híbridos de conversión de biomasa, cadenas de suministro y valorización de la misma para minimizar riesgos socioeconómicos y ambientales.

En este sentido, México se ha caracterizado por ser un país exportador neto de energía primaria (petróleo), pero ante diversos acontecimientos geopolíticos, en los últimos años se discuten y realizan programas para llevar a cabo una reconversión de tierras y agroindustrias que implica la generación de energías alternativas como biocombustibles y bioproductos. Debido a que México tiene potencial para

la soberanía alimentaria y energética, considerando cinco aspectos clave: *Ciclo de vida de productos y procesos, Eco diseño, Ecología industrial, Gestión ambiental y Tecnología limpia*, se hace necesario el desarrollo de estrategias y abordajes multidisciplinares para transitar hacia las biorrefinerías. En este sentido, desde los trabajos de competitividad de Porter (1990) se asume a las biorrefinerías como parte de un nuevo paradigma de desarrollo sostenible, su contribución a los términos competitividad, productividad, rentabilidad y diversificación productiva tanto de la agroindustria como de las biorrefinerías radica en contribuir al fortalecimiento de las economías regionales a partir de procesos de transformación de la materia prima agropecuaria o subproductos, preservar el medio ambiente y mitigar los efectos del cambio climático, así como reconvertir¹ la producción agropecuaria a biorrefinerías.

El objetivo del presente trabajo es analizar el potencial de diversificación, uso de subproductos y transición a biorrefinerías, en relación con la competitividad de los sistemas agroindustriales convencionales, maíz, soya y caña de azúcar.

Biorrefinerías

Kamm y Kamm (2007, 2004) elaboraron una revisión inicial de la clasificación de biorrefinerías, materias primas, esquemas tecnológicos y mercados potenciales; concluyeron que el crecimiento económico sostenible de biorrefinerías requiere un

¹ La reconversión productiva es un proceso de reestructuración de actividades productivas y gerenciales que se adaptan a las nuevas condiciones del entorno. Desde el punto de vista macroeconómico, el proceso se fundamenta en potenciar ventajas comparativas y crear ventajas competitivas con productos de alto valor agregado para el mercado interno y externo. El proceso debe: 1) transitar a la adopción de nuevos sistemas de producción y gestión empresarial que conduzcan al incremento de la competitividad de empresas a nivel local e internacional; 2) implementar proyectos que promuevan el desarrollo de nuevas actividades productivas con tecnología de punta; 3) mejorar las condiciones de seguridad alimentaria a nivel local, territorial y nacional. Para la operatividad del proceso de reconversión productiva es necesario conceptualizar las actividades productivas como complejos integrales de los sectores primarios y agroindustrial, estrechamente vinculados con la comercialización, los servicios y actividades conexas de subproductos y provisión de insumos. La reconversión productiva incrementa la productividad, añade valor agregado, diversifica la producción y/o se genera un cambio de cultivos, procesos y mercados. Su objetivo es crear sistemas agroempresariales competitivos, ambientalmente sostenibles y con responsabilidad social, lo que se traducirá en mayores ingresos y en una mejor calidad de vida de la población rural. El programa de reconversión abarca cuatro tipos de reconversión: cambios tecnológicos, conversión de cultivos, reconversión productiva y recuperación de zonas degradadas (Domínguez *et al.*, 2012).

abasto sostenible de diversas materias primas para la producción industrial. Por tanto, la reestructuración de la agroindustria en biorrefinerías, basada en materias primas de origen biomásico, requiere enfoques completamente nuevos en la investigación, innovación y desarrollo, en la producción, ciencia de los alimentos, agricultura y en la economía industrial basados en la sostenibilidad, biotecnología y la conversión química. De acuerdo con Rabaçal *et al.* (2017); Fiorentino *et al.* (2017) y Sillanpää y Ncibi (2017), la meta principal en el desarrollo de biorrefinerías se define por lo siguiente:

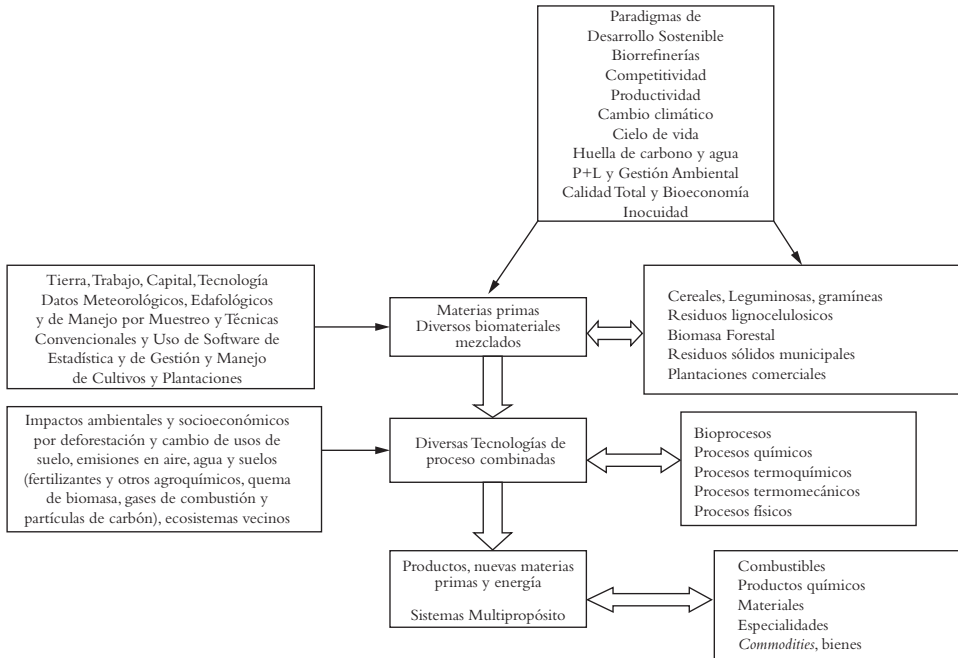
Mezcla de materias primas (biomasa) + Procesos sinérgicos (tecnologías híbridas) → Productos finales diversos (alimentos, forrajes, químicos, biofertilizantes, bioplásticos, bio-combustibles, medicinas, etcétera).

Actualmente la “biorrefinería integral” de cultivos convencionales de plantación alimentarios como maíz (*Zea mays*), soya (*Glycine max*), caña de azúcar (*Saccharum officinarum*), remolacha (*Beta vulgaris*), entre muchos otros, así como la “biorrefinería verde” y “biorrefinería de lignocelulósicos o de oleos”, son sistemas basados en la investigación y el desarrollo. A menudo, una biorrefinería es definida como el puente entre la cadena de valor de la agricultura, la química verde y los mercados (Figura 1).

México tiene un gran potencial para el uso de materias primas renovables en biorrefinerías, esto debido a que es uno de los mayores productores agrícolas y pecuarios, que genera grandes cantidades de residuos, subproductos y coproductos (Escamilla *et al.*, 2016), los cuales pueden transformarse eficazmente en energía y otros bioproductos, utilizando sistemas similares a una biorrefinería de etanol y cogeneración en ingenios azucareros, molinos de maíz, beneficios de café, cerveceras y tequileras, entre otros muchos, donde un proceso integrado implica la conversión de biomasa y diversos residuos en combustibles, energía y productos químicos (Muriillo *et al.*, 2015; Arushanyan *et al.*, 2017; Rincón *et al.*, 2014). A la par, autores como Ruiz *et al.* (2016), García y Cerutti (2016), Alemán *et al.* (2015) y Ríos y Kaltschmitt (2013) discuten los factores a favor y en contra de los actuales y futuros sistemas de bioenergía en México con énfasis en estadísticas del sector energético y su potencial en diversas regiones con tecnologías innovadoras.

El concepto de biorrefinería es considerado como uno de los pilares de investigación en los últimos años y como la mejor opción tecnológica y sostenible para transformar los diferentes sistemas de biomasa y agroindustrias convencionales monoproductivas en productos de valor agregado. Sin embargo, el aumento de la producción de biocombustibles y el desarrollo de biorrefinerías se ha vuelto controversial (Julio *et al.* 2017; Sheldon, 2014) por el intercambio “alimentos/forrajes

Figura 1. Principios básicos de una biorrefinería



Fuente: adaptado de Kamm y Kamm (2004).

y biocombustibles”. Santibáñez *et al.* (2016) evaluaron las cadenas de suministro de biomasa para biorrefinerías potenciales en México con énfasis en los costos; a su vez, López *et al.* (2017) consideraron la ingeniería básica necesaria como principal factor limitante y el acceso a fuentes de agua.

Cortés *et al.* (2014) mencionaron que un esquema de biorrefinería integrada debe responder a las siguientes cuestiones:

- Análisis del estado actual de las biorrefinerías a nivel local, regional y nacional.
- Oportunidades estratégicas para una biorrefinería si se parte de varias opciones disponibles de biomasa.
- Características principales (químicas, biológicas, térmicas, termo mecánicas) de las varias plataformas de procesos que se incluyen en la biorrefinería.
- Análisis y diseño del esquema de biorrefinería para que puedan ser maximizadas las posibilidades de integración y crear ventajas competitivas.

- Análisis de incertidumbre que incluya los cambios futuros en el mercado en el análisis y diseño del esquema de biorrefinería y realizar la selección del esquema óptimo.
- Impacto del uso del agua y la energía térmica y de potencia, así como otras políticas en el diseño y selección del esquema de biorrefinería.

Moncada y Aristizábal (2016) y Clark *et al.* (2012) llevaron a cabo una revisión sobre diferentes enfoques relacionados con el modelado y la evaluación de las biorrefinerías, considerando factores limitantes y a favor, materiales, tecnologías, rutas de procesamiento, productos y aspectos técnicos, económicos y ambientales; entendiendo la eficiencia de la biorrefinería en términos de procesamiento de biomasa. Parajuli *et al.* (2015) discuten la sostenibilidad de los sistemas de cadenas de suministro de biomasa, procesamiento de materias primas en plataformas de biorrefinería y las metodologías de evaluación de su sostenibilidad. Kołtuniewicz y Dabkowska (2016) concluyeron que en las biorrefinerías es posible fabricar todas las mercancías necesarias para mantener la civilización humana en el nivel actual.

De acuerdo con Linares y Pérez (2013), los principales conductores para el establecimiento de biorrefinerías y, en especial, los biocombustibles, son el cambio climático, la seguridad energética y el desarrollo rural. En este sentido, las biorrefinerías y bioproductos están dentro del paradigma de la bioeconomía, química verde y otros que ganan impulso político como la actual agenda 2030 de desarrollo sustentable, como estrategias de innovar para un crecimiento sostenible, evaluación del impacto ambiental actual, potencial y minimización, diferentes cadenas de valor de la bioeconomía son clave para facilitar la formulación de políticas públicas sólidas y basadas en el conocimiento. Sin embargo, el análisis de Cristóbal *et al.* (2016) concluye que la evaluación de las potenciales cadenas de valor de la bioeconomía aún es incipiente y está limitado a pocos indicadores como potencial de calentamiento global y eficiencia energética. Para Mangoyana *et al.* (2013) las biorrefinerías y los biocombustibles evolucionan como sistemas complejos que integran aspectos medioambientales, económicos y sociales, además de procesos híbridos, perspectivas, interrelaciones y mecanismos de adaptabilidad, por tanto, se requieren indicadores que holísticamente evalúen la sustentabilidad de los sistemas de biorrefinerías y determinen: i) todos los procesos, actores e incluso regulaciones involucrados en el ciclo de vida de biocombustibles y bioproductos; ii) la interrelación de subsistemas productivos, socioeconómicos, tecnológicos y ambientales, así como los impactos conexos entre distintas cadenas de valor; iii) un proceso de aprendizaje continuo y

de desarrollo de competencias para todos los actores que facilite mejorar el funcionamiento del sistema de biocombustibles, bioproductos y biorrefinerías.

Competitividad de biorrefinerías

En los últimos años, la competitividad de agroindustrias diversificadas y biorrefinerías como tal (Porter, 1990), se ha empleado en México como metodología para evaluar la capacidad de una empresa o producto que compite con otros en el mercado doméstico e internacional, y los factores que influyen los costos de producción o la estructura de su demanda, capacidad de diversificación productiva y nivel de adaptación a las nuevas condiciones del mercado, a diferencia de las ventajas comparativas referidas a recursos naturales, técnicos y de formación de capital ante las variaciones del mismo.²

En este sentido, Hendrickson *et al.* (2008) concluyeron que para la creación de ese entorno competitivo deben considerarse: 1) inversiones en I+D+I para reforzar la agroindustrialización basada en el conocimiento multidisciplinario; 2) provisión de infraestructura adecuada y de instalaciones de producción y de comercialización; 3) eliminación de las barreras no comerciales; 4) transferencia de tecnología pertinente. Conocimientos de la productividad y las técnicas de gestión y herramientas necesarias para el cumplimiento de las normas internacionales, es decir, las 5I de la competitividad (*Incentivos, Innovaciones, Inputs, Instituciones e Infraestructura*) al concebir la competitividad del sistema agroindustrial y/o biorrefinerías como un conjunto de estructuras vinculadas entre sí, y que incluyen diferentes ramas de la producción y diversos fenómenos que forman parte de una unidad técnica y económicamente homogénea, en torno a las distintas etapas por las que atraviesa

² Fuentes (1993) definió a las ventajas comparativas como aquellas situaciones relativamente permanentes y específicas originales en las condiciones naturales: clima, calidad de suelos, ubicación respecto a los mercados, y de tipo sociocultural y político, niveles salariales, habilidad de la mano de obra, estabilidad, que permiten a un país o región producir ciertas mercancías con ventajas que se reflejan en su mayor competitividad. El clima, la tierra y la mano de obra barata pueden ser factores decisivos en la competitividad cuando se trata de la producción convencional de mercancías similares; sin embargo, las nuevas tecnologías reducen significativamente el papel diferencial de aquellos factores a favor de la única ventaja sustantiva, el capital. Para las agroindustrias tradicionales como caña de azúcar, trigo, maíz, soya, avena, etcétera, la biotecnología abre una posición divergente al diseñar variedades adaptadas a un clima distinto al de la variedad original, entonces las diferencias climáticas perderán importancia.

el producto hasta llegar a su destino final (consumo industrial o humano) denominado *Cluster o sistema agroindustrial*. La competitividad de la agroindustria y/o biorrefinerías tiene vínculos entre los recursos específicos (tierra, trabajo, capital y tecnología) de cada localidad, región o nación productora, las estrategias competitivas adoptadas y el entorno externo. Sin embargo, comprender la estructura productiva de la agroindustria y/o biorrefinerías debe ser el punto de partida para las futuras estrategias competitivas e integra la visión basada en los recursos, la gestión estratégica y la perspectiva de los negocios internacionales, conceptos que ponen de relieve la interacción de procesos en el que participan los agentes (*stakeholders*) de los diferentes contextos sociopolíticos.

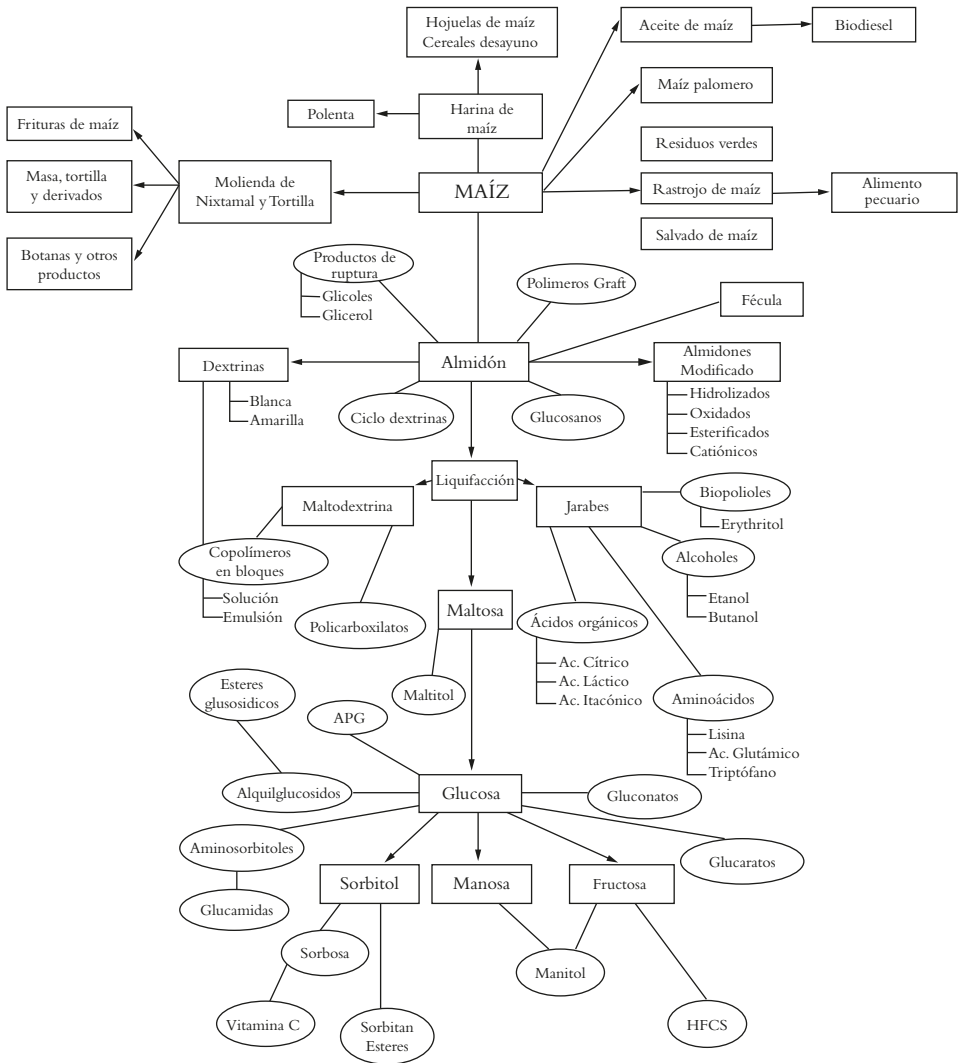
Biorrefinería del maíz

En los últimos tiempos, el maíz (*Zea mays*) se ha orientado a un uso industrial diversificado y no sólo como cultivo productor de insumos para el consumo humano y pecuario por sus características de alta eficiencia de conversión de recursos, alta producción por hectárea y composición química. En sentido amplio, la producción de biocombustibles, materiales plásticos, fibras textiles, almidón y aceites de alta calidad ofrece un gran potencial de aplicaciones en la industria y un número creciente de subproductos (Gwartz y García, 2014). Las biorrefinerías de maíz separan la materia prima en sus componentes –almidón, aceite, proteína y fibra– y las convierten en productos de mayor valor agregado y diversas aplicaciones comerciales (Figura 2).

Hoy, almidón, fécula, glucosa y dextrosa aún son los productos básicos de la industria de molienda húmeda. Los avances en ingeniería de procesos y biotecnología han permitido a las biorrefinerías convertirse en proveedores de insumos de bajo costo de alimentos básicos y componentes químicos en la apertura de nuevos mercados en todos los sectores industriales (Hendrickson *et al.*, 2008).

En los últimos años, la demanda de etanol como biocombustible ha dado lugar a un aumento significativo de la molienda de maíz; principalmente mediante dos procesos industriales: molienda húmeda y trituración seca; la semilla de maíz es fraccionada en sus componentes principales (germen, fibra y almidón); que junto al proceso de molienda seca para hojuelas de maíz (base de los cereales de desayuno) generan varias corrientes de procesos y coproductos de diferente composición y valor económico (cuadros 1 y 2).

Figura 2. Biorrefinería del maíz



Fuente: adaptado de Iowa State University (2017), Rausch y Belyea (2006) y Erickson (2004).

Cuadro 1. Derivados del maíz y subproductos según proceso de refinado

PROCESO	PRODUCTOS PRIMARIOS	COPRODUCTOS
Molienda húmeda	Almidón, Etanol, HFCS	Aceite de maíz, gluten de maíz (CGF), Harina de gluten de maíz (CGM) y CO ₂
Trituración seca	Etanol	Granos secos de destilería con solubles (DDGS), CO ₂
Trituración seca modificado	Etanol	Granos secos de destilería con solubles (DDGS), CO ₂ , aceite de maíz, fibra dietética.
Molienda seca	Hojuelas de maíz	Sólidos de mosto, harina y sémola de maíz y cascarilla.

Fuente: Rausch y Belyea (2006); Erickson (2004).

Cuadro 2. Coproductos y subproductos según proceso de refinado

Proceso	Rendimiento de productos y coproductos
Molienda	750 L Etanol o 562.6 kg Almidón o 589.4 kg HFCS y
Húmeda	26.8 kg Aceite de maíz 221.5 kg Corn Gluten Feed (CGF) 53.6 kg Corn Gluten Meal (CGM)
Trituración seca	805 L Etanol 286 kg Distillers Dried Grains with Solubles (DDGS)
Trituración seca modificado	750 L Etanol 60.7 kg germen 139.3 kg. Distillers Dried Grains with Solubles (DDGS) 67.9 kg fibra dietética
Molienda seca	120 kg hojuelas de maíz 380 kg sólidos de mosto 60 kg harina y sémola de maíz 350 kg de piensos de maíz

Fuente: Rausch y Belyea (2006).

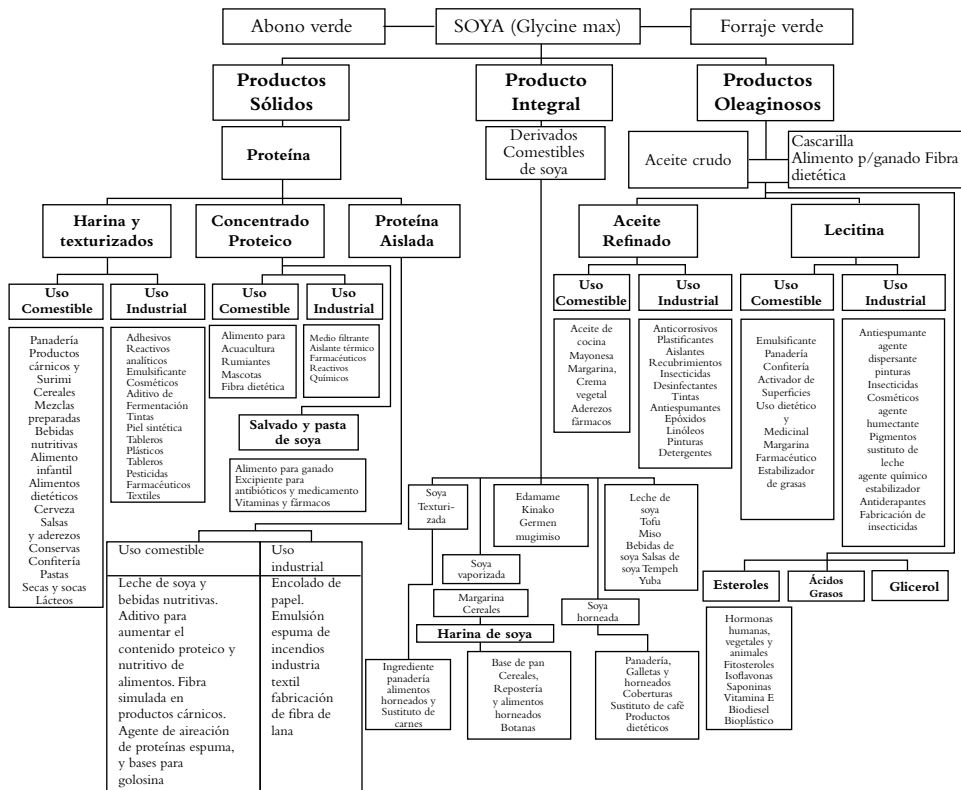
Biorrefinería de soya

La soya (*Glycine max*) es una planta de la familia de las fabáceas, crece a una altura de 120–180 cm y se cultiva en más de 50 países, se caracteriza por el alto valor proteínico de su semilla, a menudo se le denomina “el cultivo milagro” debido a sus múltiples usos. Su composición promedio es de 40% de proteínas, 20% de aceite, 35% de carbohidratos y 5% de cenizas sobre base de peso seco. Cada componente se ve afectado por el ambiente de crecimiento del cultivo y por el genotipo. Una bolsa de

50 kg de soya produce 40 kg de harina rica en proteínas y 9 kg de aceite. La soya es rica en ácidos grasos insaturados, oleico, linoleico, y linolénico que constituyen 85% del aceite; además es una buena fuente de minerales, vitaminas del complejo B, ácido fólico, y de isoflavonas para la prevención del cáncer, de enfermedades del corazón y de la osteoporosis. La proteína se utiliza principalmente para la alimentación del ganado después de la molienda de las semillas y de la extracción del aceite, el cual se utiliza principalmente para el consumo industrial (Granjoa *et al.*, 2015; Dalgaard, 2008; Lusas, 2004) (Figura 3).

La agroindustria y biorrefinerías de soya se han organizado a partir de una estrategia competitiva alrededor de dos líneas: a) el procesamiento de la soya y la obtención de subproductos alimentarios, industriales y energéticos (biodiésel); b) el

Figura 3. Derivados de la soya



Fuente: Adaptado de Iowa State University (2017), Abdulkhani *et al.* (2017), Wilson (2008), Silva (2006) y Endres (2001).

liderazgo en costos y la diferenciación de productos. Estas directrices estratégicas se describen por el tipo de mercado en el que opera la empresa y por la definición de acciones específicas para obtener competitividad (Cuadro 3).

Cuadro 3. Líneas estratégicas en la industria de la transformación de la soya

ACCIONES DE COMPETITIVIDAD	LIDERAZGO EN COSTOS	DIFERENCIACIÓN
Características del mercado o producto	<ul style="list-style-type: none"> - Pocos aspectos posibles de diferenciación - Elección impulsada por el precio - Importancia de los mercados industriales 	<ul style="list-style-type: none"> - Demanda menos elástica - Los productos de mayor valor añadido - Atributos de calidad específicos - Los mercados de consumo final
Productos	<i>Commodities</i> : cereales, salvado, aceite crudo, aceite refinado a granel, etcétera.	Productos elaborados: crema vegetal, margarina vegetal, mayonesa, aceites diferenciados etcétera.
Acciones estratégicas	<ul style="list-style-type: none"> - Búsqueda de economías de escala - La capacidad instalada - Logística eficiente - Eficiencia financiera - innovación de procesos 	<ul style="list-style-type: none"> - Segmentación del mercado - Promoción (importancia de la marca) - La innovación de productos

Fuente: Endres (2001).

Biorrefinería de caña de azúcar

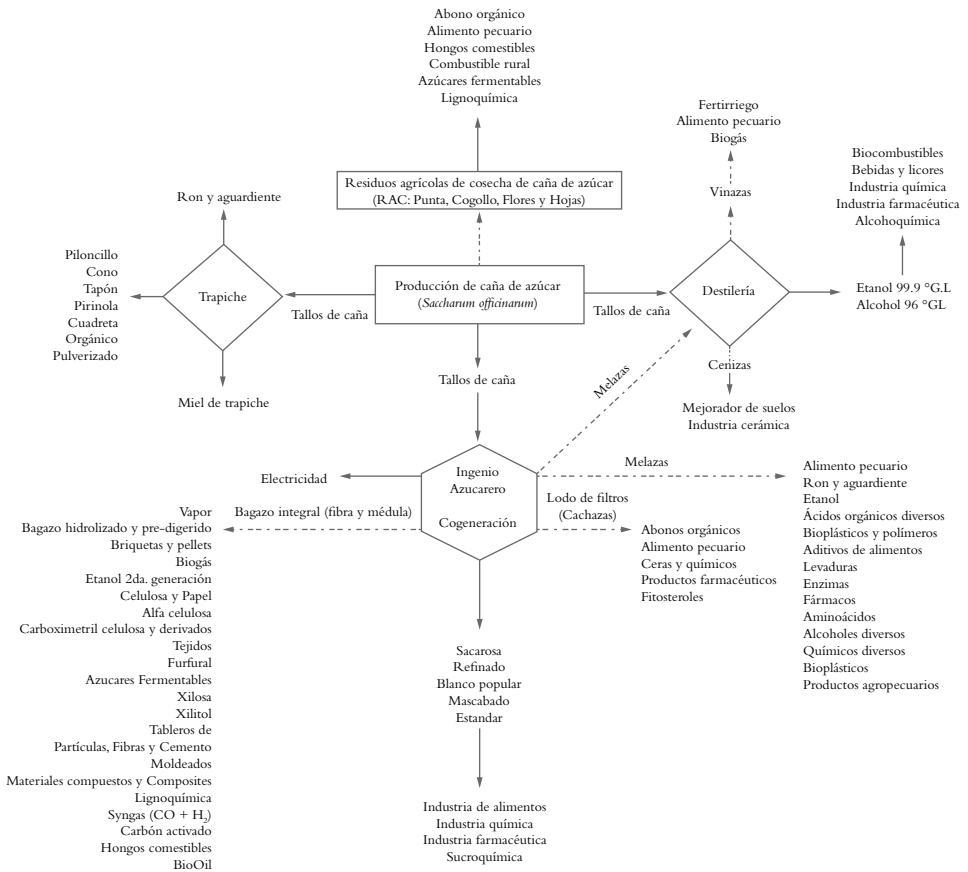
En caña de azúcar (*Saccharum officinarum*), una decisión clave es si la materia prima puede ser mejorada a partir de ingeniería metabólica y si se destinará para la co-producción de sacarosa para el sector alimentario, o sólo la caña es cultivada para usos industriales no alimentarios como el etanol combustible. En este escenario, los compuestos objetivo (derivados de la caña) deberían ser económicamente rentables y competitivos para remplazar la diferencia de valor entre la caña de azúcar para alimentos (sacarosa y melazas) y como materia prima para la fermentación industrial. En segundo lugar, los coproductos o subproductos (residuos de cosecha, bagazo, lodo de filtros, vinazas, etcétera) para ser competitivos con otras fuentes de materia prima como madera, pajas de cereales, melazas de remolacha, etcétera, tienen la inherente ventaja biológica de ser derivados de la planta de caña de azúcar como precursores abundantes generados de una agroindustria establecida, que pueden ser modificados mediante tecnología simples y métodos físicos, químicos o biológicos y la energía

para su transformación puede satisfacerse utilizando el bagazo de caña o los residuos de cosecha (Martínez *et al.*, 2016) (Figura 4).

En este sentido, el actor clave es el “Complejo sucro-agroindustrial” o biorrefinería desarrollado en Brasil, que presenta diversas aplicaciones dentro de la cadena de valor y competitividad estructurado entre tres líneas de productos: azúcar, etanol y subproductos.

México y varios países latinoamericanos establecen programas de biocombustibles y biorrefinerías basados en mercados agrícolas, materias primas y agroindustrias convencionales en el supuesto de que la producción y el uso de productos de las biorrefinerías pueden abrir nuevas oportunidades de empleo, revitalizar las

Figura 4. Integración productiva de la industria azucarera



Fuente: elaboración propia.

economías rurales y reducir la brecha en el comercio de productos de valor añadido e innovación entre países en desarrollo y países desarrollados (Pacini *et al.*, 2013).

Algunos temas pendientes para el éxito de las biorrefinerías incluyen abordar los problemas de manera sistemática y la planificación adecuada mediante el uso de sistemas de gestión ambiental a la par de instrumentos económicos para promover mejoras en el rendimiento de las agroindustrias; la innovación mediante el aprendizaje y la promoción del pensamiento multidisciplinario, así como la transferencia de información y conocimiento entre la academia y la industria son aspectos clave. Además, la sustitución de una materia prima por otra o por subproductos que son ambiental y económicamente ventajosos, sirven para reestructurar el proceso industrial desde una perspectiva ambiental con el objetivo de disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero o para optimizar diversos bioprocesos. Sin embargo, los indicadores económicos son considerados por encima de los técnicos y los medioambientales como el valor actual neto (VAN), el periodo de recuperación de inversión (PRD), la tasa interna de rendimiento (TIR) y el indicador técnico “capacidad de la planta”, son considerados fundamentales; quedando en un segundo plano, y no de forma explícita, los otros criterios de tipo técnicos y los medioambientales. Por lo anterior, es evidente que la investigación multidisciplinaria se necesita para abordar la producción sostenible de biocombustibles y bioproductos de una biorrefinería.

Zonificación agroecológica para biorrefinerías competitivas

La agricultura, como base material de las agroindustrias, diversificación y reconversión productiva y biorrefinerías, se enfrenta a la necesidad constante de ajuste y revisión de sus procesos de producción para que las empresas sean competitivas y sostenibles (Murphy *et al.*, 2011). Esto requiere el desarrollo de innovaciones en los procesos convencionales de producción de cosechas (Pretty y Bharucha, 2014). Además, las tecnologías avanzadas en la gestión agrícola (Agricultura de Precisión), tales como los sistemas de posicionamiento global (GPS), los sistemas de información geográfica (SIG), de teledetección o percepción remota (RS) y la adopción de novedosos sistemas de labranza en las prácticas agrícolas y de conservación, de fertilizantes de liberación lenta, abonos orgánicos, cartografía y la mejora de los sistemas de riego y mecanización aumentarán la eficiencia energética en la agricultura y, por tanto, en la competitividad de biorrefinerías; y, desde el punto de vista económico y social, se espera que la producción de subproductos del campo, como materia prima

para los industriales, genere empleos, especialmente en las regiones rurales (Cong y Termansen, 2016; Kircher, 2015; Chen y Zhang, 2015).

Por lo tanto, la disponibilidad de tierras, el uso bioproductivo y la infraestructura, tienen un fuerte impacto en la bioeconomía y en la huella hídrica y de carbono; debido a que la infraestructura es instalada sobre tierra, cuya capacidad productiva es utilizada o perdida para fines de desarrollo, es decir, para edificios, carreteras y similares, la construcción de biorrefinerías y la infraestructura asociada. La infraestructura bien establecida se refiere a que los camiones o un sistema ferroviario que sólo llevan la biomasa a los centros de recolección de la biorrefinería deben recorrer en cada viaje una distancia menor a 45 km (Hammond y Seth, 2013; Demirbas, 2009).

Por otra parte, Carey *et al.* (2016) establecieron que la recuperación de nutrientes agrícolas debe ser una opción clave en la operación de biorrefinerías con tecnologías para obtener una matriz de nitrógeno, fósforo y/o productos ricos en potasio de importancia para aplicaciones agrícolas. La recuperación de estos productos mediante la combinación de operaciones físicas, químicas y biológicas le dará sostenibilidad a las biorrefinerías mediante la conversión de biomasa de bajo valor en productos de mayor valor y evitará las consecuencias negativas de eutrofización, además de que esto ayuda a cerrar ciclos de nutrientes antropogénicos, proporcionando así una alternativa sostenible.

Por lo tanto, para el éxito de los proyectos de biorrefinería en México, el objetivo de una zonificación de cultivos es la identificación de áreas aptas con potenciales productivos, las cuales surgen de la sobreposición espacial de datos meteorológicos y edáficos (temperaturas, régimen de lluvias, índice de severidad a la sequía, climas, suelos, altitud, pendiente, tenencia de la tierra y otros) ya que no basta con analizar sólo al clima como factor indicativo de un cultivo. Si se tienen en cuenta la variabilidad de los factores productivos, tales como el ambiente donde se encuentra el cultivo, variedades, tipo de suelo, fertilidad, rendimientos históricos, etcétera, se puede hacer un manejo más eficiente del cultivo, permitiendo la aplicación de insumos de acuerdo con las necesidades y con el potencial de los predios agrícolas.

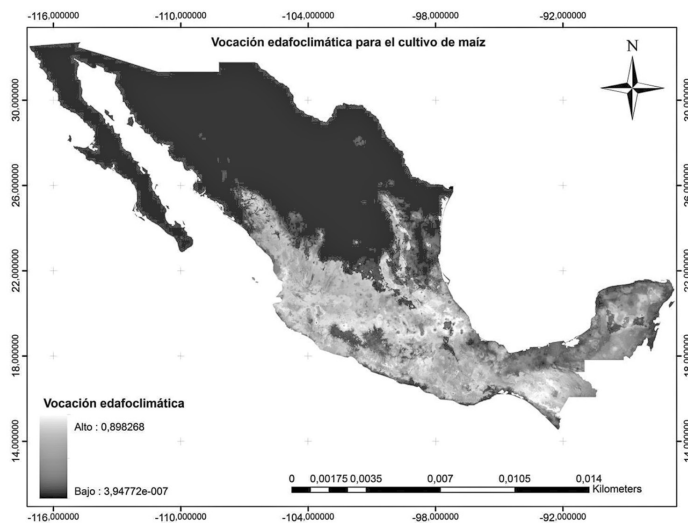
Para determinar el potencial productivo de tierras en México, para el establecimiento de biorrefinerías, es necesario determinar el potencial futuro para cultivos³ como maíz, caña de azúcar y soya, y otros como café, cítricos, cereales, forestales

³ Se usó el software MaxEnt (Phillips y Dudík, 2008), que se basa en la teoría de máxima entropía, cuyo fundamento matemático determina las variables ambientales que se intersectan en el punto de georreferencia de la presencia del cultivo, a partir de esto, estima la probabilidad promedio para cada variable ambiental que se intersecta en cada uno de los puntos de presencia del cultivo (coordenadas geográficas), sometidos en el análisis.

etcétera, y así no comprometer las cosechas para alimentos y forrajes. Las variables edafoclimáticas usadas en este estudio fueron: Bio1: Temperatura promedio anual (°C); Bio2: Oscilación diurna de la temperatura (°C); Bio3: Isotermalidad (°C); Bio4: Estacionalidad de la temperatura (°C); Bio5: Temperatura máxima promedio del periodo más cálido (°C); Bio6: Temperatura mínima promedio del periodo más frío (°C); Bio7: Oscilación anual de la temperatura (°C); Bio8: Temperatura promedio del trimestre más lluvioso (°C); Bio9: Temperatura promedio del trimestre más seco (°C); Bio10: Temperatura promedio del trimestre más cálido (°C); Bio11: Temperatura promedio del trimestre más frío (°C); Bio12: Precipitación anual (mm); Bio13: Precipitación del periodo más lluvioso (mm); Bio14: Precipitación del periodo más seco (mm); Bio15: Estacionalidad de la precipitación (mm); Bio16: Precipitación del trimestre más lluvioso (mm); Bio17: Precipitación del trimestre más seco (mm); Bio18: Precipitación del trimestre más cálido (mm); Bio19: Precipitación del trimestre más frío (mm); DEM: Modelo digital de elevación; CO: carbono orgánico, K: potasio, Mg: magnesio, CE: conductividad eléctrica; MO: materia orgánica; pH: potencial de hidrógeno; Na: sodio; Ca: calcio; SAR: relación de absorción de sodio.

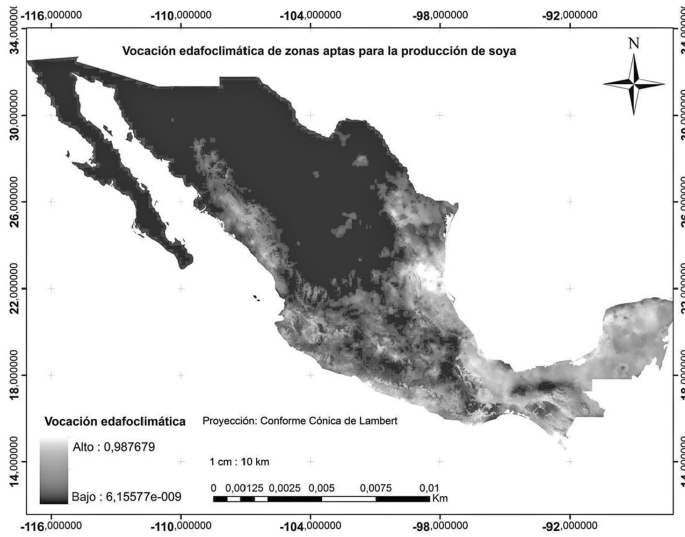
Los mapas 1, 2 y 3 representan la vocación edafoclimática del maíz, caña de azúcar y soya en México. Este mapa representa las zonas con alto potencial de desarrollo

Mapa 1. Vocación edafoclimática o zonificación agroecológica de maíz (*Zea Mays*) en México



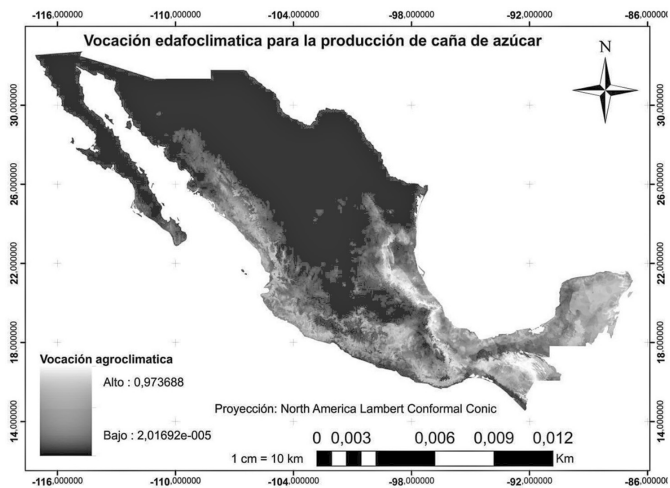
Fuente: elaboración propia.

Mapa 2. Vocación edafoclimática o zonificación agroecológica de soya (*Glycine Max*) en México



Fuente: elaboración propia.

Mapa 3. Vocación edafoclimática o zonificación agroecológica de la caña de azúcar (*saccharum officinarum*) en México



Fuente: elaboración propia.

agroecológico para el cultivo en el territorio mexicano. El color de gris-blanco dentro del polígono indica el alto potencial agroecológico del territorio (probabilidad >70%), que reúne las condiciones para el desarrollo del cultivo y conforme el gradiente de color se va tornando al color negro, indican una probabilidad baja (<70%), lo que es indicador de que estas áreas no reúnen las condiciones agroecológicas necesarias para el desarrollo del cultivo, siendo de bajo potencial.

Conclusiones

En las agroindustrias diversificadas y/o biorrefinerías se puede encontrar todo un conjunto de factores naturales, sociales, de producción, institucionales, ambientales, económicos y tecnológicos que actúan de forma complementaria y acumulativa. En el presente análisis, se presentaron tres estudios de caso –biorrefinerías de maíz, soya y caña de azúcar– ampliamente documentados como ejemplo de los efectos de políticas públicas y el desarrollo tecnológico para alcanzar la competitividad en un sistema agroindustrial y en biorrefinerías.

México tiene gran potencial para el desarrollo de biorrefinerías, el cual se demostró a partir de la modelación de la zonificación agroecológica, donde el aumento de la productividad o del rendimiento económico de agroindustrias convencionales ya establecidas, está representado por la expansión de la producción de cultivos agroindustriales. Por otra parte, la adopción de sistemas de biorrefinería competitivos está también en función de factores cualitativos como la edad, la educación, deudas de los productores, tamaño y tipología de la unidad productiva, escala económica, tipo de cultivos existentes (maíz, soya y otros), insumos (labor, combustibles, fertilizantes, herbicidas, semillas, maquinaria) y el mercado objetivo (local, regional, nacional, exportación), todos estos factores limitantes que deben evaluarse de forma sistémica y multidisciplinaria en los proyectos de biorrefinería.

Bibliografía

- Abdulkhani, A., P. Alizadeh, S. Hedjazi e Y. Hamzeh (2017). “Potential of Soya as a Raw Material for a Whole Crop Biorefinery”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, núm. 75, pp. 1269-1280.
- Alemán, G.S., A. Meneses, D.L. Cárdenas, R. Díaz, N. Scarlat, J.F. Dallemand y R. Parra (2015). “Bioenergy in Mexico: Status and Perspective”, *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 9(1), pp. 8-20.

- Arushanyan, Y., A. Björklund, O. Eriksson, G. Finnveden, M. LjunggrenSöderman, J.O. Sundqvist y Å. Stenmarck (2017). “Environmental Assessment of Possible Future Waste Management Scenarios”, *Energies*, 10(2), p. 247.
- Carey, D.E., Y. Yang, P.J. McNamara y B.K. Mayer (2016). “Recovery of Agricultural Nutrients From Biorefineries”, *Bioresource Technology*, 215, pp. 186–198.
- Chen, H.G. y Y.H.P. Zhang (2015). “New Biorefineries and Sustainable Agriculture: Increased Food, Biofuels, and Ecosystem Security”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, núm. 47, pp. 117–132.
- Cong, R.G. y M. Termansen (2016). “A Bio–Economic Analysis of a Sustainable Agricultural Transition Using Green Biorefinery”, *Science of the Total Environment*, núm. 571, pp. 153–163.
- Clark, J.H., R. Luque y A.S. Matharu (2012). “Green Chemistry, Biofuels, and Biorefinery”, *Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering*, núm. 3, pp. 183–207.
- Cortés, M.G., L.C. Gallo, Y.A. Carvajal y E.G. Suárez (2014). “La integración de procesos en el esquema de una biorrefinería”, *Revista Afinidad*, 71(568), pp. 274–278
- Cristóbal, J., C.T. Matos, J.P. Aurambout, S. Manfredi, y B. Kavalov (2016). “Environmental Sustainability Assessment of Bioeconomy Value Chains”, *Biomass and Bioenergy*, núm. 89, pp. 159–171.
- Dalgaard, R. (2008). “LCA of Soybean Meal”, *International Journal LCA*, 13(3), pp. 240–254
- Demirbas, A. (2009). “Political, Economic and Environmental Impacts of Biofuels: a Review”, *Applied Energy*, núm. 86, pp. 108–S117.
- Domínguez, J.V., N.V. Rodríguez e I.M. Infante (2012). “Fundamentos teóricos y metodológicos sobre la reconversión productiva en el sector cooperativo cañero cubano”, *Revista de Desarrollo Rural y Cooperativismo Agrario*, 2011(14), pp. 25–32.
- Endres, J.G. (2001). *Soy Protein Products: Characteristics, Nutritional Aspects, and Utilization*. The American Oil Chemists Society, núm. 61.
- Erickson, A. (2004). “The U.S. HFCS Industry: A Strong Foundation; A Strong Future”, *International Sugar Journal*, 106(1268), pp. 422–425.
- Escamilla, C., H.M. Poggi y M.T. Ponce (2016). “Bioenergy and Bioproducts from Municipal Organic Waste as Alternative to Landfilling: A Comparative Life Cycle Assessment with Prospective Application to Mexico”, *Environmental Science and Pollution Research*, pp. 1–16.
- Florentino, G., M. Ripa y S. Ulgiati (2017). “Chemicals from Biomass: Technological versus Environmental Feasibility. A Review”, *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 11(1), pp. 195–214.
- Forster, T., M.D. Berni, I.L. Dorileo y M.A. Rostagno (2013). “Biorefinery Study of Availability of Agriculture Residues and Wastes for Integrated Biorefineries in Brazil”, *Resources, Conservation and Recycling*, núm. 77, pp. 78–88.

- Fuentes A.L. (1993). “Cambios en las ventajas comparativas de la producción agrícola”, *Geografía y Desarrollo*, 53(8-9), pp. 44-53.
- García, C.A. y O.M. Cerutti (2016). *Estado del arte de la bioenergía en México*. Red Temática de Bioenergía (RTB) del Conacyt, núm. 104.
- Granjoa, J., B. Duarteb y N. Oliveira (2015). “Soybean Biorefinery: Process Simulation and Analysis”, *Chemical Engineering*, núm. 45, pp. 583-588.
- Gwartz, J.A. y M.N. García (2014). “Processing Maize Flour and Corn Meal Food Products”, *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1312(1), pp. 66-75.
- Kamm, B. y M. Kamm (2004). “Principles of Biorefineries”, *Applied Microbiology and Biotechnology*, 64(2), pp. 137-145.
- Kamm, B. y M. Kamm (2007). “Biorefineries-Multi Product Processes”, en *White Biotechnology*. Springer Berlin Heidelberg, pp. 175-204.
- Kamm, B., P.R. Gruber y M. Kamm (2007). *Biorefineries-Industrial Processes and Products*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA: 949.
- Kircher, M. (2015). “Sustainability of Biofuels and Renewable Chemicals Production From Biomass”, *Current Opinion in Chemical Biology*, núm. 29, pp. 26-31.
- Kołtuniewicz, A.B. K. Dabkowska (2016). “Biorefineries-Factories of the Future”, *Chemical and Process Engineering*, 37(1), pp. 109-119.
- Kuisma, M., H. Kahiluoto, J. Havukainen, E. Lehtonen, M. Luorinen, T. Myllymaa y M. Horttanainen (2013). “Understanding Biorefining Efficiency-the Case of Agrifood Waste”, *Bioresource Technology*, núm. 135, pp. 588-597.
- Hammond, G.P. y S.M. Seth (2013). “Carbon and Environmental Footprinting of Global Biofuel Production”, *Applied Energy*, núm. 112, pp. 547-559.
- Hendrickson J., G.F. Sassenrath, D. Archer, J. Hanson y J. Halloran (2008). “Interactions in Integrated US Agricultural Systems: The Past, Present and Future”, *Renewable Agriculture and Food Systems*, 23(4), pp. 314-324.
- Iowa State University (2017). Center for Crops Utilization Research [<http://www.ccur.ias-tate.edu/education/posters.html>].
- Linares, P. e I.J. Pérez (2013). “A Sustainable Framework for Biofuels in Europe”, *Energy Policy*, núm. 52, pp. 166-169.
- Julio, R., J. Albet, C. Vialle, C. Vaca y C. Sablayrolles (2017). “Sustainable Design of Biorefinery Processes: Existing Practices and New Methodology”, *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, núm. 11, pp. 373-395.
- López, D.C., L.F. Lira, E. Rubio, J.M. Ponce y M.M. El-Halwagi (2017). “Optimal Location of Biorefineries Considering Sustainable Integration with the Environment”, *Renewable Energy*, núm. 100, pp. 65-77.
- Lusas, E.W. (2004). “Soybean Processing and Utilization”, *Soybeans: Improvement, Production and Uses*, pp. 949-1045 [<https://dl.sciencesocieties.org/publications/books/abstracts/agronomymonogra/soybeansimprove/949>].

- Mangoyana, R.B., T.F. Smith y R. Simpson (2013). “A Systems Approach to Evaluating Sustainability of Biofuel Systems”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, núm. 25, pp. 371–380.
- Martínez, S.I., J.B. González, J.M. Ponce, F. Nápoles y M.M. El-Halwagi (2016). “Optimal Reconfiguration of a Sugar Cane Industry to Yield an Integrated Biorefinery”, *Clean Technologies and Environmental Policy*, 18(2), pp. 553–562.
- Mohan, S.V., G.N. Nikhil, P. Chiranjeevi, C.N. Reddy, M.V. Rohit, A.N. Kumar y O. Sarkar (2016). “Waste Biorefinery Models Towards Sustainable Circular Bioeconomy: Critical Review and Future Perspectives”, *Bioresource Technology*, núm. 215, pp. 2–12.
- Moncada, J. y V. Aristizábal (2016). “Design Strategies for Sustainable Biorefineries”, *Biochemical Engineering Journal*, núm. 116, pp. 122–134.
- Murphy, R., J. Woods, M. Black y M. McManus (2011). “Global Developments in the Competition for Land from Biofuels”, *Food Policy*, núm. 36, pp. 52–S61.
- Pacini, H., L. Assunção, J. Van Dam y R. Toneto (2013). “The Price for Biofuels Sustainability”, *Energy Policy*, núm. 59, pp. 898–903.
- Parajuli, R., T. Dalgaard, U. Jørgensen, A.P.S. Adamsen, M.T. Knudsen, M. Birkved y J.K. Schjørring (2015). “Biorefining in the Prevailing Energy and Materials Crisis: A Review of Sustainable Pathways for Biorefinery Value Chains and Sustainability Assessment Methodologies”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, núm. 43, pp. 244–263.
- Pérez, A.T.E., M. Camargo, P.C.N. Rincón y M.A. Marchant (2017). “Key Challenges and Requirements for Sustainable and Industrialized Biorefinery Supply Chain Design and Management: A Bibliographic Analysis”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, núm. 69, pp. 350–359.
- Phillips, S.J. y M. Dudík (2008). “Modeling of Species Distributions with Maxent: New Extensions and a Comprehensive Evaluation”, *Ecography*, 31(2), pp. 161–175.
- Porter, M. (1990). “The Competitive Advantage of Nations”, *Harvard Business Review*, pp. 73–93.
- Pretty, J. y Z.P. Bharucha (2014). “Sustainable Intensification in Agricultural Systems”, *Annals of Botany*, 114(8), pp. 1571–1596.
- Rabaçal, M., A.F. Ferreira, C.A. Silva y M. Costa (2017). *Bio-refineries*. Springer: 307.
- Rausch K.D. y R.L. Belyea (2006). “The Future of Coproducts from Corn Processing”, *Applied Biochemistry and Biotechnology*, núm. 128, pp. 47–85.
- Rincón, L.E., L.A. Becerra, J. Moncada y C.A. Cardona (2014). “Techno-Economic Analysis of the Use of Fired Cogeneration Systems Based on Sugar Cane Bagasse in South Eastern and Mid-Western Regions of Mexico”, *Waste and Biomass Valorization*, 5(2), pp. 189–198.
- Rios, M. y M. Kaltschmitt (2013). “Bioenergy Potential in Mexico—Status and Perspectives on a High Spatial Distribution”, *Biomass Conversion and Biorefinery*, 3(3), pp. 239–254.

- Ruiz, H.A., A. Martínez y W. Vermerris (2016). “Bioenergy Potential, Energy Crops, and Biofuel Production in Mexico”, *BioEnergy Research*, 9(4), pp. 981-984.
- Santibáñez, J.E., R. Morales, J.B. González y J.M. Ponce (2016). “Stochastic Design of Biorefinery Supply Chains Considering Economic and Environmental Objectives”, *Journal of Cleaner Production*, núm. 136, pp. 224-245.
- Sheldon, R.A. (2014). “Green and Sustainable Manufacture of Chemicals from Biomass: State of the Art”, *Green Chemistry*, 16(3), pp. 950-963.
- Sillanpää, M. y C. Ncibi (2017). “Biorefineries: Industrial-Scale Production Paving the Way for Bioeconomy”, en *A Sustainable Bioeconomy*. Cham: Springer, pp. 233-270.
- Silva M.S. (2006). “Composição Química e Valor Protéico do Resíduo de Soja em Relação ao Grão de Soja”, *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, 26(3), pp. 571-576.
- Wilson, R.F. (2008). “Soybean: Market Driven Research Needs”, en *Genetics and Genomics of Soybean*. Nueva York: Springer, pp. 3-15.

Criterios de evaluación técnico-económico-ambiental para la selección de productos y el diseño de biorrefinerías

Teresa López Arenas
Omar Anaya Reza

Introducción

Durante la última década, el número de productos obtenidos mediante procesos biotecnológicos ha aumentado continuamente. Estos bioprocesos comúnmente ayudan a reducir el consumo de energía y la generación de residuos, a menudo sus productos son biodegradables e incluso permiten la síntesis de algunos que no son posibles químicamente (Hatti-Kaul *et al.*, 2007). Entre los bioproductos (o productos biotecnológicos) obtenidos por fermentación de azúcares por los microorganismos se encuentran aminoácidos, combustibles, biopolímeros, enzimas, ácidos orgánicos, vitaminas, antibióticos, suplementos para alimentos, fertilizantes, entre otros. El mercado mundial de productos derivados de la fermentación fue de 16 mil millones de dólares en 2009 (De Jong *et al.*, 2012) y se estimó un aumento a \$19.7 mil millones en 2016 (Biddu *et al.*, 2016).

Una biorrefinería es una estructura que integra procesos de conversión de biomasa y equipamiento para producir combustibles, energía y productos químicos. Se considera que biomasa como recurso renovable produce un balance neutro de CO₂, siendo así una de las materias primas alternativas más prometedoras. Por lo cual, ha crecido el interés general en la producción sostenible de productos químicos y materiales a partir de biomasa. La sustitución de productos químicos derivados del petróleo por aquellos obtenidos de la biomasa ayudará a tener un papel clave para sustentar el crecimiento de la industria química (Yuan *et al.*, 2013). Contrariamente a los recursos petroleros que están limitados en la composición, los biorrecursos se componen de compuestos heterogéneos tales como celulosa, hemicelulosa, aceites, lignina, almidón y proteínas. Cada constituyente de la biomasa puede ser

utilizado para producir fracciones de bioproductos. De modo que debe desarrollarse un conjunto complejo de tecnologías específicas para hacer eficiente cada fracción de biomasa en productos de valor agregado. Sin embargo, se precisa aún de desarrollos tecnológicos que permitan obtener estos productos a un costo menor y de una manera más eficiente.

Importancia del diseño conceptual de las biorrefinerías

La producción de multiproductos de alto valor agregado en una biorrefinería mejora la economía del proceso de producción, minimiza la descarga de desechos y el consumo energético, y reduce la dependencia de productos petroleros. De manera que las biorrefinerías ofrecerán nuevas oportunidades económicas para la agricultura y la industria química (Fitzpatrick *et al.*, 2010). Sin embargo, la elección de la materia prima y los productos finales, así como de la tecnología de procesamiento, son importantes en el diseño de la biorrefinería debido a las implicaciones de producción a gran escala. Por lo tanto, en la próxima década, será fundamental la investigación básica y aplicada en esta área.

Las biomásas provienen de productos agrícolas altamente variables, y cuya variedad depende de las condiciones climáticas y la región de procedencia. Las cepas o levaduras son microorganismos, cuyo desempeño para convertir los azúcares en bioproductos (en la etapa de fermentación) está sujeto a la concentración de azúcares y de agentes estresantes tales como la temperatura y concentración de nutrientes. Éstos y otros factores crean un impacto directo en la producción final de los bioproductos. En particular, un mejor conocimiento de los mecanismos de las etapas reactivas podría permitir la selección, diseño, optimización y control del proceso, que permitirían acoplar una materia prima con una configuración adecuada de diseño de la biorrefinería (Mosier *et al.*, 2005).

Desde el punto de vista del diseño de biorrefinerías, hasta el momento existen diversas publicaciones que se han enfocado a: estudios cinéticos de las etapas de fermentación, efecto de algunas condiciones de operación, diseños a nivel laboratorio y piloto, o evaluaciones técnico-económicos-ambientales. Sin embargo, no hay trabajos publicados que consideren el diseño integral involucrando estudios dinámicos, alternativas de diseño del proceso, análisis de los posibles productos de una biorrefinería y sus implicaciones en las evaluaciones técnicos-económicos-ambientales.

Siendo que el diseño y la síntesis de procesos desempeñan un papel clave en el desarrollo de tecnologías innovadoras y rentables, se requiere establecer criterios

técnicos, económicos y ambientales que permitan estudiar las alternativas para el diseño conceptual de biorrefinerías sostenibles. La mayoría de los diseños conceptuales de biorrefinerías reportados consideran como principal producto un biocombustible y pocos reportes consideran la inclusión de otros bioproductos, como son los precursores de la industria alimentaria (como ácido cítrico, ácido láctico, levadura de pan) o biopolímeros (como el polihidroxibutirato –PHB–, y el ácido poliláctico –PLA). El Cuadro 1 muestra algunos trabajos publicados recientemente en relación con este tema.

Cuadro 1. Publicaciones recientes de evaluaciones técnicas, económicas y ambientales para biorrefinerías

REFERENCIA	MATERIA PRIMA	SIMULADOR	ESTUDIO	PRODUCTO
Moncada <i>et al.</i> (2015)	Bagazo de caña de azúcar	Aspen Plus	TEA	Etanol y PHB
Tao <i>et al.</i> (2014)	Rastrojo de maíz	Aspen Plus	TEA	Bioetanol y butanol
Qureshi <i>et al.</i> (2013)	Paja de trigo	SuperPro Designer	TE	Butanol
Cavalett <i>et al.</i> (2012)	Caña de azúcar	Aspen Plus	TEA	Etanol
Taras y Woinaroschy (2012)	Glucosa	SuperPro Designer	TEA	L-lisina
Posada <i>et al.</i> (2011)	Glicerol	Aspen Plus	TE	PHB
Stephenson <i>et al.</i> (2010)	Residuo lignocelulósico	Aspen-Hysys	TEA	Etanol
Woinaroschy y Taras (2009)	Almidón	SuperPro Designer	S	Ácido cítrico
Quintero <i>et al.</i> (2008)	Azúcar de caña y maíz	Aspen Plus	TE	Etanol
Heinzle <i>et al.</i> (2007)	Glucosa	SuperPro Designer	TE	L-lisina o ácido cítrico

S: simulación del proceso, T: evaluación técnica, E: evaluación económica, A: evaluación ambiental.
Fuente: elaboración propia.

Para realizar los análisis técnico-económicos de las biorrefinerías, los simuladores de procesos modulares (tales como *Aspen Plus*, *Pro/II*, *Chemcad*, *SuperProDesigner*, etcétera) ofrecen un entorno de modelado fiable y riguroso mediante la evaluación de balances de materia y energía a partir de diagramas de flujo de proceso. Estos simuladores, cuyas características se pueden encontrar en varias referencias (Seider *et al.*, 2009; Turton *et al.*, 2008), contienen bases de datos extensas de propiedades de componentes puros, bibliotecas de operaciones unitarias, bancos de datos para modelos termodinámicos y cinéticos, algoritmos para la solución de sistemas de ecuaciones no lineales, y en algunos casos modelos económicos y ambientales. Por lo que los simuladores de procesos proporcionan la oportunidad de resolver modelos realistas de plantas a gran escala, de manera sistemática, rápida y confiable.

Las mejoras obtenibles mediante investigación y desarrollo, y en particular empleando herramientas de modelado, simulación, monitoreo y control, constituyen opciones abiertas para mejorar la competitividad del proceso; ya que permiten hacer estudios para:

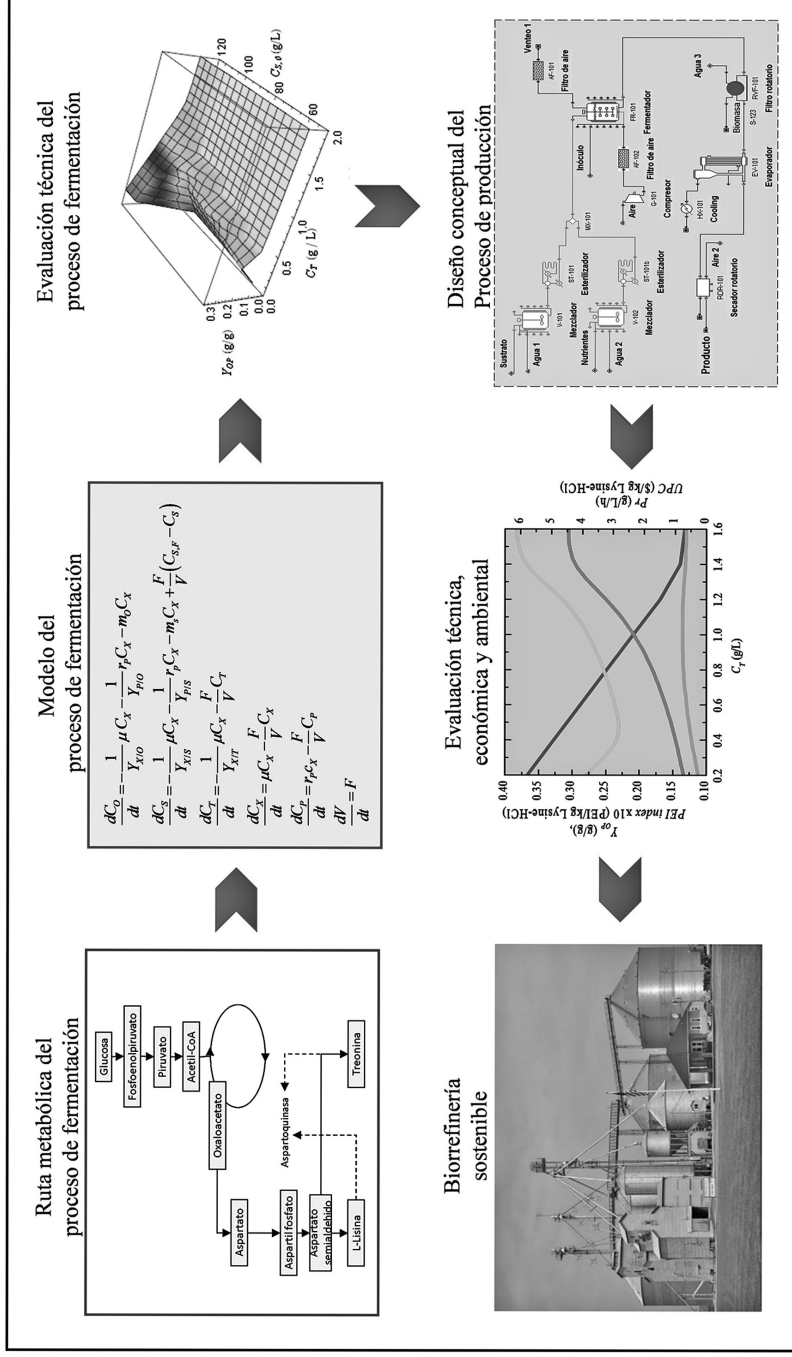
- a) Evaluar el mecanismo cinético de las fermentaciones (tecnología de producto).
- b) Evaluar diferentes alternativas de síntesis de reacción para aumentar los rendimientos de biomasa-producto, sin necesidad de realizar e invertir en experimentación exhaustiva (tecnología de producto).
- c) Analizar las condiciones de operación de los procesos mediante análisis en estado estacionario y dinámico para obtener altas productividades (tecnología de operatividad de proceso).
- d) Determinar el diseño a diferentes escalas y sus condiciones de operación para reducir consumos de energía, emisiones al medio ambiente y costo de producción (tecnología de equipo y operatividad de procesos).
- e) Diseñar e implementar sistemas automáticos de monitoreo, control y detección de fallas (tecnología de automatización).

Cada uno de estos aspectos debe evaluarse e integrarse para determinar el diseño conceptual de una biorrefinería (Figura 1). Involucrando el análisis de procesos multiescala, pasando por una escala molecular para determinar los mecanismos cinéticos (o rutas metabólicas) de reacción, otra escala macroscópica para determinar las mejores condiciones de cada una de las operaciones unitarias, hasta una escala industrial para determinar la factibilidad económica y el impacto ambiental.

Metodología de evaluación técnico-económico-ambiental

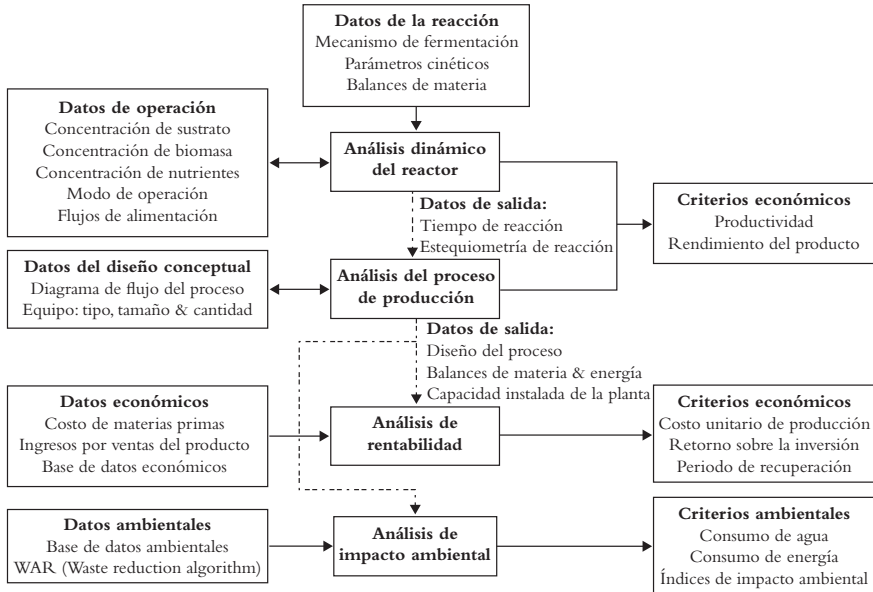
Anteriormente la comercialización de productos nuevos o mejorados se basaba generalmente en el análisis económico, como una herramienta durante el desarrollo del proceso y para la toma de decisiones sobre el diseño del proceso. Ahora existe una exigencia mundial para la implementación de tecnologías sostenibles y ambientalmente atractivas. En esta sección se presenta un enfoque metodológico basado en criterios técnicos, económicos y ambientales, que puede apoyar la toma de decisiones en el diseño y operación de las biorrefinerías (Anaya y López, 2017). Los pasos

Figura 1. Resumen gráfico de la metodología de evaluación de una biorrefinería: desde la escala molecular hasta la escala industrial



Fuente: elaboración propia.

Figura 2. Metodología para la evaluación integral de una biorrefinería



Fuente: Anaya y López (2017).

principales del enfoque propuesto (Figura 2) y la definición de criterios de evaluación se describen en las subsecciones siguientes.

Análisis dinámico del reactor

Una biorrefinería consta principalmente de tres secciones: procesamiento aguas arriba, reacción y procesamiento aguas abajo. La primera etapa considera el acondicionamiento de la materia prima, la segunda considera la conversión de materia prima en producto, y la última considera la separación y purificación de (los) producto(s). Puesto que la reacción es el corazón de la biorrefinería, se requieren hacer esfuerzos constantes para mejorar los procesos de fermentación con el fin de lograr la máxima eficiencia y producir el mayor rendimiento del producto, incluyendo: *a)* la búsqueda de cepas nuevas o modificadas genéticamente, para aumentar sus características de productividad intrínseca; *b)* mejorar la operación del proceso modificando la agitación, suministro de oxígeno, temperatura, pH, etcétera; *c)* optimizar los medios de

cultivo, determinando las concentraciones iniciales de azúcares e influencia de los principales nutrientes y aditivos; y *d*) determinar configuraciones de procesamiento aguas abajo, para aumentar la recuperación y la pureza del producto acabado (Anastasiadis, 2007). El punto *a*) es una tarea para la biotecnología, que no es el tema de este trabajo. Mientras que los puntos *b*) y *d*) están relacionados con la ingeniería de procesos y se abordan en la metodología propuesta.

La reacción de fermentación se lleva a cabo comúnmente en un reactor de tanque agitado. Los modos de operación de éste pueden ser en modo lote (ML) o modo lote alimentado (MLA). En un ML, primero se cargan en el fermentador todos los sustratos, nutrientes y microorganismos, se esterilizan antes de que comience el proceso y luego se retira todo el material al final de la reacción. Para un MLA, inicialmente las células se cultivan bajo un régimen ML durante algún tiempo, normalmente hasta cerca del final de la fase de crecimiento exponencial. En este punto, una solución de sustratos es alimentada al fermentador, sin la eliminación del medio de cultivo. Este alimento debe estar suficientemente equilibrado para mantener el crecimiento de los microorganismos a una tasa de crecimiento específico deseada y reducir simultáneamente la producción de subproductos (que pueden generar efectos inhibitorios para el crecimiento del microorganismo o la producción del producto). Cabe señalar que no se considera el modo de operación continuo, ya que las fermentaciones continuas a escala industrial tienen debilidades como inestabilidad microbiológica o contaminación, y dificultades técnicas como menor concentración de productos finales, procesamiento aguas abajo más complicado, limitaciones de mezcla y transferencia de oxígeno durante periodos largos, y los procesos continuos requieren un alto consumo de energía para mantener la esterilidad a largo plazo (Anastasiadis, 2007; Li *et al.*, 2014).

En ambos modos de operación (ML y MLA), las concentraciones de material cambian continuamente con el tiempo, de manera que el reactor es un sistema en estado inestable, a pesar de que se asume que el medio en el reactor está bien mezclado y las condiciones son uniformes en todo instante. Existen diversos factores que intervienen en la operación y el control de reactores ML o MLA, que pueden ser investigados experimentalmente o por simulación utilizando un modelo dinámico del reactor de fermentación basado en los balances de energía y masa.

En esta etapa de análisis, se puede resolver un modelo dinámico del reactor aprovechando las herramientas computacionales, mediante el uso de simuladores orientados a la resolución de ecuaciones (como *Matlab*, *Mathematica*, *Maplesoft*, etcétera). Con ventajas tales como la reducción de costos de materiales y equipos, respuesta rápida y eficiente, y reutilización tanto de los modelos como de los resultados. En

esta etapa, el interés es estudiar el efecto del modo de operación, así como las condiciones iniciales en el reactor (tales como concentraciones iniciales de sustratos y nutrientes) y las condiciones de operación (tales como el volumen del reactor, la estrategia de flujo de alimentación, la influencia del oxígeno disuelto) para aumentar el rendimiento y la productividad del producto. Sin embargo, a menudo el aumento en la productividad provoca una disminución en el rendimiento de producto (como se ejemplificará más adelante con el caso de estudio de la producción de L-lisina). Por lo tanto, las condiciones de operación deben definirse para mantener un equilibrio entre estos dos criterios técnicos.

Análisis del proceso global de producción

El diseño conceptual, que se refiere al diseño industrial prefinal, es el conjunto de alternativas tecnológicas y de diseño que pueden existir en el mercado o pueden ser creadas. En esta etapa de análisis es necesario definir el diagrama de flujo del proceso, limitando las condiciones de operación en cuanto a los posibles materiales de uso, diseño y dimensiones del equipo, ciclo de procesamiento o restricciones. También se deben establecer evaluaciones preliminares de costos y de impacto ambiental para determinar la viabilidad y, si es posible, la optimización del proceso de producción.

Como se mencionó, el diseño conceptual de una biorrefinería puede dividirse en tres secciones: *a)* procesamiento aguas arriba, que consiste en el acondicionamiento de la materia prima y la preparación del medio de cultivo, donde se añaden sustratos y nutrientes, se diluye y esteriliza, satisfaciendo los requerimientos de crecimiento y producción microbianos; *b)* la etapa de reacción de fermentación, donde se realiza la conversión de las materias primas en producto(s), tal como se ha descrito en la subsección anterior; y *c)* procesamiento aguas abajo, donde se requieren varias operaciones unitarias para la separación de biomasa, deshidratación y purificación del producto (cuanto más puro es el producto terminado, más complejo y costoso es el diseño del proceso).

Para esta etapa de análisis se recomienda desarrollar e implementar un diagrama de detalle para una biorrefinería a escala industrial en un simulador modular de procesos (como *Aspen Plus*, *SuperPro Designer*, u otro), para evaluar los balances de masa y energía en estado estacionario, con el fin de: i) verificar si el diseño conceptual alcanza los mismos valores de productividad y rendimiento de producto obtenidos a partir del análisis del reactor (u operación unitaria), y ii) examinar los factores de

diseño, como el tipo, el número y el tamaño del equipo, la capacidad instalada en términos de producción, etcétera.

Análisis de rentabilidad

Las medidas de rentabilidad desempeñan un papel crucial para ayudar a seleccionar las mejores alternativas del diseño conceptual de la biorrefinería. Para realizar el análisis de rentabilidad se debe seleccionar un modelo económico y sus correspondientes criterios de evaluación. Aquí se recomiendan como medidas de rentabilidad: el costo de producción unitario (CPU), la tasa de retorno sobre la inversión (RSI) y el periodo de recuperación (PR) de la inversión. Estos criterios de rentabilidad (que no incluyen el descuento de flujo de efectivo) proporcionan una visión instantánea de la economía del proceso y se utilizan con frecuencia para hacer estimaciones preliminares cuando se comparan diagramas de flujo alternativos durante la etapa de síntesis del diseño del proceso. No obstante, podrían emplearse criterios de rentabilidad más rigurosos, en los que se considere el flujo de efectivo (como el método del valor presente neto, VPN, o la tasa interna de retorno, TIR) para que la administración pueda tomar una decisión final sobre la viabilidad financiera de proceso potencial (Seider *et al.*, 2009).

Para calcular los criterios de CPU, RSI y PR, primero se requieren definir algunos conceptos involucrados en la generación de los informes de rentabilidad:

- Inversión total de capital se refiere a los costos fijos asociados con el proceso. Se calcula como la suma de capital fijo directo (incluyendo equipo, instalación, tubería, instrumentación y otras cuestiones relacionadas con los edificios y la construcción), capital de trabajo (incluyendo los fondos necesarios para operar el negocio, tales como los costos de mano de obra, material y servicios públicos), y los costos de puesta en marcha.
- El costo anual de operación incluye costos relacionados con la demanda de todos los recursos, tales como materias primas, suministros, mano de obra, agentes de transferencia de calor y servicios de energía, eliminación de desechos, etcétera. Este concepto tiene en cuenta la depreciación del equipo.
- Los ingresos totales consisten en todos los ingresos asociados con la operación de una planta, incluyendo los ingresos por la venta de productos primarios y secundarios.
- La ganancia neta se calcula como la ganancia bruta anual menos los impuestos anuales más la depreciación anual.

Utilizando estos conceptos, se pueden evaluar los criterios de rentabilidad como sigue:

- El CPU se calcula dividiendo el costo de operación anual entre la tasa de ingresos del producto principal. Cuanto menor sea el CPU, mayor será la rentabilidad del proceso.
- El RSI es una medida utilizada para evaluar la viabilidad de una inversión o para comparar la rentabilidad de una serie de inversiones diferentes. Se calcula dividiendo la ganancia neta anual entre la inversión total de capital. Típicamente, el RSI deseado por las compañías está entre 15–20% (Seider *et al.*, 2009).
- El PR es el tiempo requerido después de la puesta en marcha para que la inversión total de capital sea recuperada por la ganancia neta acumulada. Se calcula dividiendo la inversión total de capital entre la ganancia neta anual. Por lo general, las empresas prefieren un PR menor a 4 años, de lo contrario no se considera que la inversión sea rentable (Seider *et al.*, 2009).

La evaluación del análisis de rentabilidad puede realizarse en hojas de cálculo a partir de los balances de masa y energía del diseño conceptual, o puede llevarse a cabo sistemáticamente en simuladores de procesos.

Análisis de impacto ambiental

Es necesario identificar y evaluar el impacto ambiental de los procesos de producción. Existen varias propuestas en la literatura para los criterios ambientales, de las cuales aquí se consideran cinco índices definidos por: el consumo de agua de proceso, la cantidad de emisiones de CO₂, el consumo de energía, los requerimientos de agentes de transferencia de calor (tales como vapor y agua de enfriamiento) y un índice de impacto global obtenido del algoritmo *Waste Reduction* (WAR) (Young y Cabezas, 1999).

Por una parte, el consumo de agua de proceso tiene su impacto en la escasez de agua y la degradación de los ecosistemas. Mientras que las emisiones de CO₂, el consumo de energía y los agentes de transferencia de calor son factores que contribuyen al calentamiento global. Por otra parte, los procesos industriales requieren energía en varias formas (energía mecánica, electricidad, vapor, agua caliente, etcétera) con un alto impacto económico y ambiental. La energía se adquiere de un

proveedor externo (comúnmente relacionado con la combustión de un combustible), mientras que la calefacción se produce en el sitio a partir de la combustión de combustibles fósiles. Así que, a mayor consumo de energía, mayor será la liberación de dióxido de carbono.

En una biorrefinería, el agua de proceso se utiliza principalmente en la dilución de materias primas y nutrientes para obtener la concentración requerida para el medio de cultivo. Mientras que los agentes de transferencia de calor se utilizan para calentar y enfriar los equipos de procesamiento, así como para el lavado. El vapor se utiliza para la esterilización, evaporación, secado y actividades de limpieza. El agua de refrigeración es necesaria para esterilizar y mantener la temperatura del fermentador. Mientras que el agua de enfriamiento se utiliza principalmente en la etapa de purificación. Cuando se requiere una mayor cantidad de agua, hay problemas importantes en la separación y purificación del producto. Por lo tanto, sería necesario emplear más equipo, y aumentarían los costos de operación, la inversión y la energía.

El último criterio de impacto ambiental es definido y evaluado de acuerdo con el algoritmo WAR (Young y Cabezas, 1999). Este algoritmo, diseñado por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (US-EPA), se basa en la determinación del índice de *Impacto Ambiental Potencial* (PEI por sus siglas en inglés), una cantidad conceptual que representa el efecto o impacto promedio que las emisiones de masa y energía tendrían sobre el ecosistema si fueran simplemente emitidas al medio ambiente. Este algoritmo considera ocho categorías de impacto ambiental, que se pueden dividir en dos áreas principales: 1) área toxicológica (potencial de toxicidad humana por ingestión, HTPI, potencial de toxicidad humana por exposición, HTPE, potencial de toxicidad terrestre, TTP y potencial de toxicidad acuática, ATP) y 2) área atmosférica (potencial de calentamiento global, GWP, potencial de agotamiento de la capa de ozono, ODP, potencial de oxidación fotoquímica, PCOP y potencial de acidificación, AP). Se evalúa un índice de impacto para cada categoría, *Iout*, en unidades de PEI/kg de producto. De manera que el índice global de PEI es la suma ponderada de todos los índices de impacto individuales, lo que permite comparar diferentes alternativas de proceso basadas en el impacto ambiental potencial emitido por el proceso por unidad de masa de productos o por unidad de tiempo. Cuanto menor es el índice de impacto global del proceso, más favorable es para el medio ambiente.

El software WAR GUI (interfaz gráfica de usuario del algoritmo WAR), de libre disposición, soporta la evaluación de los índices de impacto, lo que permite la entrada de datos de un proceso industrial y con ello calcula el PEI. Los datos necesarios

para WAR GUI son: *a)* el caudal y la composición de cada corriente que entra y sale del proceso, obtenidos de los balances de materia; y *b)* los impactos ambientales potenciales individuales de los componentes, los cuales están incluidos en su propia base de datos WAR GUI.

Caso de estudio: biorrefinería de caña de azúcar

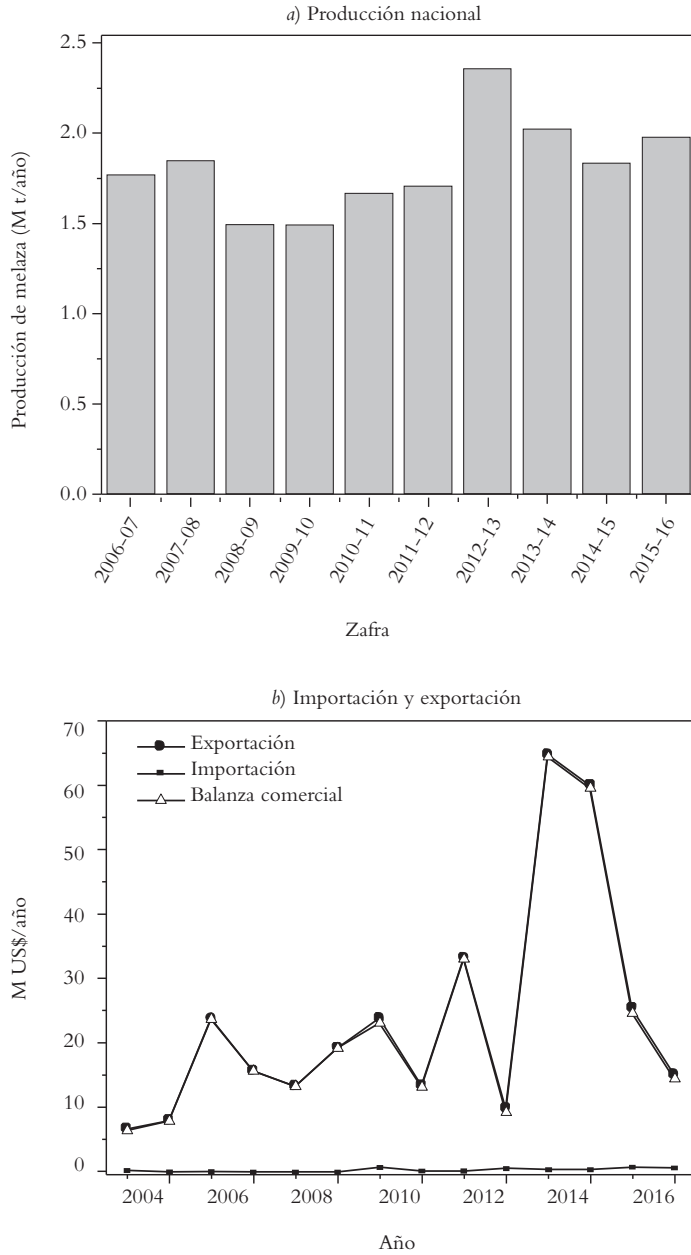
En las siguientes subsecciones se aplica la metodología propuesta para la evaluación técnico-económico-ambiental de una biorrefinería multiproducto a partir de melaza de caña de azúcar. Para ejemplificar la metodología se presenta el análisis integral considerando L-lisina y ácido láctico como productos principales, y biomasa como producto secundario (cuyo uso es como alimento para animales).

a) Selección de la materia prima de la biorrefinería

Para países como México, la conversión o adaptación (*retrofitting*) de los ingenios azucareros en biorrefinerías es una oportunidad potencial, ya que la industria nacional de azúcar tiene serios problemas de operación y rentabilidad; pero aun así es de gran importancia en la industria alimentaria rural, por su contribución económica y nutricional. En la zafra 2015/2016 la molienda de caña de azúcar bruta fue de más de 54 millones de toneladas. Entre los principales residuos de importancia económica obtenidos de la molienda está la melaza. La distribución del uso de la melaza es alrededor de 35% en la producción de etanol, 24% en los piensos (suplemento en la alimentación de ganado rumiante), 14% para la producción de levadura (proteína unicelular) y 29% para exportación (Viniestra, 2009). Sin embargo, la melaza en la producción de caña de azúcar puede llegar a representar un problema, incluso de contaminación ambiental por los ingenios azucareros; por lo cual resulta importante su uso como fuente de alimentación, pero más aún usarla en procesos alternativos para generar subproductos que permitan la diversificación de ingresos para los participantes en esta agroindustria (Conadesuca, 2016a).

La producción nacional de melaza de la zafra 2006/2007 a la 2015/2016 ha tenido una tasa de crecimiento de 10.5% (Figura 3a). La menor producción ocurrió en la zafra 2009/2010 con 1.4 millones de toneladas, y la mayor en la zafra 2012/2013 con 2.3 millones de toneladas (Conadesuca, 2016b). Además, México es un exportador neto de melaza de caña con un mínimo de importaciones (Figura 3b). La balanza

Figura 3. Información económica de la melaza en México



Fuente: elaboración con datos de Conadesuca (2016).

comercial ha mostrado un crecimiento anual, a pesar de algunos descensos y de mantener una producción anual de melaza casi constante.

La melaza tiene un alto contenido de azúcares y es un insumo de bajo costo (con un costo promedio de 0.15 \$US/kg), por lo que es una alternativa para biorrefinerías. La melaza es el residuo de cristalización final del proceso de extracción del azúcar, del que no se puede obtener más azúcar por métodos físicos. El proceso de producción de azúcar en un ingenio azucarero se muestra en la Figura 4; en dicho proceso para la extracción de azúcar se utiliza cal (óxido e hidróxido de calcio), y el líquido purificado se cocina por pasos en cristalizadores con el fin de eliminar el agua y para formar cristales de azúcar. El líquido espeso con cristales se centrifuga, y los cristales de azúcar y melaza (líquido espeso de color marrón) se separan. La melaza contiene entre 73–80% de materia seca, y su composición está alrededor de 35% sacarosa, 15% glucosa, 4.5% compuestos nitrogenados, y el resto de otros compuestos inertes o no fermentables (Conadesuca, 2016b).

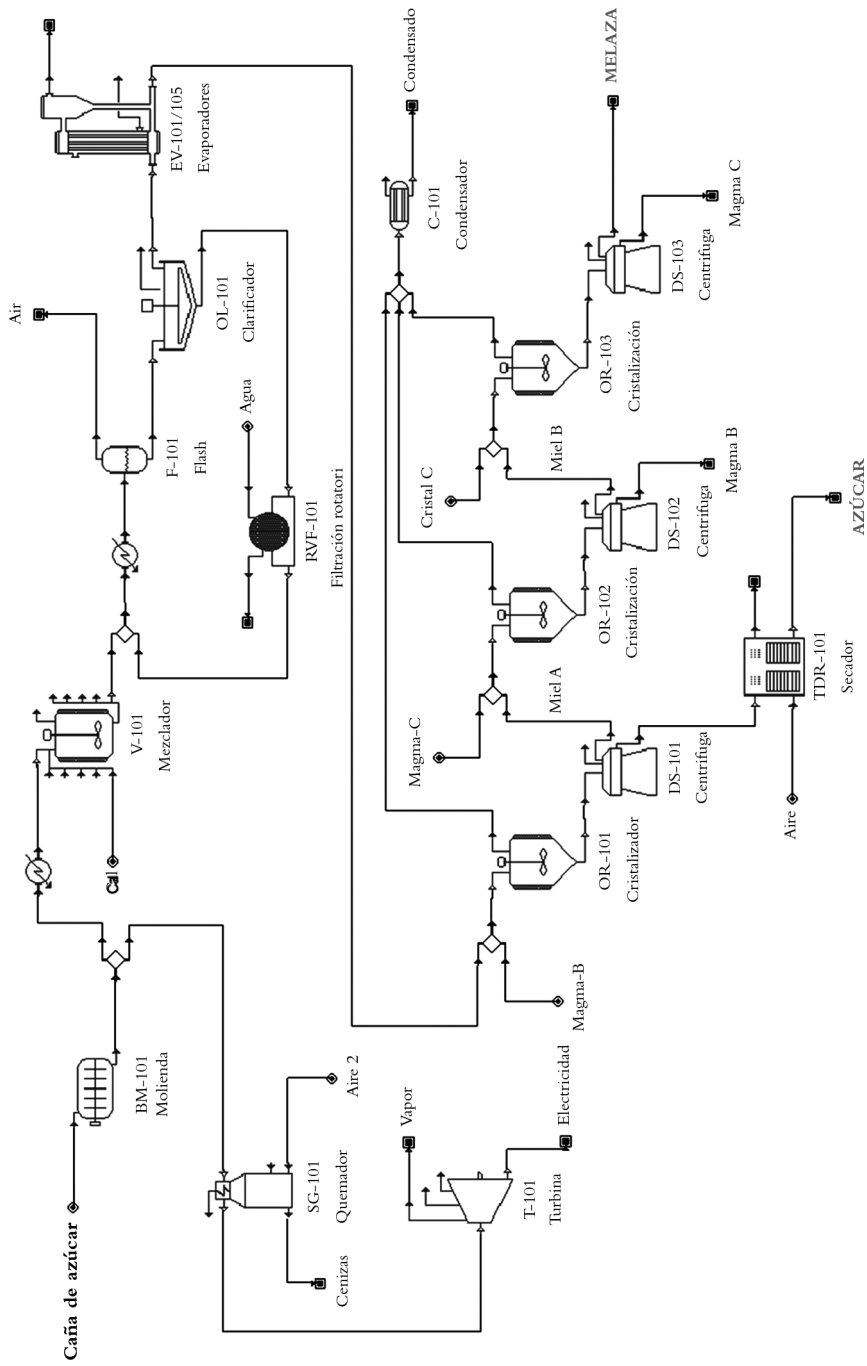
b) Selección de los bioproductos de la biorrefinería

Los productos químicos básicos (cuya denominación en inglés es *commodity chemicals*) se caracterizarían por un elevado volumen de producción y, como consecuencia de ello, un costo reducido. Su principal utilidad, aunque no la única, es servir como base o intermediario para la producción de otros compuestos químicos y polímeros (Roncal *et al.*, 2009). De aquí que una biorrefinería podría producir productos químicos básicos a partir de la fermentación.

Los productos químicos básicos para una biorrefinería de melaza, seleccionados por sus características particulares de procesamiento y por su demanda en el mercado nacional, son: L-lisina, ácido cítrico y proteína unicelular para la industria alimentaria, y ácido láctico y PHB para la industria de bioplásticos (Anaya y López, 2017, 2018; López *et al.*, 2017; Anaya *et al.*, 2016; Sales *et al.*, 2013). Sin embargo, para ejemplificar la metodología de evaluación propuesta sólo se mostrarán los análisis de evaluación para dos bioproductos: L-lisina y ácido láctico.

La L-lisina es un aminoácido esencial que puede ser producido mediante procedimientos químicos, a partir de materias primas fósiles, y mediante fermentación microbiana, siendo este segundo el procedimiento más económico (Anastassiadis, 2007). Sus usos principalmente son como suplemento en la alimentación humana y animal, y como ingrediente en las industrias de cosméticos y farmacéutica. Su volumen de producción mundial es de aproximadamente 850 000 t/año, con un aumento

Figura 4. Diseño conceptual del proceso de producción de azúcar y melaza

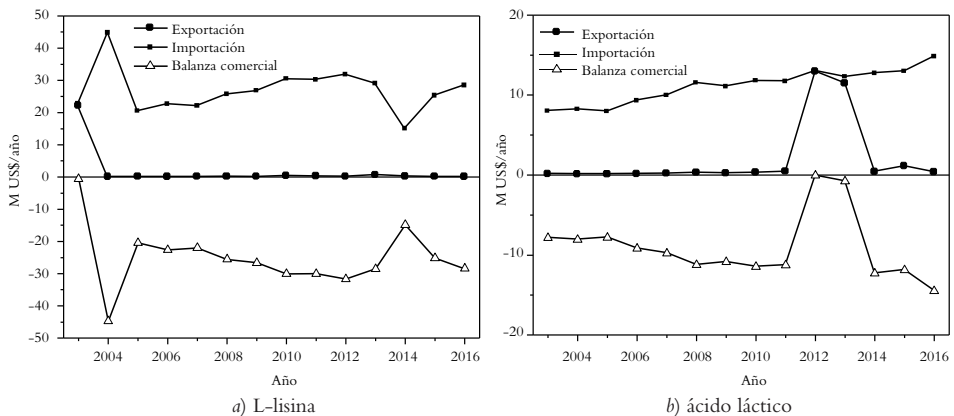


Fuente: Sales-Cruz et al. (2013).

en el mercado de 10-15% por año (Leuchtenberger *et al.*, 2005). En México, las estadísticas de importación, exportación y balanza comercial (Figura 5a) muestran que existe un déficit comercial, implicando que la producción nacional no es suficiente y por ende es un producto con gran demanda.

El ácido láctico es un ácido orgánico natural con una larga historia de uso en la industria alimentaria y no alimentaria, incluidas las industrias de cosméticos y la farmacéutica, para el procesamiento de productos químicos oxigenados, reguladores del crecimiento de plantas, y productos químicos intermediarios especiales. Actualmente hay un aumento en la demanda de ácido láctico como materia prima para la producción del biopolímero ácido poliláctico (PLA), que es una alternativa biodegradable, biocompatible y prometedora como sustituto de los plásticos derivados de petroquímicos. El PLA tiene muchos usos en suturas quirúrgicas, implantes ortopédicos, sistemas de administración de fármacos, productos de consumo desechable, y su uso podría aliviar significativamente los problemas de eliminación de residuos plásticos. La producción mundial de ácido láctico (incluidos los usos de polímeros) se estimó en alrededor de 259 000 t/año en 2012, esperando un incremento a 367 300 t/año para 2017 (Abdel-Rahman *et al.*, 2013). En particular en México, los niveles de importación y exportación generan un déficit comercial (Figura 5b). De manera similar a la L-lisina, la balanza comercial apunta a una demanda alta de este producto en el mercado, lo cual justifica su producción en biorrefinerías.

Figura 5. Importación, exportación y balanza comercial en México



Fuente: STAVI (2016).

Diseño conceptual de la biorrefinería

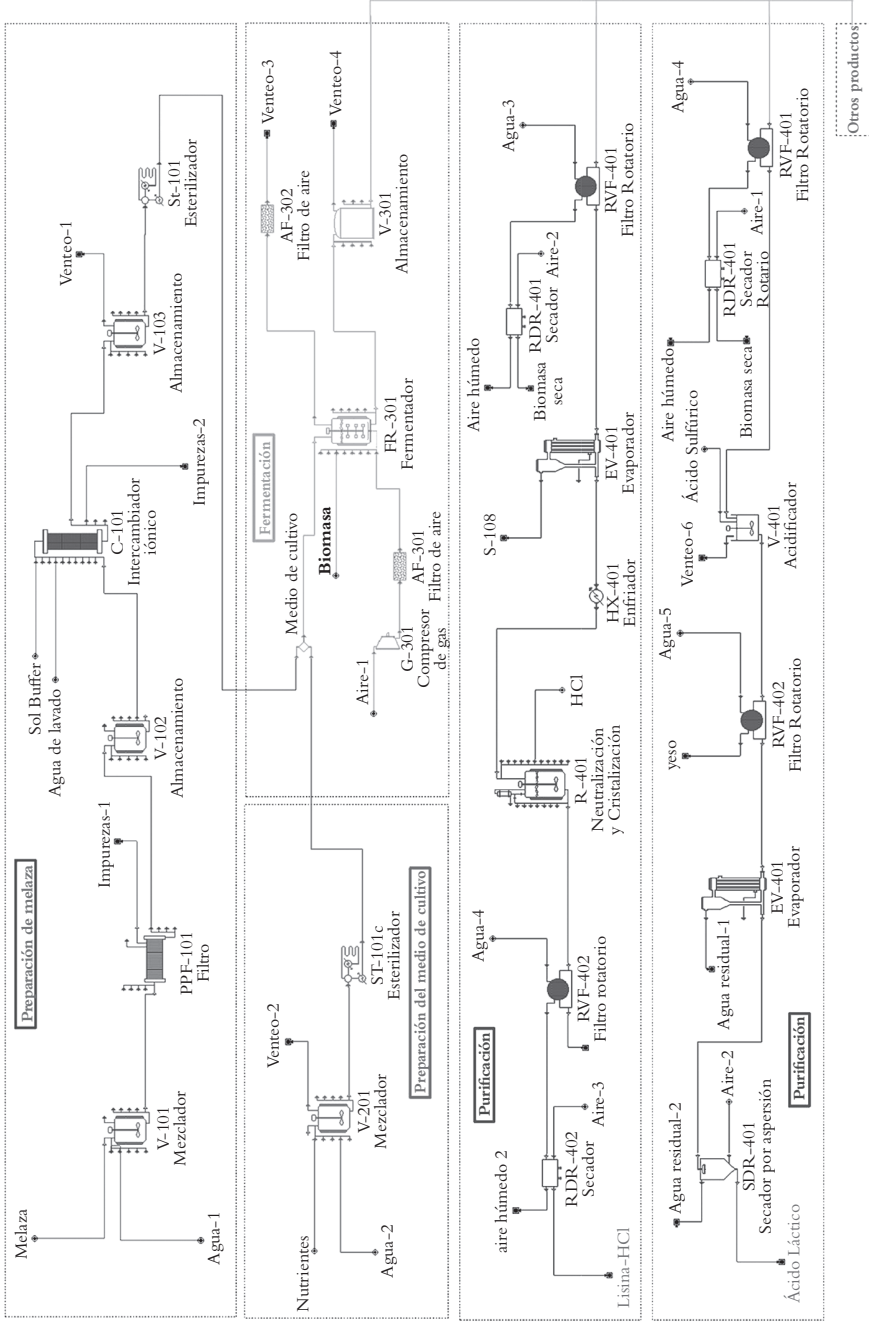
Un primer diagrama de flujo para el diseño conceptual de una biorrefinería multi-producto a partir de melaza se presenta en la Figura 6 (implementado en el simulador *SuperPro Designer*), en el cual se muestran cuatro secciones: *a*) preparación de la melaza, *b*) preparación del medio de cultivo, *c*) fermentación, y *d*) purificación. Estas secciones son simplemente conjuntos de operaciones unitarias que completan una etapa del procesamiento (delimitados en áreas grises). Como se observa, para procesar multiproductos, el diseño de los equipos está fijo para las secciones de preparación de melaza, preparación del medio de cultivo (únicamente varían los nutrientes que se adicionan para cada bioproducto) y fermentación (los microorganismos, las reacciones y tiempos de reacción cambian para cada bioproducto). Mientras que la síntesis de la sección de purificación es diferente para cada bioproducto. A continuación se describe brevemente cada una de estas secciones de la biorrefinería.

En la sección de preparación de la melaza (fuente de carbono), ésta se diluye con agua aproximadamente al 20% de contenido de azúcar fermentable en un tanque de mezclado (V-101). Parte de las impurezas que se encuentra como sólidos suspendidos se eliminan por filtración (PFF-101). Posteriormente las impurezas en forma de iones metálicos se eliminan usando una columna de intercambio iónico (C-101). Finalmente, la solución resultante es la materia prima que se adicionará al fermentador después de ser esterilizada por calor (ST-101).

En la sección de preparación del medio de cultivo, los nutrientes (es decir, fuentes de nitrógeno, potasio, fósforo, magnesio, entre otros) se disuelven en agua (V-201) para lograr la concentración deseada para fermentación. Esta solución acuosa se esteriliza al calor (ST-101). Después de la esterilización, tanto la fuente de carbono y los nutrientes se transfieren al recipiente de fermentación (FR-301).

En la sección de fermentación, el medio de cultivo y la biomasa (microorganismo que actúa como inóculo) se adicionan al recipiente de fermentación (FR-301). El tiempo de fermentación, el rendimiento y la productividad dependen del microorganismo seleccionado. Con el propósito de incrementar la capacidad de la planta y obtener mayor producción, se usan reactores de capacidad máxima de 500 m³. Se utilizan agentes de transferencia para mantener a una temperatura constante de acuerdo con los requerimientos específicos de la reacción de fermentación. Debido a la concentración diluida del medio de cultivo, se utilizan varios reactores en la fermentación, sin embargo, sólo se muestra un reactor en el diagrama de flujo. El número de reactores es determinado tal que se cubra la demanda de producto y el informe económico indique que el proceso es rentable.

Figura 6. Diseño conceptual de una biorrefinería multiproducto a partir de melaza



Fuente: adaptado de Anaya y López (2017, 2018).

Para la fermentación de azúcares para producir L-lisina se emplean cepas de *Corynebacterium glutamicum*, que son generalmente reguladas por el aminoácido treonina (Anastassiadis, 2007). La reacción es aerobia, y se lleva a cabo a 35 °C y PH neutro. Mientras que en la fermentación para producir ácido láctico se emplea *Lactobacillus casei ssp. rhamnosus*, en la que el factor de enriquecimiento del medio depende de la adición de extracto de levadura y triptona (Youssef *et al.*, 2005). Debido a que el microorganismo es inhibido por el ácido producido, se agrega hidróxido de calcio al fermentador para neutralizar y mantener un pH de 5-6 y formar sales de calcio. La fermentación homoláctica se lleva a cabo a una temperatura de 42 °C en condiciones anaerobias.

Una vez que se completa la fermentación, el caldo se descarga en un tanque de almacenamiento (V-301), que actúa como un amortiguador entre la sección de fermentación y la sección de purificación. Esta última comienza con la eliminación de la biomasa mediante un filtro rotatorio al (RVF-401). Por una parte, la biomasa se seca en un secador rotario (RDR-401), la cual constituye un producto secundario para venta. Por otra parte, el producto es recuperado y purificado del licor de fermentación clarificado.

Para la purificación de la L-lisina, el licor de fermentación se concentra en un evaporador (EV-401). Posteriormente se enfría a 35 °C utilizando un intercambiador de calor (HX-401), y se envía al recipiente de neutralización y cristalización (R-401). Ahí se neutraliza con una solución de HCl y se enfría a 15 °C con el fin de cristalizar la sal como L-lisina monoclorohidratada (L-lisina-HCl). Después de la cristalización, los sólidos de la suspensión son retenidos por un filtro rotatorio al vacío (RVF-402) y se enjuaga con agua para eliminar las impurezas restantes. Los cristales húmedos se secan posteriormente en un secador rotatorio (RDR-402). El producto final tiene aproximadamente 99.8% cristales puros de L-lisina-HCl.

Para la purificación del ácido láctico, el licor de fermentación contiene lactato de calcio. La acidificación de éste con ácido sulfúrico para producir sulfato de calcio (yeso) y ácido láctico se lleva a cabo en un reactor (V-401). Después el yeso es removido por un filtro rotatorio (RVF-402). Debido a que se manejan altas cantidades de agua, ésta es removida por un evaporador (EV-401) y posteriormente por un secador por aspersión (SDR-401). De manera que la pureza del producto obtenido es de 50.5% de ácido láctico.

Evaluación del proceso de producción de L-lisina

Siguiendo la metodología propuesta (resumida en la Figura 2), primero se analiza la operación dinámica del reactor de fermentación para determinar los criterios

técnicos (productividad y rendimiento del producto), posteriormente estos resultados se utilizan para las evaluaciones tecno-económico-ambientales del proceso de producción industrial.

El análisis dinámico del reactor está basado en un modelo matemático del reactor isotérmico de fermentación, obtenido de los correspondientes balances de materia. El modelo para la fermentación de la L-lisina en ML o MLA (Figura 7) está dado por el siguiente sistema de ecuaciones (Anaya y López, 2017):

$$\frac{dC_S}{dt} = -\frac{1}{Y_{X/S}}\mu C_X - \frac{1}{Y_{P/S}}r_p C_X - m_s C_X + \frac{F}{V}(C_{S,F} - C_S), \quad C_S(0) = C_{S,0} \quad (1)$$

$$\frac{dC_T}{dt} = -\frac{1}{Y_{X/T}}\mu C_X - \frac{F}{V}C_T, \quad C_T(0) = C_{T,0} \quad (2)$$

$$\frac{dC_X}{dt} = \mu C_X - \frac{F}{V}C_X, \quad C_X(0) = C_{X,0} \quad (3)$$

$$\frac{dC_O}{dt} = -\frac{1}{Y_{X/O}}\mu C_X - \frac{1}{Y_{P/O}}r_p C_X - m_O C_X + k_L a(S_O Y_O P - C_O), \quad C_O(0) = C_{O,0} \quad (4)$$

$$\frac{dC_P}{dt} = r_p C_X - \frac{F}{V}C_P, \quad C_P(0) = C_{P,0} \quad (5)$$

$$\frac{dV}{dt} = F, \quad V(0) = V_0 \quad (6)$$

$$\mu = \mu_{\max} \left(\frac{C_S}{C_S + K_S} \right) \left(\frac{C_T}{C_T + K_T} \right) \left(\frac{C_O}{C_O + K_O} \right),$$

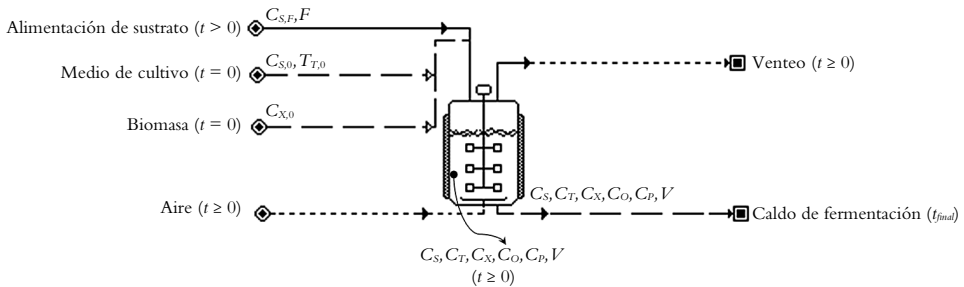
$$r_p = (\alpha\mu + \beta) \left(\frac{C_S}{C_S + K_{PS}} \right) \left(\frac{C_O}{C_O + K_O} \right) \quad (7)$$

$$Y_{OP} = \frac{C_P}{C_{S,\text{total}}}, \quad C_{S,\text{total}} = \frac{C_{S,0} V_0 + C_{S,F}(V - V_0)}{V}; \quad Pr = \frac{C_P}{t} \quad (8)$$

Donde C_S , C_T , C_X , C_O , C_P son las concentraciones de sustrato, treonina, biomasa (*Corynebacterium glutamicum*), oxígeno y producto (L-lisina), respectivamente. Los rendimientos de biomasa y producto están determinados por las variables $Y_{p/o}$, $Y_{p/s}$, $Y_{x/s}$, $Y_{x/o}$, $Y_{x/t}$, K_{La} es el coeficiente de transferencia de masa, S_O es la solubilidad del oxígeno, Y_O es la fracción mol del oxígeno en la fase gaseosa, μ es la velocidad de crecimiento específico, r_p es la velocidad de producción de L-lisina; α y β son los coeficientes de crecimiento asociado y no asociado con la síntesis del producto,

respectivamente; m_s y m_o son el consumo específico de sustrato y oxígeno, respectivamente. V es el volumen de llenado del reactor, F y $C_{s,F}$ son el flujo y la concentración de alimentación de sustrato, respectivamente; donde $F = 0$ para ML. Los valores de los parámetros del modelo pueden encontrarse en Anaya y López (2017). Para el análisis propuesto se seleccionaron las siguientes condiciones de operación: $K_{La} = 1000 \text{ h}^{-1}$, $P = 1 \text{ atm}$, $C_{s,F} = 1700 \text{ g/L}$; las condiciones iniciales de operación se fijaron en: $C_{s,0} = 120 \text{ g/L}$, $C_{p,0} = 0$, $C_{O,0} = 0.008 \text{ g/L}$, $C_{x,0} = 0.1 \text{ g/L}$; y $C_{T,0}$ fue manipulada en el rango de 0.2-1.6 g/L.

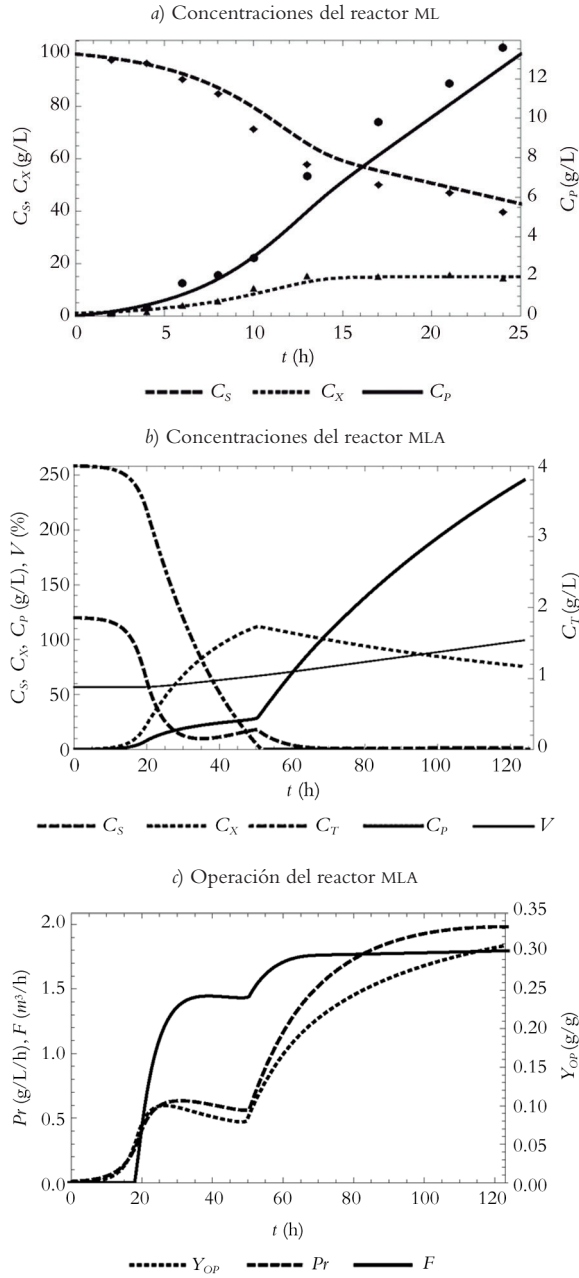
Figura 7. Reactor de fermentación de L-lisina



Fuente: elaboración propia.

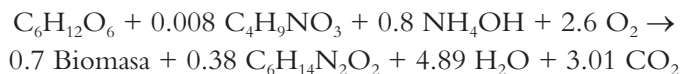
Primero se valida el modelo [Ec. (1)-(8)] usando datos experimentales reportados para una fermentación ML (Buechs, 1994). La Figura 8a muestra la validación, donde puede verse que el modelo reproduce satisfactoriamente la trayectoria de fermentación. Posteriormente se realiza una serie de simulaciones con el interés de comprender el efecto del modo de operación (ML o MLA) y de determinar las regiones de operación que lleven a altas concentraciones del producto y altas productividades. De este análisis dinámico se determinaron los mejores casos para cada modo de operación. Los criterios técnicos alcanzaron los valores de: (a) $Y_{op} = 0.33 \text{ g/g}$, $Pr = 0.47 \text{ g/(L.h)}$ para ML (usando $C_{T,0} = 0.4 \text{ g/L}$); y (b) $Y_{op} = 0.31 \text{ g/g}$, $Pr = 1.99 \text{ g/(L.h)}$ para MLA (usando $C_{T,0} = 4 \text{ g/L}$). Lo que significa que ambos casos tienen un rendimiento de producto muy similar, pero el MLA genera mayor cantidad de producto en un menor tiempo de proceso (lo cual es favorable para aumentar la velocidad de producción de L-lisina). Las figuras 8a y 8b muestran el comportamiento dinámico de las concentraciones para ML y MLA, respectivamente; mientras la Figura 8c presenta la estrategia de adición de sustrato, la productividad y el rendimiento para el mejor caso encontrado del reactor de fermentación MLA.

Figura 8. Comportamiento dinámico del reactor de fermentación de L-lisina



Fuente: Anaya y López (2017).

A partir de estos resultados se determina la reacción estequiométrica de la fermentación de L-lisina, utilizando las concentraciones de sustratos, nutriente, biomasa y producto en el punto final de reacción. La reacción para el reactor MLA está dada por:



El siguiente paso es el análisis técnico-económico del proceso de producción a escala industrial. Se considera un insumo de 400-470 toneladas de melaza por lote de proceso, para el cual se dimensionan los equipos requeridos para cada operación unitaria presentada en la Figura 6. En particular, los datos previos del balance de rendimiento de producto [Ec. (9)], la productividad y las condiciones de operación del reactor son incorporados a la sección de fermentación del diseño conceptual de la biorrefinería.

Para el análisis económico se toman en cuenta los siguientes parámetros: todos los costos (de materias primas, producto, consumibles, mano de obra, equipo y servicios) son cotizados en dólares, un tiempo anual de operación de la producción de 48 semanas, depreciación del equipo a 15 años, y el ISR comercial de 30%. Es importante señalar que, para realizar el análisis técnico-económico, es necesario ajustar el número de reactores (de capacidad máxima de 500 m³) que deben trabajar en modo escalonado para procesar el insumo de melaza establecido y lograr que los criterios de rentabilidad se satisfagan, esto es, que el CPU sea menor al costo de venta, el RSI deseable sea entre 15-20% y el PR sea preferiblemente menor a 4 años.

El Cuadro 2 muestra el análisis de rentabilidad para el caso MLA. Los resultados muestran los criterios económicos (CPU, RSI, PR) en función de la cantidad de melaza procesada y el número de reactores. Como puede observarse, para todos los escenarios se cumple que el RSI es mayor a 20%, mientras que el PR está entre 3.8-4.7 años. Logrando los mejores valores de rentabilidad para el proceso con 430 t/lote e implementado seis reactores escalonados.

El informe técnico-económico desglosado para los dos mejores casos ML y MLA se presenta en el Cuadro 3. Se puede observar que el RSI y el PR para el caso MLA satisfacen el mejor escenario de rentabilidad para la producción de L-lisina. Mientras que el caso ML no es rentable debido a que el CPU es mayor al costo de venta del producto (por lo que no es posible calcular el RSI ni el PR).

Cuadro 2. Análisis de rentabilidad para la producción de L-lisina-HCl, variando el insumo de materia prima y el número de reactores de fermentación para el caso MLA

MELAZA (T/LOTE)	CPU (US\$/KG) / RSI (%) / PR (AÑO)			
	NÚMERO DE REACTORES			
	4	5	6	7
400	1.66/22.2/4.5	1.63/24.8/4.0	1.62/25.6/3.9	1.64/23.8/4.2
410	1.65/22.5/4.4	1.62/25.2/4.0	1.61/26.0/3.9	1.64/24.1/4.2
420	1.65/22.8/4.4	1.62/25.5/3.9	1.61/26.2/3.8	1.63/24.4/4.1
430	1.65/23.0/4.3	1.61/25.8/3.9	1.60/26.5/3.8	1.63/24.6/4.1
440	1.68/20.9/4.7	1.64/23.2/4.3	1.62/24.6/4.1	1.65/22.5/4.4
450	1.67/21.2/4.7	1.64/23.4/4.3	1.62/24.8/4.0	1.65/22.8/4.4
460	1.66/21.4/4.7	1.63/23.7/4.2	1.61/25.1/4.0	1.64/23.0/4.4
470	1.66/21.5/4.7	1.63/23.8/4.2	1.61/25.2/4.0	1.64/23.1/4.3

Fuente: Anaya y López (2017).

Cuadro 3. Informe técnico-económico-ambiental para el proceso de producción de L-lisina

CONCEPTO	VALOR		UNIDAD
	CASO ML	CASO MLA	
INFORME TÉCNICO			
Tiempo de fermentación	82.8	123.8	h
Consumo anual de melaza	127 710*	131 580**	t/año
Producción anual de L-lisina	25 153	25 411	t/año
Producción anual de biomasa seca	43 243	37 581	t/año
Tiempo de ciclo de producción	27.8	26.9	h
Rendimiento global	0.196	0.193	kg/kg
INFORME DE RENTABILIDAD			
Inversión de capital total			
Capital fijo directo	198 931 000	54 068 000	US\$
Capital de trabajo	3 534 000	2 728 000	US\$
Costos arranque	9 947 000	2 703 000	US\$
Inversión total	212 412 000	59 500 000	US\$
Ingresos			
Costo de venta unitario de L-lisina	2.0	2.0	US\$ /kg
Costo de venta unitario de biomasa seca	0.2	0.2	US\$ /kg
Ingreso anual por L-lisina	50 305 132	50 821 779	US\$/año

Cuadro 3. Informe técnico-económico-ambiental para el proceso de producción de L-lisina

CONCEPTO	VALOR		
	CASO ML	CASO MLA	UNIDAD
Ingreso anual por biomasa seca	8 648 610	7 516 163	US\$/año
Ingresos totales	58 953 742	58 337 942	US\$/año
Costo anual de operación	73 059 000	40 737 000	US\$/año
Costo de producción unitario (CPU)	2.91	1.60	US\$ /kg Ácido láctico
Retorno sobre la inversión (RST)	-	26.5	%
Periodo de recuperación (PR)	-	3.8	año
INFORME DE IMPACTO AMBIENTAL			
Agua de proceso	23.4	4.2	kg/kg
Vapor	47.9	7.1	kg/kg
Agua de enfriamiento	3 098.2	382.7	kg/kg
Energía eléctrica	11.5	2.6	MJ/kg
Emisiones de CO ₂	1.76	1.96	kg/kg
Índice PEI	0.0145	0.0124	PEI/kg

* Caso ML: tamaño de lote = 430 t de melaza. Número total de reactores = 20. Número de lotes por año = 297.

** Caso MLA: tamaño de lote = 430 t de melaza. Número total de reactores = 6. Número de lotes por año = 306.

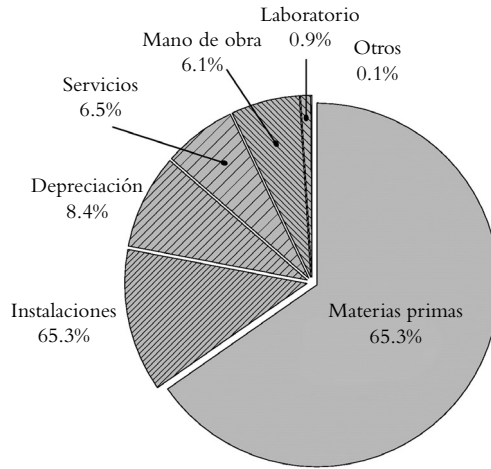
Fuente: Anaya y López (2017).

En la Figura 9a se presenta la contribución de cada una de las partidas en los costos de operación, como son materia prima (la mayor contribución), mantenimiento de las instalaciones, servicios, mano de obra, uso de laboratorio, y otros como tratamiento/desecho de residuos y consumibles (la menor aportación). De aquí la relevancia de seleccionar materias primas de fácil acceso y bajo costo.

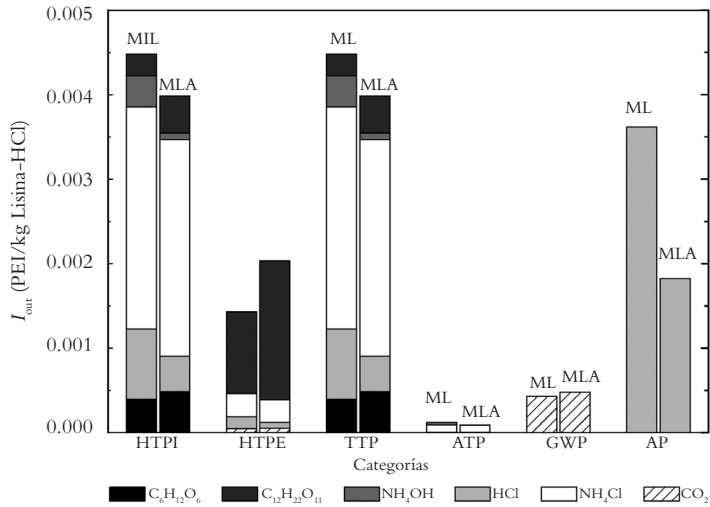
Por último, se evalúa el impacto ambiental de proceso de producción hacia los alrededores. La tercera sección del Cuadro 3 muestra la evaluación de los criterios de impacto ambiental para los mejores casos ML y MLA. Las capacidades instaladas en ambos casos son similares, 25 153 t/año L-lisina-HCl para el caso ML y 25 411 t/año L-lisina-HCl para el caso MLA. En general, se observa que el caso ML: i) requiere mayor cantidad de agua de proceso que el caso MLA, debido a que el medio de cultivo está más diluido en la sección de fermentación; ii) requiere mayores cantidades de agentes de transferencia de calor (vapor, agua enfriada y refrigeración) para la etapa de purificación, porque el evaporador y algunos otros

Figura 9. Proceso de producción de L-lisina

a) Distribución de costos de operación para MLA



b) Distribución del índice de impacto ambiental para los procesos ML y MLA



Fuente: Anaya y López (2017).

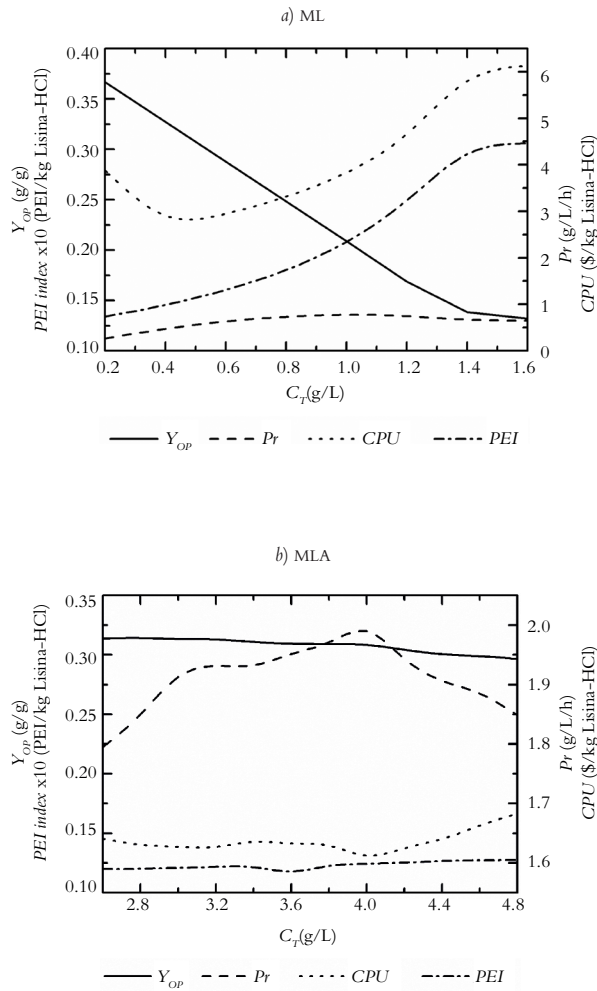
dispositivos necesitan eliminar mayor cantidad de agua para secar el producto; y iii) por lo tanto requiere también una mayor cantidad de energía (aproximadamente ocho veces más que el caso MLA).

La cantidad de CO_2 emitida al ambiente durante el proceso es generada principalmente por la etapa de fermentación. Los resultados para las emisiones de CO_2 se presentan en el Cuadro 3, pero también es uno de los principales gases de efecto invernadero representados en el factor de impacto GWP de la Figura 9b. Para este criterio ambiental en particular, contrariamente a los arriba mencionados, la cantidad de emisión de CO_2 para el caso MLA es ligeramente superior a las emisiones del caso ML. Esto se debe a que el caso MLA tiene un mayor rendimiento del producto, lo que implica una mayor generación de dióxido de carbono.

El último criterio mostrado en el Cuadro 3 es el índice PEI que contiene la contribución de ocho factores de impacto (*Iout*). La Figura 9b muestra la aportación de cada uno de estos factores, donde no se incluyen PCOP y ODP, ya que ningún contaminante emitido en el ambiente reacciona con ozono para formar oxígeno molecular (es decir, los valores PCOP y ODP son cero). Los potenciales más altos son HTPI y TTP principalmente debido al cloruro de amonio, que se genera en la neutralización. El ácido clorhídrico se utiliza en la etapa de neutralización y se considera uno de los compuestos que tiene mayor influencia en el índice PEI, especialmente en el factor AP. Este compuesto se requiere en cantidades mayores para el caso ML, lo que contribuye a que tenga un mayor impacto. Por otro lado, el componente que tiene menor índice de impacto ambiental es el CO_2 . Cuando se agregan todos los factores para obtener el índice general de PEI, se deduce que el caso MLA tiene un menor impacto ambiental que el caso ML (a pesar de los resultados opuestos en las emisiones de CO_2).

Durante el análisis técnico-económico-ambiental se determinó que otro parámetro de operación de alta relevancia para la producción de L-lisina es la concentración de treonina (nutriente) en la fermentación. Por lo que se determinó su influencia mediante la evaluación de los principales criterios de rentabilidad y sustentabilidad (Y_{Op} , Pr , CPU , PEI), como se muestra en la Figura 10 para ambos casos ML y MLA. Estos resultados corroboran que, para optimizar la rentabilidad (i.e. CPU mínimo), la cantidad requerida de treonina (C_T) para la fermentación es de 0.4 g/L para el caso ML y 4 g/L para el caso MLA. No obstante, estos valores de C_T no minimizan el impacto ambiental (i.e. PEI mínimo). Por lo que debe considerarse un equilibrio entre los criterios técnicos, económicos y ambientales para decidir el diseño final de la biorrefinería.

Figura 10. Evaluación técnico-económico-ambiental del proceso de producción de L-lisina en función de C_t :

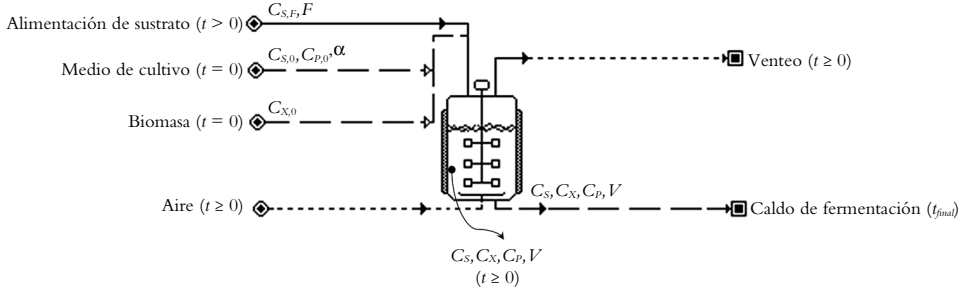


Fuente: Anaya y López (2017).

Evaluación del proceso de producción de ácido láctico

De manera similar al proceso de producción de L-lisina, primero se realiza el análisis dinámico del reactor de fermentación de ácido láctico en ML o MLA (Figura 11).

Figura 11. Reactor de fermentación de ácido láctico



Fuente: elaboración propia.

El modelo del reactor está dado por los siguientes balances de materia (Anaya y López, 2018; Youssef *et al.*, 2005):

$$\frac{dC_S}{dt} = -q_S C_X + \frac{F}{V} (C_{S,F} - C_S), \quad C_S(0) = C_{S_0} \quad (10)$$

$$\frac{dC_X}{dt} = C_X (\mu - K_d) - \frac{F}{V} C_X, \quad C_X(0) = C_{X_0} \quad (11)$$

$$\frac{dC_P}{dt} = V_p C_X - \frac{F}{V} C_P, \quad C_P(0) = C_{P_0} \quad (12)$$

$$\frac{dV}{dt} = F, \quad V(0) = V_0 \quad (13)$$

$$\mu = \bar{\mu}_{\max} \left(\frac{K_p}{K_p + C_p} \right) \left(\frac{C_S}{K_{S_C} + C_S} \right) \left(1 - \frac{C_P}{C_{P_c}} \right) \quad q_S = \frac{V_p}{Y_{P/S}} \quad V_p = \delta \mu + \beta \left(\frac{C_S}{K_S + C_S} \right) \quad (14)$$

$$K_S = K_{s_{\max}} \frac{(\alpha - \alpha_0)}{K_{\alpha_s} + (\alpha - \alpha_0)} \quad \bar{\mu}_{\max} = \mu_{\max} \frac{(\alpha - \alpha_0)}{K_{\alpha_{\mu}} + (\alpha - \alpha_0)} \quad K_p = K_{p_{\max}} \frac{(\alpha - \alpha_0)}{K_{\alpha_p} + (\alpha - \alpha_0)} \quad (15)$$

Donde C_S, C_X, C_P son las concentraciones de sustrato, biomasa y producto (ácido láctico), respectivamente. V es el volumen de llenado del reactor, F y $C_{S,F}$ son el flujo y la concentración de alimentación de sustrato, respectivamente; donde $F = 0$ para ML. μ, q_S, V_p son la velocidad de crecimiento específico de biomasa, de

consumo específico y de producción específica de ácido láctico, respectivamente. μ_{max} , K_p y K_{sc} son la máxima velocidad de crecimiento específico, la concentración crítica de ácido láctico y la constante de afinidad del microorganismo por la glucosa, respectivamente. $Y_{p/s}$ es el rendimiento producto-sustrato, δ y β son las constantes de producción del ácido láctico asociadas con el crecimiento y no crecimiento. Existe un reajuste de los parámetros cinéticos en el modelo, dependiendo de α , que es el factor de enriquecimiento del medio afín definido por la tasa de extracto de levadura y triptona. Donde $\alpha = 1$ corresponde a 5 g/L de extracto de levadura y 10 g/L de triptona, y $\alpha_o = 0.02$ es el factor de enriquecimiento mínimo. K_{qm} , K_{ap} y K_{as} son constantes de saturación, respectivamente. μ_{max} , K_p y K_{smax} son los valores límites de cada parámetro cinético, respectivamente. Los valores de los parámetros del modelo pueden encontrarse en Youssef *et al.* (2005). Para el análisis propuesto se seleccionaron las siguientes condiciones de operación: $C_{s,F} = 1700$ g/L, $C_{s,0} = 50$ g/L, $C_{p,0} = 0$, y $C_{x,0} = 0.1$ g/L; y el factor de enriquecimiento α fue manipulado en el rango de 1-4.

Primero, el modelo [Ec. (10)-(15)] es validado usando datos experimentales reportados para una fermentación ML (Youssef *et al.*, 2005). La validación del modelo es verificada satisfactoriamente como se muestra en la Figura 12a. Luego se realizó una serie de simulaciones para ambos modos de operación (ML o MLA), para determinar las regiones de operación que lleven a altas productividades y concentraciones de ácido láctico. Para cada modo de operación, los mejores criterios técnicos alcanzados con $\alpha = 1$ fueron: a) $Y_{op} = 0.97$ g/g, $Pr = 1.62$ g/(L.h) para ML; y b) $Y_{op} = 0.97$ g/g, $Pr = 1.74$ g/(L.h) para MLA. Lo cual indica que ambos casos tienen el mismo rendimiento de producto, pero nuevamente el MLA tiene mayor productividad que implica una mayor velocidad de producción de ácido láctico. El comportamiento dinámico del reactor MLA se muestra en la figura 12b, donde se observa que el proceso de fermentación se termina cuando la concentración de producto es máxima. Mientras que la Figura 12c muestra la estrategia de adición de sustratos (F), así como la respuesta dinámica de la productividad y rendimiento de producto para el caso modo lote alimentado.

A partir de las concentraciones de sustratos, nutriente, biomasa y producto en el punto final de reacción, se determinan las reacciones que se llevan a cabo en el reactor de fermentación MLA como sigue:

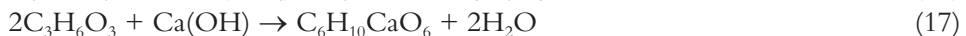
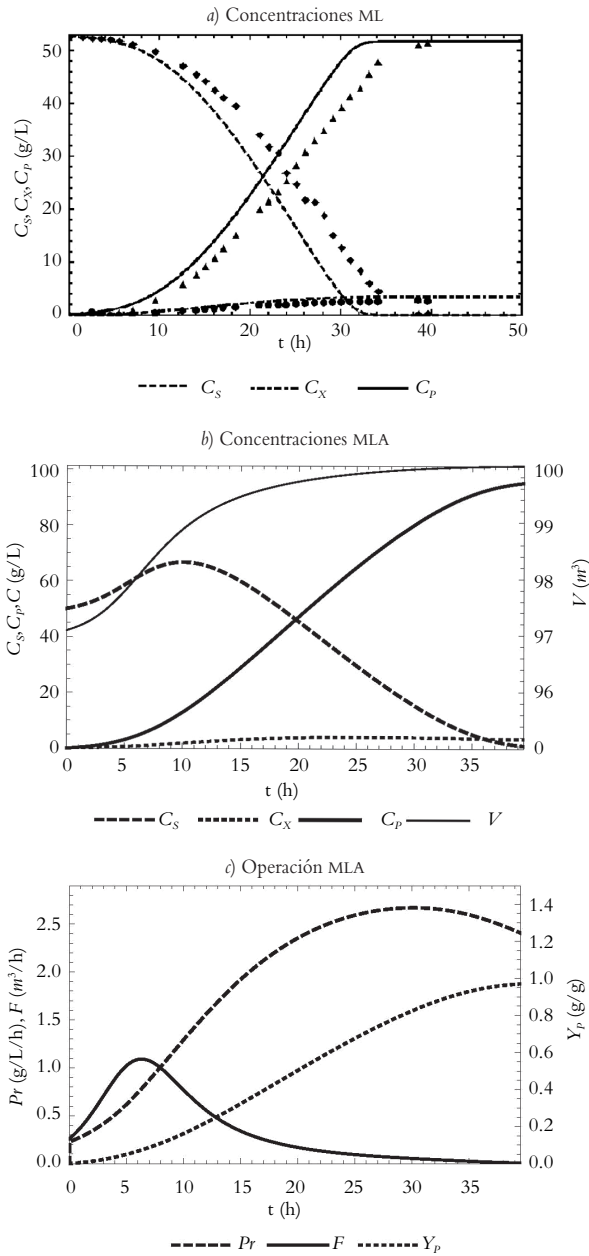


Figura 12. Respuesta dinámica del reactor de fermentación de ácido láctico



Fuente: Anaya y López (2018).

Una vez definidas las condiciones de operación del reactor de fermentación, estos resultados se emplean para el análisis técnico-económico del proceso de producción de ácido láctico a escala industrial. Similar al análisis descrito para la L-lisina-HCl, se considera un insumo de 400-470 toneladas de melaza por lote de proceso, se dimensionan los equipos requeridos para cada operación unitaria (presentadas en la Figura 6), y se toman en cuenta los mismos parámetros económicos descritos en la sección anterior.

El Cuadro 4 muestra el análisis de rentabilidad para el caso MLA en función de la cantidad de melaza procesada y el número de reactores instalados (con $\alpha = 1$). Como puede observarse, para todos los escenarios se cumple que el CPU es mucho menor al costo de venta (0.2 \$US/kg), el RSI es mucho mayor a 20% y PR es menor a 4 años. Logrando los mejores valores de rentabilidad para el proceso con 430 t/lote e implementado 24 reactores escalonados.

Cuadro 4. Análisis de rentabilidad para la producción de ácido láctico, variando el insumo de materia prima y el número de reactores de fermentación (caso MLA)

MELAZA (T/LOTE)	CPU (US\$/KG) / RSI (%) / PR (AÑO)			
	NÚMERO DE REACTORES			
	18	24	30	36
400	0.69/52.60/1.90	0.67/61.17/1.63	0.68/57.03/1.75	0.69/50.84/1.97
410	0.69/52.57/1.90	0.66/61.23/1.63	0.67/57.16/1.75	0.69/51.01/1.96
420	0.69/52.83/1.89	0.66/61.60/1.62	0.67/57.70/1.73	0.69/51.50/1.94
430	0.68/53.34/1.87	0.66/62.19/1.61	0.67/58.27/1.72	0.69/52.02/1.92
440	0.69/52.14/1.92	0.67/60.54/1.65	0.68/56.37/1.77	0.69/50.19/1.99
450	0.70/48.25/2.07	0.67/56.72/1.76	0.68/53.23/1.88	0.70/47.68/2.10
460	0.72/41.76/2.39	0.69/50.13/1.99	0.70/47.67/2.10	0.72/43.13/2.32
470	0.72/42.29/2.36	0.69/50.73/1.97	0.70/48.22/2.07	0.72/43.62/2.29

Fuente: Anaya y López (2018).

El informe técnico-económico desglosado para los dos mejores casos ML y MLA (con $\alpha = 1$) se presentan en el Cuadro 5. Se puede observar que ambos casos ML y MLA nuevamente satisfacen los criterios de rentabilidad establecidos, pero el mejor escenario de rentabilidad para la producción de ácido láctico corresponde al modo lote alimentado.

En la Figura 13a se presenta la contribución de cada una de las partidas en los costos de operación, donde se observa que 70% de la contribución corresponde al costo de las materias primas. Es importante señalar que este alto costo es debido

Cuadro 5. Informe técnico-económico-ambiental para el proceso de producción de ácido láctico

CONCEPTO CASO ML	VALOR	CASO MLA	UNIDADES
Informe técnico			
Tiempo de fermentación	29.6	54.14	h
Consumo anual de melaza	142 760 *	134 160 **	t/año
Producción anual de ácido láctico	136 291	129 476	t/año
Producción anual de biomasa seca	36 067	13 770	t/año
Tiempo de ciclo de producción	24	25.47	h
Rendimiento global	0.95	0.96	kg/kg
Informe de rentabilidad			
Inversión de capital total			
Capital fijo directo	186 362 000	107 190 000	US\$
Capital de trabajo	9 590 000	6 070 000	US\$
Costos arranque	9 318,000	5 360 000	US\$
Inversión total	205 270 000	118 620,000	US\$
Ingresos			
Costo de venta unitario de ácido láctico	1.38	1.38	US\$/kg
Costo de venta unitario de biomasa seca	0.2	0.2	US\$/kg
Ingreso anual por ácido láctico	188 082 648	178,677,197	US\$/año
Ingreso anual por biomasa seca	7 213 550	2 754 080	US\$/año
Ingresos totales	195 296 198	181 431 277	US\$/año
Costo anual de operación	138 157 000	85 749 000	US\$/año
Costo de producción unitario (CPU)	1.01	0.66	US\$ /kg Ácido láctico
Retorno sobre la inversión (RSI)	25.24	62.19	%
Periodo de recuperación (PR)	3.96	1.61	Año
Informe de Impacto Ambiental			
Agua de proceso	30.6	6.4	kg/kg
Vapor	16.36	10.38	kg/kg
Agua de enfriamiento	237.46	228.51	kg/kg
Energía eléctrica	0.32	0.29	MJ/kg
Emisiones de CO ₂	-	-	kg/kg
Índice PEI	0.18	0.18	PEI/kg

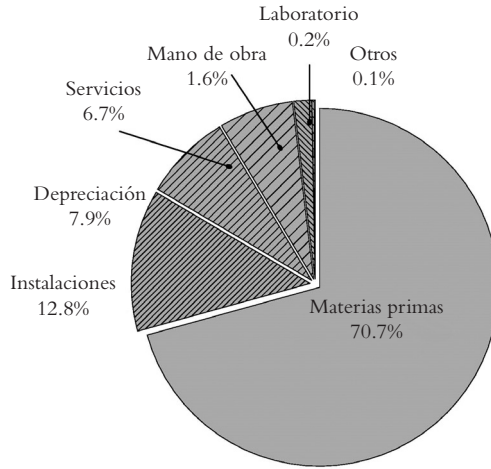
* Caso ML: tamaño de lote = 430 t de melaza. Número total de reactores = 36. Número de lotes por año = 332.

** Caso MLA: tamaño de lote = 430 t de melaza. Número total de reactores: 18. Número de lotes por año = 312.

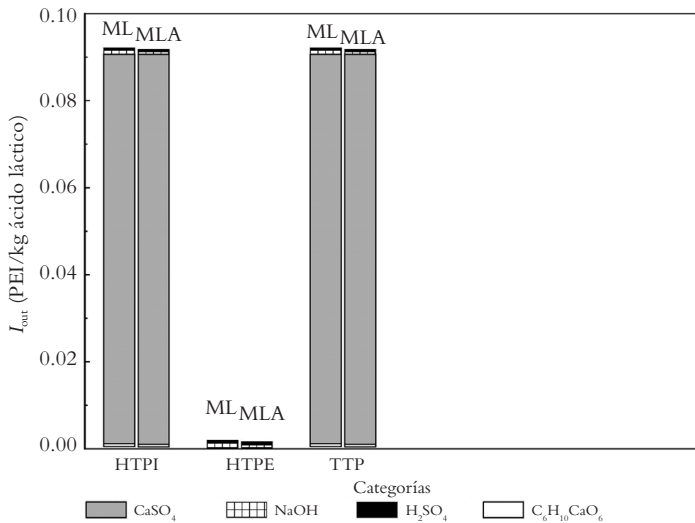
Fuente: Anaya y López (2018).

Figura 13. Proceso de producción de ácido láctico

a) distribución de costos de operación para MLA



b) distribución del índice de impacto ambiental para los procesos ML y MLA



Fuente: Anaya y López (2018).

principalmente al uso de extracto de levadura con un costo (9.2 \$US/kg) mucho mayor al costo de la melaza (\$0.15 \$US/kg).

Respecto al impacto ambiental de este proceso de producción, la tercera sección del Cuadro 5 muestra los resultados para los mejores casos ML y MLA. La capacidad instalada en ambos casos es similar, 142 760 t/año de ácido láctico para el caso ML y 134 160 t/año de ácido láctico para el caso MLA. Los aspectos relevantes de este análisis son: i) los requerimientos de enfriamiento, calentamiento y energía son mayores para el ML; ii) no hay producción de CO₂ en ningún caso debido a que la reacción homoláctica es anaerobia; y iii) el PEI es aproximadamente igual para ambos casos ML y MLA, como se muestra el desglose de los factores de impacto mostrados en la figura 13b (en la cual los factores que contribuyen al PEI son solo HPTI, HTPE, TTP; el resto son nulos).

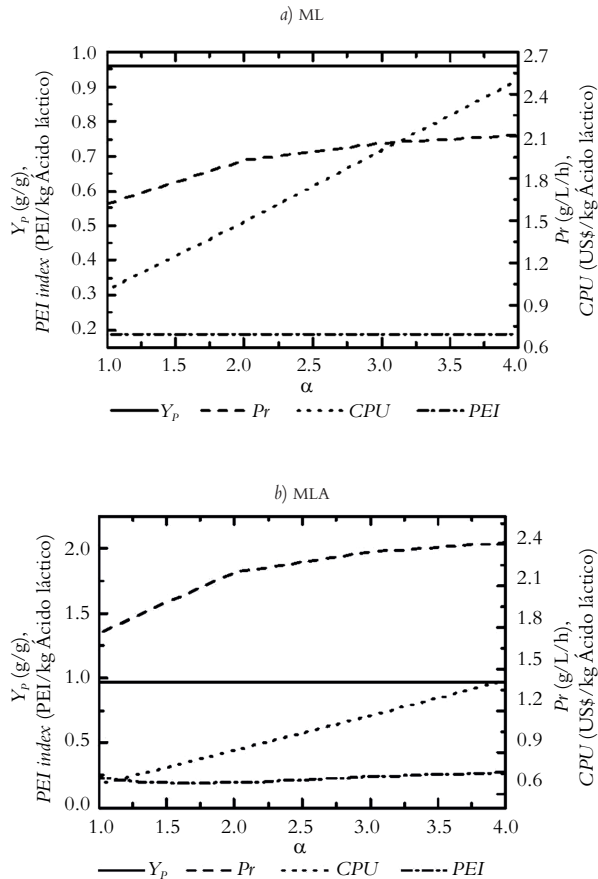
Durante el análisis técnico-económico-ambiental, se determinó que uno de los parámetros de operación de alta relevancia para la producción de ácido láctico es el factor de enriquecimiento (α) en la fermentación. Por lo tanto, se determinó su influencia mediante la evaluación de los principales criterios de rentabilidad e impacto ambiental, como se muestra en la Figura 14 para ambos casos ML y MLA. Estos resultados corroboran que, para optimizar la rentabilidad (i.e. CPU mínimo), se requiere un factor de enriquecimiento bajo (se definió como mínimo $\alpha = 1$ g/L por limitaciones de la validez modelo cinético). Aunque este factor no afecta al impacto ambiental ni el rendimiento del producto (*PEI* y *YOP* son casi constantes). Sin embargo, los resultados indican que la rentabilidad del MLA es más favorable para diseñar una biorrefinería.

Evaluación integral de la biorrefinería

Como se demuestra en las secciones anteriores, el diseño de una biorrefinería requiere la exploración de varios aspectos, incluyendo selección de materias primas, productos, mercados, rutas de procesamiento, condiciones de operación, etcétera. La solución óptima para el diseño de una biorrefinería sostenible no es obvia ni inmediata. Aún queda abierta la pregunta sobre cuál o cuáles productos son los más adecuados.

Para determinar la mejor opción de una biorrefinería sostenible se requerirá de la resolución rigurosa de un problema de optimización considerando numerosas cuestiones relevantes. La metodología propuesta en este capítulo ha tomado en cuenta diversos aspectos de sostenibilidad, incluyendo datos técnicos, económicos y

Figura 14. Evaluación técnico-económico-ambiental del proceso de producción de ácido láctico en función de α

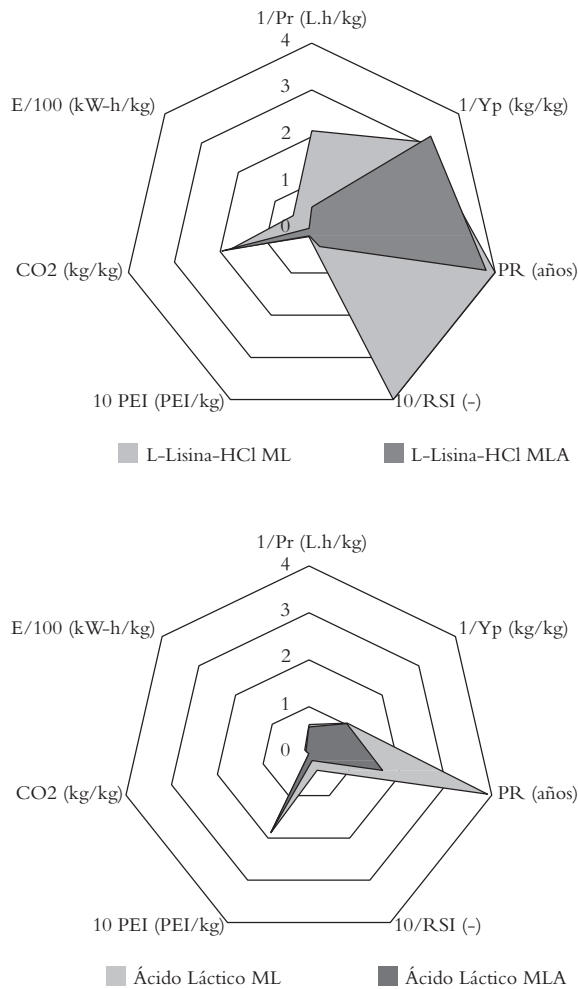


Fuente: Anaya y López (2018).

ambientales; pero no incluye la optimización del diseño, de la capacidad instalada y de la programación de la producción.

En la Figura 15 se establece un procedimiento simple para evaluar y comparar de manera integral los procesos de producción de los bioproductos seleccionados (en este caso, L-lisina-HCl y ácido láctico). Como variables dependientes se han seleccionado cada uno de los criterios que se requieren minimizar: $1/Pr$ y $1/Y_{Op}$ como parámetros técnicos; $1/RSI$ y PR como parámetros económicos; PEI , emisiones

Figura 15. Evaluación integral de los procesos de producción de L-lisina-HCL y ácido láctico



Fuente: adaptado de Anaya y López (2018).

de CO_2 y consumo de energía E como parámetros ambientales. De manera que el caso de estudio que presenta una menor área en las gráficas de radar (Figura 15) corresponde al mejor diseño sostenible. Como puede observarse, los casos MLA presentan áreas menores a los casos ML, y comparando todos los casos estudiados se concluye que el mejor diseño sostenible corresponde a la producción de ácido láctico en modo lote alimentado.

Conclusiones

Actualmente la biomasa aparece como una alternativa a la economía basada en petróleo para la producción de productos químicos básicos. Los costos de producción, los problemas de impacto ambiental ocasionados por los procesos de producción, y la demanda de productos novedosos han iniciado una nueva actividad económica más sostenible emergiendo así las biorrefinerías. Sin embargo, su sostenibilidad ha sido cuestionada. Como alternativa a esto, el concepto de biorrefinería aparece como una opción para construir una bioeconomía, a partir de procesos de producción que consideren multibiomasa como insumo para generar una diversidad de productos con valor agregado con un mínimo de residuos.

En este capítulo se presentó un enfoque integrado que permita tomar decisiones sobre consideraciones ambientales y económicas al mismo tiempo, con el fin de lograr un diseño de biorrefinería sostenible. A pesar de que existen varios reportes publicados en el tema de diseño de procesos de biorrefinería sostenibles, no se han reportado metodologías que involucren el análisis del proceso de producción desde una escala molecular hasta una escala industrial. Los criterios de evaluación propuestos pueden ser útiles en la etapa de diseño inicial para determinar un equilibrio entre el desempeño económico y el impacto ambiental, tomando en cuenta el efecto de las condiciones de operación (de la etapa reactiva principalmente).

Aunque la metodología de evaluación se ejemplificó con dos casos de estudio (L-lisina y ácido láctico), ésta se puede extender a otros bioproductos. En particular, nuestro grupo de investigación ha realizado varios diseños conceptuales para biorrefinerías 1G y 2G que van desde plantas productoras de etanol (López y Sales, 2009) hasta plantas multiproducto que incluyen también PHB, ácido cítrico y proteína unicelular (López *et al.*, 2014; 2017).

Bibliografía

- Abdel-Rahman, M.A., Y. Tashiro y K. Sonomoto (2013). "Recent Advances in Lactic Acid Production by Microbial Fermentation Processes", *Biotechnology Advances*, 31(6), pp. 877-902.
- Anastassiadis, S. (2007). "L-lysine Fermentation", *Recent Patents on Biotechnology*, 1(1), pp. 11-24.
- Anaya-Reza O. y T. López-Arenas (2017). "Comprehensive Assessment of the L-lysine Production Process from Fermentation of Sugarcane Molasses", *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 40(7), pp. 1033-1048.

- Anaya-Reza O. y T. López-Arenas (2018). “Diseño de una biorrefinería sostenible para la producción ácido láctico a partir de melaza de caña de azúcar”, *Revista Mexicana en Ingeniería Química*, 17(1), pp. 243-259.
- Anaya-Reza, O., M. Sales-Cruz y T. López-Arenas (2016). “Proceso de fermentación de ácido láctico para biorrefinerías”, *Memorias del XXXVII Encuentro Nacional de la Academia Mexicana de Investigación y Docencia en Ingeniería Química (AMIDIQ)*, SIM, pp. 156-161.
- Biddy, M.J., C. Scarlata y C. Kinchin (2016). “Chemicals from Biomass: A Market Assessment of Bioproducts with Near-Term Potential”, *Technical Report*, NREL/TP-5100-65509.
- Buechs, J. (1994). *Precise Optimization of Fermentation Processes Through Integration of Bioreaction. Process Computations in Biotechnology*. Nueva Delhi: McGraw-Hill.
- Cavalett, O., M.O. Dias, C.D. Jesus, P.E. Mantelatto y M.P. Cunha (2012). “Environmental and Economic Assessment of Sugarcane First Generation Biorefineries in Brazil”, *Clean Technologies and Environmental Policy*, 3(14), pp. 399-410.
- Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar (Conadesuca) (2016a). *Informe estadístico del sector agroindustrial de la caña de azúcar en México*, Zafras 2016-2007/2015-2015.
- Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar (Conadesuca) (2016b). Nota informativa: “Melazas de caña de azúcar y su uso en la fabricación de dietas para ganado”.
- De Jong, E., A. Higson, P. Walsh y M. Wellisch (2012). “Bio-Based Chemicals Value Added Products from Biorefineries”, *IEA Bioenergy*, Task 42 Biorefinery.
- Fitzpatrick, M., P. Champagne, M. Cunningham y R. Whitney (2010). “A Biorefinery Processing Perspective: Treatment of Lignocellulosic Materials for the Production of Value-Added Products”, *Bioresource Technology*, núm. 101, pp. 8915-8922.
- Hatti-Kaul, R., U. Törnvall, L. Gustafsson y P. Börjesson (2007). “Industrial Biotechnology for the Production of Bio-Based Chemicals”, *Trends Biotechnol*, núm. 25, pp. 119- 124.
- Heinzle, E., A. Biber y C. Cooney (2007). *Development of Sustainable Bioprocesses: Modeling and Assessment*. Chichester: Wiley.
- Leuchtenberger, W., K. Huthmacher y K. Drauz (2005). “Biotechnological Production of Amino Acids and Derivatives: Current Status and Prospects”, *Applied Microbiology and Biotechnology*, núm. 69, pp. 1-8.
- Li, T., X. Chen, J. Chen, Q. Wu y G. Chen (2014). “Open and continuous fermentation: Products, conditions and bioprocess economy”, *Biotechnology Journal*, núm. 9, pp. 1503-1511.
- López-Arenas, T., O. Anaya-Reza y R. Quintero-Ramírez (2014). *Evaluación técnico-económica de una biorrefinería de caña de azúcar*. Reporte técnico del Área I dentro del Proyecto INSAM-Conacyt: Biorrefinería de caña de azúcar para la producción de alimentos.

- López-Arenas, T., M. González-Contreras, O. Anaya-Reza y M. Sales-Cruz (2017). “Analysis of the fermentation strategy and its impact on the economics of the production process of PHB (polyhydroxybutyrate)”, *Computers and Chemical Engineering*, núm. 107, pp. 140-150.
- López-Arenas, T., M. Sales-Cruz (2009). “Evaluación técnico-económica del proceso de producción de bioetanol 1G y 2G”. Reporte técnico del Grupo de Simulación dentro del Proyecto UAM: La biomasa recurso sustentable esencial: El caso de la producción de etanol.
- Moncada, J., L.G. Matallana y C.A. Cardona (2015). “Selection of Process Pathways for Biorefinery Design Using Optimization Tools: A Colombian Case for Conversion of Sugarcane Bagasse to Ethanol, PHB and Energy”, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 52(11), pp. 4132-4145
- Mosier, N., C. Wyman, B. Dale, R. Elander y M. Ladisch (2005). “Features of promising technologies for pretreatment of lignocellulosic biomass”, *Bioresource Technology*, núm. 96, pp. 673-686.
- Posada, J., J. Naranjo, J. López, J. Higueta y C. Cardona (2011). “Design and analysis of poly-3 hydroxybutyrate processes from crude glycerol”, *Process Biochemistry*, pp. 310-317.
- Quintero, J., M. Montoya, O. Sánchez, O. Giraldo y C. Cardona (2008). “Fuel ethanol production from sugarcane and corn: Comparative analysis for a Colombian case”, *Energy*, núm. 33, pp. 385-399.
- Qureshi, N., B.C. Saha, M.A. Cotta y V. Singh (2013). “An economic evaluation of biological conversion of wheat straw to butanol: a biofuel”, *Energy Conversion and Management*, núm. 65, pp. 456-462.
- Roncal, T., U. Cadierno, J. Torrecilla, J.G. Jaca, I. Garmendia, M. Azpeitia y J. Gómez (2009). “La biotecnología en el sector químico: Producción industrial de productos químicos básicos”, *Ingeniería Química*, núm. 476, pp. 120-123.
- Sales-Cruz, M., O. Anaya-Reza, M. González-Contreras, R. Quintero-Ramírez y T. López-Arenas (2013). “Simulation of a sugarcane biorefinery for food products”, Proceedings of the 21st European Biomass Conference and Exhibition, paper DV2.2.30: pp. 1050-1054.
- Seider, W.D., J.D. Seader y D.R. Lewin (2009). *Product & Process Design Principles: Synthesis, Analysis and Evaluation*. Nueva York: John Wiley&Sons.
- Sistema de Información Arancelaria Vía Internet (SIAMI) (2016) [www.economiasnci.gob.mx], fecha de consulta: noviembre de 2016.
- Stephenson, A.L., P. Dupree, S. Scott y J. Dennis (2010). “The environmental and economic sustainability of potential bioethanol from willow in the UK”, *Bioresource Technology*, 24(101), pp. 9612-9623.
- Tao, L., E. Tan, R. McCormick, M. Zhang, A. Aden, X. He y B. Ziegler (2014). “Techno-economic analysis and life-cycle assessment of cellulosic isobutanol and comparison with cellulosic ethanol and n-butanol”, *Biofuels, Bioproducts & Biorefinery*, núm. 8, pp. 30-48.

- Taras, S. y A. Woinaroschy (2012). “An interactive multi-objective optimization framework for sustainable design of bioprocesses”, *Computers & Chemical Engineering*, núm. 43, pp. 10-22.
- Turton, R., R. Bailie, W. Whiting y J. Shaeiwitz (2008). *Analysis, synthesis and design of chemical processes*. Upper Saddle River: Prentice Hall.
- Viniegra-González, G. (2009). “Biorefinerías de la Caña de Azúcar”, *Concyteg*, núm. 54, pp. 1177-1184.
- Woinaroschy, A. y S. Taras (2009). “Simulation and Optimization of Citric Acid Production with SuperPro Designer using a Client-Server Interface”, *Revista de Chimie*, núm. 60, pp. 979-983.
- Yuan, Z., B. Chen y R. Gani (2013). “Applications of process synthesis: Moving from conventional chemical processes towards biorefinery processes”, *Computers & Chemical Engineering*, núm. 49, pp. 217-229.
- Young, D.M. y H. Cabezas (1999). “Designing sustainable processes with simulation: the waste reduction (WAR) algorithm”, *Computers & Chemical Engineering*, 23(10), pp. 1477-1491.
- Youssef, C.B., G. Goma y A. Olmos-Dichara (2005). “Kinetic modelling of *Lactobacillus casei* ssp. *thamnosus* growth and lactic acid production in batch cultures under various medium conditions”, *Biotechnology Letters*, núm. 27, pp. 1785-1789.

Evaluación de la sostenibilidad para el diseño conceptual de biorrefinerías*

Julio C. Sacramento Rivero
Freddy S. Navarro Pineda

Introducción

Entre las múltiples definiciones de biorrefinería destaca la propuesta por la Agencia Internacional de Energía (Cherubini *et al.*, 2009), la cual se da en términos de la actividad que en ellas se realiza: “Biorrefinación es el procesamiento *sostenible* de biomasa en un portafolio de productos comercializables de base biológica (ingredientes de alimento humano y animal, químicos, materiales, combustibles, energía, minerales, CO₂) y bioenergía (combustibles, potencia, calor)”. Lo más sobresaliente de esta definición es que reconoce la relación intrínseca del concepto de sostenibilidad con la naturaleza de las biorrefinerías. Sin embargo, no es posible determinar si un proceso que transforma biomasa es sostenible sin antes contar con una definición y un marco de referencia para medir su sostenibilidad.

En términos generales, en las evaluaciones de sostenibilidad se definen primeramente un conjunto de principios y criterios, que a su vez dan lugar a una serie de indicadores. Un principio es una declaración básica considerada como algo digno de alcanzar, aceptado como una verdad. Los criterios se refieren a los objetivos

* Se agradece el apoyo financiero de las instituciones estadounidenses National Academies, USAID y U.S. National Science Foundation a partir de los proyectos 1105039, “OISE-PIRE Sustainability, Ecosystem Services, and Bioenergy Development Across the Americas”, y AID-OAA-A-11-00012 “NSF PIRE Collaboration: Sustainability Evaluation of Jatropha Oil Production in Yucatan, Mexico”. Se agradece también al apoyo del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) por medio de la beca de doctorado núm. 297646 y los proyectos Clúster de Biodiésel Avanzado (CEMIEBio 250014), Clúster de biocombustibles lignocelulósicos para el sector autotransporte (CEMIEBio 249564) y Clúster de biocombustibles sólidos para generación térmica y eléctrica (CEMIEBio 246911).

específicos que llevan a cumplir con los principios. Así, los indicadores son mediciones de diferente índole que ayudan a entender en qué grado se logran los objetivos. Es aceptado comúnmente que un buen marco de evaluación de la sostenibilidad de biocombustibles debe tener indicadores que cumplan los siguientes requisitos: que faciliten la comparación entre escenarios y/o sistemas, que sean aplicables a distintas fuentes de biomasa, que sean independientes entre sí (es decir, que no dupliquen información) y que sea un número de indicadores pequeño (Sacramento-Rivero, 2012; Mata *et al.*, 2013).

Aunque existen muchas iniciativas académicas diferentes para definir marcos metodológicos y criterios de sostenibilidad, hay cierto consenso (aunque a veces no explícito) en cuanto a los objetivos que deben buscarse con los sistemas bioenergéticos, incluyendo las biorrefinerías. En el trabajo de Dale y Ong (2014) se hace una buena revisión sobre estos principios, que se resumen en el Cuadro 1.

Debido a la alta complejidad de los sistemas bioenergéticos, es complicado entender la interrelación entre estas categorías por lo que comúnmente se detectan conflictos entre principios, de manera que sistemas que mejoran ciertas categorías, perjudican otras. Información acerca de estas interrelaciones es lo más valioso que genera un buen análisis de sostenibilidad, puesto que establece un punto de partida para detectar las áreas de oportunidad que deben mejorarse con el tiempo en los sistemas existentes y nuevos.

Finalmente, debido a que recabar información sobre tantas categorías es a menudo costoso y prolongado, las evaluaciones de sostenibilidad comúnmente contemplan un subconjunto de éstas. En los párrafos siguientes se presentan las metodologías más adoptadas comúnmente para evaluar y certificar sistemas de bioenergía y los principios y criterios que incluyen.

Entre los marcos regulatorios y los esquemas de certificación de la sostenibilidad de biocombustibles que usan el enfoque de Principios-Criterios-Indicadores destacan (BEFSCI, 2011): Testing Framework for Sustainable Biomass (TFSB), European Commission-Renewable Energy Directive (EC-RED), Roundtable on Sustainable Biomaterials (RSB), International Sustainability & Carbon Certification (ISCC) y Global Bioenergy Partnership (GBEP). Tanto los marcos regulatorios como los esquemas de certificación tienen criterios de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Así, la EC-RED establece una reducción del 50% (60% en 2018) mientras que la US-EPA del 20 y del 60% para biocombustibles convencionales y celulósicos, respectivamente (Dam *et al.*, 2010). Actualmente, no hay metas de reducción establecidas en torno a otros impactos ambientales, aunque las métricas del Ecological Scarcity Method (Frischknecht y Büsser Knöpfel, 2013) permiten definir

Cuadro 1. Principios de sostenibilidad para sistemas de bioenergía

PRINCIPIO DE SOSTENIBILIDAD	CATEGORÍA DE INDICADORES
Disminución de emisiones netas de gases de efecto invernadero (GEI), en relación con sistemas de energía fósil.	Emisiones de GEI
Mantener o mejorar la salud de suelos (reducir erosión, aumentar carbono orgánico en el suelo, etcétera) en las tierras en las que se cultiva la biomasa que se utiliza para la bioenergía.	Calidad y cantidad de suelo
Mantener la calidad del aire en los sitios en los que se cultiva, procesa y utiliza la biomasa que se utiliza para la bioenergía.	Calidad del aire
Mantener o mejorar la calidad del agua y minimizar el impacto en el suministro local de agua en las áreas en las que se cultiva y procesa la biomasa que se utiliza para la bioenergía.	Cantidad y calidad de agua
Mantener o incrementar la biodiversidad de plantas y vida silvestre.	Biodiversidad
Proteger ecosistemas sensibles (fácilmente degradables o ambientalmente significativos) y minimizar la conversión del uso de suelo de sistemas de alta intensidad a sistemas de baja intensidad.	Protección de ecosistemas/ Cambio del uso del suelo
Minimizar residuos y desarrollar métodos para su adecuada disposición y reciclaje.	Gestión de residuos
Producir grandes cantidades de energía para la sociedad, más que la requerida para producirla, en particular para incrementar el acceso a la energía de comunidades rurales.	Producción energética
Mantener o incrementar los servicios nutrimentales que proveen actualmente los recursos de la tierra.	Seguridad alimentaria/ Nutrición
Proveer beneficios sociales (mejores condiciones de trabajo, mayores estándares de vida, derechos de propiedad transparentes, equidad de género, mejoras en la salud y bienestar humano, etcétera) a las comunidades locales y a los sitios en donde se cultiva la biomasa que se utiliza para la bioenergía, a la vez de minimizar los impactos negativos a las mismas.	Calidad de vida
Generar beneficios económicos (empleo, mayores ingresos, capacitación de personal, etcétera) a las comunidades locales y a los sitios en donde se cultiva la biomasa que se utiliza para la bioenergía.	Economías locales
Ser económicamente rentables, preferentemente sin incentivos económicos o subsidios.	Rentabilidad/Estabilidad económica
Limitar la dependencia en insumos clave que son en sí mismos no renovables (combustibles fósiles y químicos derivados del petróleo, ciertos minerales) o que son producidos de manera no sostenible.	Insumos sostenibles

Fuente: adaptado de Dale y Ong (2014).

valores meta de reducción a partir de los “flujos ambientales” de muchos contaminantes. El Cuadro 2 es un resumen de los criterios que incluyen algunas iniciativas de evaluación como las descritas anteriormente.

Algunos de estos marcos consisten en un análisis de decisión multicriterio (ADM). Este enfoque considera una primera etapa en donde los objetivos y preferencias de los actores involucrados (*stakeholders*) se usan para definir los principios y criterios de

Cuadro 2. Resumen de los factores analizados por diferentes marcos para la evaluación de sostenibilidad de la producción de biocombustibles

PARÁMETRO	TSFB (CRAMER ET AL., 2007)	(RED, 2009)	(RSB, 2011)	(GBEP, 2011)	(GNANSOUNOU, 2011)	(MCBRIDE ET AL., 2011)	(SACRAMENTO-RIVERO, 2012)	(DALE ET AL., 2013)	(MATA ET AL., 2013)
Economía									
Comercio exterior				X				X	
Rentabilidad				X	X		X	X	
Calidad de aire	X	X	X	X	X	X	X		
Biodiversidad	X	X	X	X	X	X	X		
Seguridad energética				X	X		X	X	X
Emisiones de GEI	X	X	X	X	X	X	X		X
Cambio de uso del suelo	X	X	X	X	X		X		X
Calidad del suelo	X	X	X	X	X	X	X		
Uso de la tecnología, materias primas y manejo de residuos	X	X	X						
Calidad y uso del agua	X	X	X	X	X	X	X		
Social									
Empleo y condiciones de trabajo	X	X	X	X	X		X	X	
Seguridad alimenticia	X	X	X	X	X		X	X	
Gobierno, legalidad y derechos humanos	X	X	X	X	X				
Desarrollo rural	X		X	X			X		
Aceptabilidad social			X					X	

Fuente: adaptado de Ismail, Rossi y Geiger (2011).

sostenibilidad del sistema a evaluar. Otros marcos incluyen principios, criterios e indicadores predefinidos, los cuales deben evaluarse con metodologías ya establecidas.

La mayoría de los marcos de referencia mencionados anteriormente se emplean para medir el impacto de las intervenciones de un proyecto de bioenergía sobre los diferentes criterios que contemplan. Pocas son las metodologías que permiten un sondeo preliminar y sistemático de la sostenibilidad de un proyecto durante la etapa de diseño. Más adelante se describe un ejemplo de este tipo de metodología, que fue diseñada precisamente con este fin y para ser usada durante el proceso de

diseño conceptual de biorrefinerías. Posteriormente, se ilustra su aplicación a un caso de estudio.

Descripción de la metodología de evaluación de sostenibilidad para el diseño de biorrefinerías

El método propuesto por Sacramento-Rivero *et al.* (Sacramento-Rivero, 2012; Sacramento-Rivero, Navarro-Pineda y Vilchiz-Bravo, 2016) consiste en seis categorías de sostenibilidad que engloban 10 indicadores normalizados a una escala del tipo “distancia al objetivo” (*distance to target*). En esta escala, el mejor valor posible del indicador normalizado es cero, y su valor puede ser mayor sin contar con un límite. Sin embargo, el valor de uno representa un estado crítico (que indica el valor del indicador a partir del cual el sistema no es sostenible). De esta manera, un indicador que alcance un valor entre 0 y 1 se considera sostenible, e insostenible con valores mayores a 1. Las categorías incluidas en el análisis son las siguientes: 1) *Renovabilidad*, 2) *Economía*, 3) *Desplazamiento de productos fósiles*, 4) *Biodiversidad*, 5) *Mitigación ambiental*, y 6) *Desarrollo comunitario*, las cuales se explicarán con más detalle en las secciones siguientes.

El marco metodológico que se describe considera cada indicador independientemente de los demás, es decir, no se les asigna ponderación a los diferentes aspectos evaluados. Por esta razón es de suma importancia entender lo que representa cada valor en la escala normalizada, pues en el análisis de resultados, cada indicador contará una parte de la historia completa. A continuación se describe cada uno de los indicadores, en función de “qué mide”, y “qué representa el valor crítico”, pues en estos aspectos reside la definición de sostenibilidad desde la perspectiva de cada indicador. El lector es referido a las publicaciones originales para conocer detalles particulares de cada indicador, que por razones de espacio no se incluyen en este capítulo. Nótese que las variables de todos los indicadores son siglas de las abreviaturas en idioma inglés.

a) Categoría: renovabilidad

Se refiere a la capacidad de la biorrefinería de mantener la provisión de biomasa dentro de sus límites naturales según la productividad en campo bajo los niveles de insumos proyectados. Incluye dos indicadores:

- *Potencial de valorización biotecnológica (BVP)*. Originalmente propuesto por Duarte *et al.* (2007). Consiste en asignar puntos en una escala del 0 al 3 a 12 criterios referentes a la biomasa que utiliza la biorrefinería como insumo principal. Los criterios incluyen aspectos de composición fisicoquímica, disponibilidad y concentración geográfica de la biomasa, competencia en mercados actuales y estado de la tecnología actual para su transformación. En su publicación, los autores definieron que las fuentes de biomasa con puntaje total mayor a 21 cumplían los requisitos para ser consideradas en un esquema de biorrefinería. Por esto, el valor crítico del indicador se tomó en 21. Para adaptar este indicador a la escala de sustentabilidad, se utiliza la siguiente ecuación:

$$BVP = 1 - \frac{\text{Puntaje} - 21}{36 - 21} \quad (1)$$

- *Consumo de materia prima (RMC)*. Compara la tasa de consumo de la biomasa RM_b con su tasa de producción en campo RM_{re} , sujeta a los límites de productividad supuestos por el sitio, la variedad, el nivel y tipo de insumos, etcétera. Esta última es el valor crítico del indicador. Con una división simple de ambos valores se obtiene el indicador normalizado:

$$RMC = \frac{RM_b}{RM_{re}} \quad (2)$$

b) *Categoría: economía*

Abarca indicadores de factibilidad económica con base en los resultados de un análisis tecno-económico (ATE) de anteproyectos, como el que propone el libro clásico de Peters y Timmerhaus (Peters, Timmerhaus y West, 2002). De este análisis se obtienen variables económicas básicas como los costos de producción (CO_p), el costo de inversión (CI_{inv}), ventas netas (VN), el valor presente neto (VPN), el punto de equilibrio, etcétera. En esta categoría se incluye un solo indicador, el margen de beneficio bruto, que define si es posible generar ganancias con el proyecto. Otras categorías incluyen indicadores con información financiera complementaria, como se explica más adelante.

- *Margen de beneficio bruto modificado* (MGM). El margen de beneficio bruto se calcula con la expresión $\frac{VN - COp}{VN}$. Básicamente refleja el porcentaje de ganancias que se tendría si sólo se consideran los costos de producción. La expresión anterior se modifica para expresarla en la misma escala de normalización, de manera que:

$$MGM = \frac{COp}{VN} \quad (3)$$

c) *Categoría: desplazamiento de productos fósiles*

Expresa el desempeño de la biorrefinería con respecto a los productos fósiles que predominan en el mercado. Para ser considerados sostenibles, los bioproductos deben representar mitigación de emisiones y uso de recursos con respecto a las alternativas actuales en su ciclo de vida completo. Como línea base para calcular la mitigación, se utiliza el sistema alternativo que se define durante el Análisis de Ciclo de Vida (ACV), siguiendo la norma ISO 14040:2006(es). En este marco de referencia, se definieron tres indicadores de mitigación:

- *Reducción de uso de agua dulce* (WR). Primeramente, se mide el consumo de agua en el ciclo de vida de la biorrefinería, dividido entre el consumo de agua en el sistema alternativo, que se define durante el análisis de ciclo de vida (ACV). Esta fracción es la reducción en el consumo de agua WR_b . Como valor crítico se utiliza la razón entre la extracción de agua actual de las cuencas principales en el ciclo de vida y la extracción máxima permitida para esas mismas cuencas WR_c . Así, se obtiene el valor normalizado como la relación entre estas dos fracciones:

$$P = \frac{(1+r) - d}{u - d} \quad (4)$$

- *Fracción de energía no renovable* (NRES). Mide la cantidad de energía fósil desplazada por la biorrefinería con respecto al sistema alternativo. El porcentaje de energía no renovable que utiliza la biorrefinería para su funcionamiento $NRES_b$ se divide entre el valor crítico, que es el porcentaje de energía fósil máximo que se espera tolerar en sistemas de bioenergía $NRES_c$, que a menudo está expresado como metas nacionales de reducción de uso de

energía fósil. Esta división ya se conforma a la escala normalizada de sostenibilidad, de manera que:

$$NRES = \frac{NRES_b}{NRES_c} \quad (5)$$

- *Relación de costos de materia prima (RCR)*. Es una comparación económica de las materias primas principales de ambos sistemas. El costo (o precio) de la materia prima de la biorrefinería CF_b se divide entre el costo (o precio) de las materias primas del sistema alternativo CF_f . El criterio de sostenibilidad es que debe ser más atractivo económicamente procesar biomasa que las materias primas fósiles. Así, el indicador normalizado es:

$$RCR = \frac{CF_b}{CF_f} \quad (6)$$

d) Categoría: biodiversidad

Medir impactos sobre la biodiversidad durante una etapa de diseño conceptual es sumamente complicado. Los pronósticos que pueden hacerse son únicamente en función de las modificaciones esperadas de los ecosistemas cuando existen cambios extensivos en el uso de suelo. Sin embargo, las afectaciones a la biodiversidad son un aspecto sumamente importante cuando se evalúa la sostenibilidad de un proyecto. Por lo tanto, el marco metodológico incluye un indicador que permite una estimación preliminar del impacto sobre la biodiversidad en los sitios donde se genera la biomasa.

- *Uso sostenible de la tierra (SLU)*. Los factores de caracterización F que se usan para este indicador se toman del reporte para la metodología de evaluación de impacto ambiental usado por el gobierno suizo (Frischknecht y Büsser Knöpfel, 2013). Éstos reflejan en un número, la cantidad de especies vegetales y animales que se espera observar en cada tipo de uso de suelo, y en diferentes regiones climáticas del mundo. El indicador consiste en comparar estas especies y devuelve un número más alto cuanto mayor sea el número de especies que desaparecen al hacer un cambio de uso de suelo para generar biomasa. De esta manera, el indicador normalizado se calcula así:

$$SLU = 1 + \frac{\sum(A_{new,i} - A_{old,i}) \cdot F_i}{\sum A_i} \quad (7)$$

donde $A_{new,i}$ es la extensión de área de cada tipo de uso de suelo i que se instala debido al proyecto de biorrefinería, y $A_{old,i}$ es la extensión de superficie que desaparece del respectivo tipo de uso de suelo.

e) *Categoría: mitigación ambiental*

Compara los impactos ambientales potenciales de la biorrefinería con los del sistema alternativo. En esta categoría, se usa un solo indicador que integra, mediante el procedimiento estandarizado de ponderación, todos los resultados de la evaluación de impacto ambiental del ACV, de acuerdo con los lineamientos del Ecological Scarcity Method (Frischknecht y Büsser Knöpfel, 2013). De esta manera, los impactos ambientales potenciales en las categorías de calentamiento global, acidificación, eutrofización, toxicidad humana y del ecosistema, y en general todas las que se definen como importantes durante el ACV, quedan englobadas en el siguiente indicador:

- *Reducción de emisiones de línea base (RBE)*. Para explicar este indicador, se tomará como ejemplo la categoría de impacto ambiental Potencial de Calentamiento Global (GWP). Con el ACV se pueden estimar las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) tanto de la biorrefinería ($EE_{b,GWP}$) como del sistema alternativo ($EF_{f,GWP}$). La razón de estas dos cantidades será la reducción de emisiones de GEI lograda en la categoría GWP $ER_{GWP} = EF_{b,GWP}/EF_{f,GWP}$. Esta reducción puede ser suficiente (sostenible) o no, según la reducción necesaria de GEI en el contexto de la biorrefinería. Entonces, el valor crítico para reducción del impacto GWP es lo que indique la autoridad competente como reducción crítica ($ER_{c,GWP}$). Por ejemplo, en Estados Unidos, las certificaciones requieren que los biocombustibles avanzados logren una reducción del 60% de emisiones de GEI con respecto a los combustibles fósiles. En este caso, $ER_{c,GWP} = 0.4$. Esta misma explicación aplica a todas las categorías de impacto ambiental incluidas en el ACV, de manera que para cada categoría i se puede calcular una reducción ER_i . Por otro lado, el valor de reducción crítica será diferente para cada categoría; valores menores de $ER_{c,i}$ implican mayores distancias al nivel deseado de impacto. De acuerdo con los lineamientos de normalización del Ecological Scarcity Method, las categorías más alejadas del objetivo deben tener mayor peso en la normalización, por lo que proponen una función

cuadrática para calcular el factor de ponderación de cada categoría i , de la siguiente manera:

$$w_i = \frac{\left(\frac{1}{ER_{c,i}}\right)^2}{\sum_i^n \left(\frac{1}{ER_{c,i}}\right)^2} \quad (8)$$

Finalmente, el valor del indicador que agrega todas las categorías y normalizado en la escala de sostenibilidad es:

$$RBE = \sum_i^n \frac{ER_i \cdot w_i}{ER_{c,i}} \quad (9)$$

f) Categoría: desarrollo comunitario

Mide la capacidad en la que el sistema de biorrefinería fomenta el desarrollo de comunidades locales, mediante inversiones filantrópicas y generación de empleo. Incluye dos indicadores:

- *Grado de empleo (EE)*. La generación de empleo es un indicador clave que se relaciona con muchos otros indicadores sociales relativos al bienestar personal y familiar. Al nivel preliminar del diseño conceptual de la biorrefinería, se puede proyectar cuántos empleos crea el sistema por millón de dólares vendidos EE_b . La manera de contextualizar este número es mediante comparación con el mismo indicador en giros similares. En el caso de la biorrefinería, el número se contextualiza con el máximo (EE_{max}) y el mínimo (EE_c) reportado en la industria de transformación química. Por lo tanto, el indicador normalizado es:

$$EE = \frac{EE_{max} - EE_b}{EE_{max} - EE_c} \quad (10)$$

- *Inversión en desarrollo comunitario (CDI)*. Siguiendo la misma lógica que el indicador anterior, se define un indicador que reserve parte de las ganancias de la biorrefinería para invertir en proyectos filantrópicos o de inversión en la comunidad (programas de salud, mejoramiento de vivienda, desayunos escolares, etcétera). En la etapa de diseño conceptual se puede proyectar una

inversión por millón de dólares en ventas (CDI_b) y comparar en el contexto de las mejores prácticas en la industria química. Con definiciones análogas al indicador anterior, el indicador normalizado se calcula como:

$$CDI = \frac{CDI_{max} - CDI_b}{CDI_{max} - CDI_c} \quad (11)$$

Resultados de la aplicación de la metodología a un caso de estudio

Para ilustrar la manera en la que se reportan los resultados de esta metodología, se incluye en esta sección una versión reducida de un caso de estudio. Los detalles del cálculo de cada indicador, los datos de entrada y el análisis detallado de los resultados se pueden consultar en la publicación original (Navarro-Pineda, Handler y Sacramento- Rivero, 2018). En este capítulo únicamente se incluyen los datos y análisis esenciales para apreciar la utilidad de la metodología y entender el significado de los resultados y sus implicaciones.

El caso de estudio corresponde a un sistema de producción de biodiésel y otros coproductos a partir de biomasa de *Jatropha curcas*. La biorrefinería estudiada se define según la clasificación de la Agencia Internacional de Energía (Cherubini *et al.*, 2009) como una “biorrefinería de 3-plataformas (aceite, lignina/bioaceite, calor y electricidad,) para la producción de bioaceite, biocarbón, biodiésel y químicos a partir de un cultivo oleaginoso”.

El aceite de la planta oleaginosa *J. curcas*, un arbusto de origen centroamericano, es considerado como una materia prima potencial para la producción de biodiesel en México. Sin embargo, como ocurre con todas las oleaginosas, el aceite representa menos del 9% del total de la biomasa generada en campo, como puede estimarse a partir de los porcentajes señalados en la Figura 1. En la biorrefinería, se busca aprovechar toda la biomasa disponible en el fruto, para minimizar residuos y aprovechar mejor el potencial energético de la biomasa.

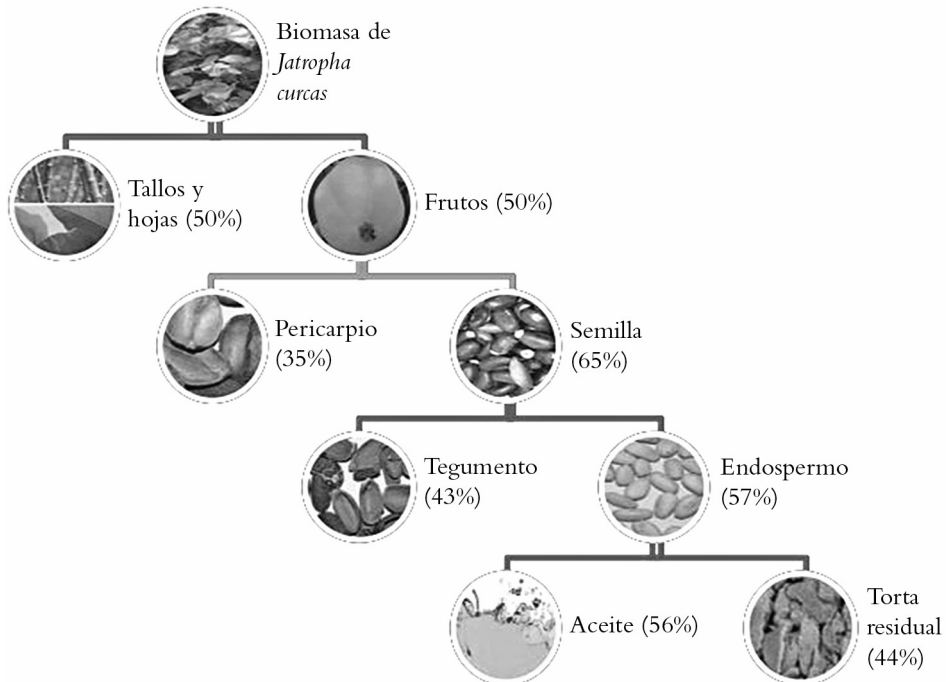
En este esquema se aprovecha la biomasa lignocelulósica del fruto (pericarpio) y de la semilla (tegumento) y la torta de extracción (endospermo) resultante de la extracción del aceite de la semilla para producir calor, electricidad, biocarbón y bioaceite con procesos termoquímicos (pirolisis y ciclo combinado). Por otro lado, el aceite de la semilla se procesa mediante transesterificación básica para producir biodiésel, glicerina refinada y fosfato de potasio. Para el análisis, el aprovechamiento

de la *J. curcas* se dividió en dos etapas: 1) la agronómica, que contempla las actividades involucradas para el cultivo de la *J. curcas*, y 2) la industrial, que incluye todos los procesos de transformación de la biomasa.

La etapa agronómica se modeló de acuerdo con datos experimentales de plantaciones en suelos pedregosos del noreste de la Península de Yucatán, en México.

Los insumos fueron reportados por los dueños de 200 ha de plantaciones nuevas de *J. curcas*, después de cuatro años de establecidas en ranchos abandonados. Aunque es común encontrar en la literatura que la planta no requiere riego ni pesticidas, los productores reportaron una tasa de riego de 5 000 m³/ha/a y dosis específicas de fertilizantes, pesticidas, herbicidas e insecticidas. Se asumió que no hay producción significativa de frutos sino hasta el quinto año, y que el cultivo mantendría un rendimiento de semilla de 2 000 kg/ha/a durante 20 años. La cosecha se realiza manualmente y los frutos se transportan en camiones de 3.5 t de

Figura 1. Distribución de la biomasa de *J. Curcas*



Fuente: elaboración propia.

capacidad hasta las instalaciones industriales. En este punto inicia la etapa industrial, con una serie de separaciones físicas como preparación para la extracción del aceite de las semillas. Los insumos de estas separaciones son únicamente la electricidad requerida por la maquinaria. Todos los procesos químicos y térmicos desde la extracción del aceite hasta la purificación del biodiésel y coproductos se simularon en el programa Aspen Plus v8.4 bajo condiciones de operación promedio obtenidas de la literatura, convenientemente resumidas en la revisión de Navarro-Pineda *et al.* (2016).

a) Análisis tecno-económico

El Análisis Tecno-Económico (ATE) se realizó siguiendo la metodología propuesta por Peters y Timmerhaus (Peters, Timmerhaus y West, 2002). El dimensionamiento de los equipos principales se obtuvo directamente de la simulación de proceso. Su costo se estimó mediante cotización directa o en su defecto, correlaciones de costos obtenidas de la literatura (Balaban, 2000). Para estimar los demás costos de inversión y operación asociados se usaron los porcentajes para planta de sólidos y líquidos, según el método mencionado. El capital de inversión se anualizó usando una tasa de interés de 10% a 20 años. La cantidad de personal en campo se tomó de las plantaciones existentes, y el personal en la planta se estimó con el mismo método del Análisis Tecno-Económico.

b) Análisis de Ciclo de Vida

El cálculo del indicador *RBE* requiere de un Análisis de Ciclo de Vida (ACV) cuyo objetivo sea determinar los beneficios ambientales de los productos generados a partir de la biomasa de *J. curcas* con respecto al sistema alternativo. La unidad funcional es 1 ha de plantaciones de *J. curcas*, bajo un enfoque de “ampliación del sistema por expansión”. El sistema alternativo se define como: un sistema hipotético con productos que satisfacen las mismas necesidades que los de la biorrefinería y que se definen como aquellos que dominan el mercado actual. El sistema alternativo y su comparación con la biorrefinería se muestra en el Cuadro 3. Se empleó el programa Simapro v8.2 para la realización de los cálculos. Los impactos ambientales, así como los requerimientos de energía y agua no renovables de los productos alternativos fueron obtenidos de la base de datos ecoinvent®.

Cuadro 3. Productos del sistema alternativo y relaciones de sustitución para cada producto

SISTEMA DE BIOENERGÍA (UNIDAD DE COMPARACIÓN)	SISTEMA ALTERNATIVO (CANTIDAD DESPLAZADA)*	CRITERIO DE REEMPLAZO Y REFERENCIA
Cultivo agronómico (1 ha)	Pastizal manejado (1 ha)	Cambio de uso de suelo directo definido por la empresa dueña de las plantaciones (fuente confidencial).
Biodiésel, 41 MJ/kg (1 kg)	Diésel → fósil, → 45 → MJ/kg (0.911 kg)	Cantidad de energía liberada en la combustión
Bioaceite, 18 MJ/kg (1 kg)	Combustóleo, 41.8 MJ/kg (0.43 kg)	Cantidad de energía liberada en la combustión
Biocarbón, 29.6 MJ/kg (1 kg)	Carbón, 29.6 MJ/kg (1 kg)	Cantidad de energía liberada en la combustión
Glicerina cruda (1 kg)	Glicerina cruda obtenida de aceite de soya reciclado (0 kg)	La glicerina cruda producida compite con glicerina cruda de otros procesos de producción de biodiésel, por lo que no mitiga emisiones con respecto al sistema alternativo.
Sulfato de potasio (1 kg)	Sulfato de potasio (1 kg)	El sulfato de potasio es un compuesto muy utilizado como fertilizante. Aunque el fertilizante de potasio más común es el cloruro de potasio, puesto que algunos cultivos son sensibles al cloruro, se considera que el sulfato de potasio no es un sustituto directo de éste.
Electricidad (1 kWh)	Electricidad con el mix disponible en la península de Yucatán (1 kWh)	La electricidad se consumirá en Yucatán. Los factores de emisión son los específicos de la matriz energética para Yucatán (Navarro-Pineda, Handler y Sacramento-Rivero, 2017).

Fuente: elaboración propia.

Las emisiones de CO₂ por concepto de cambio de uso del suelo en la etapa agronómica se estimaron asumiendo que el tipo de tierra inicial era pastizales cultivados en una zona tropical húmeda, el tipo de suelo eran cambisoles¹ y que no se utilizó fuego ni labranza. Esta información fue alimentada al calculador desarrollado por la RSB (2011). De esta misma referencia se tomaron las métricas para calcular

¹ Los suelos cambisoles permiten un amplio rango de posibles usos agrícolas. Sus principales limitaciones están asociadas con la topografía, bajo espesor, pedregosidad o bajo contenido en bases. En zonas de elevada pendiente su uso queda reducido al forestal o pascícola [<http://www.eweb.unex.es/eweb/edafo/FAO/Cambisol.htm>].

las emisiones de NH_3 , N_2O y NO_x provenientes de la aplicación de fertilizantes. Las emisiones de metales pesados al agua y al suelo fueron calculadas considerando las métricas de la Agroscope Reckenholz-Tänikon Research Station (Nemecek y Schnetzer, 2012). Se asumió que la composición de metales pesados del fertilizante utilizado fue similar al del fertilizante 21-53-00 usando los datos del Washington State Department of Agriculture (2018).

La metodología CML-IA 2000 fue empleada para la realización del ACV incluyendo las siguientes categorías de impacto: Merma de Recursos Abióticos (ADP), Potencial de Acidificación (PA), Potencial de Eutrofización (EP), Potencial de Calentamiento Global (GWP), Potencial de Merma de la Capa de Ozono (OLDP), Potencial de Toxicidad Humana (HTP), Potencial Ecotoxicidad de Agua Dulce (FWAEP), Potencial de Ecotoxicidad Acuática de Agua Marina (MWAEP), Potencial de Ecotoxicidad Terrestre (TEP) y Potencial de Creación de Ozono Fotoquímico (POCP).

Resultados

El Cuadro 4 resume los productos, materias primas, emisiones y mano de obra requerida, según el inventario de ciclo de vida recabado. Se estimó que la quema del 30% del pericarpio disponible sería suficiente para suplir las necesidades energéticas de la etapa industrial. Por tanto, la fracción remanente, junto con la torta residual y el tegumento, pueden ser utilizados para la generación de bio-aceite y bio-carbón. El K_3PO_4 producido permite cubrir la dosis de fósforo requerida en la etapa agronómica. Sin embargo, es necesario añadir 1.48 kg/ha/a de urea (46-00-00) para suplir por completo la dosis de nitrógeno.

a) Categoría de renovabilidad

Potencial normalizado de valorización biotecnológico (BVP). Un potencial cultivo de *J. curcas*, siendo una planta herbácea, con biomasa suave de alta densidad, con valor de venta bajo, pero independiente de algún mercado aún, así como una disponibilidad y concentración baja, entre otros aspectos, llevan a obtener un puntaje total de 23 en la escala de este indicador. Aplicando la ecuación (1), el indicador *BVP* alcanza un valor de 0.87 (menor que 1), lo que indica que la *J. curcas* es una materia prima apropiada para Yucatán bajo los lineamientos de este indicador.

Cuadro 4. Productos, materias primas, emisiones y mano de obra requerida para cada escenario

PARÁMETRO	UNIDAD (/HA/A)	VALOR
Productos		
Biodiesel	kg	604
Glicerina refinada	kg	61
K ₃ PO ₄	kg	6.81 ^a
Bioaceite	L	1000
Biocarbón	kg	509
Electricidad	MJ	206
Materias primas		
Aire	kg	70 506
Hexano	kg	0.15
Metanol	kg	70.12
KOH	kg	6.31
H ₃ PO ₄	kg	3.15
Agua	kg	1 748
Emisiones		
Aire caliente	kg	37 881
Vapor	kg	1 239
Gases de combustión	kg	5 527
Ceniza	kg	38.16
Empleados		
Técnicos	Empleados	30
Ingenieros	Empleados	15

a Usado para reducir los requerimientos de fertilizante mineral.

Fuente: elaboración propia.

Consumo de materia prima (RMC). Se espera que durante los primeros cuatro años la productividad no sea suficiente como para iniciar la producción comercial de biodiésel. A partir del quinto año, toda la producción de fruto se aprovecharía en la biorrefinería. Haciendo el balance en el ciclo de vida del proyecto, se produciría 5% más biomasa que la necesaria para satisfacer la demanda de fruto, el indicador $RMC = 0.95$ lo que indica es que el sistema maneja la biomasa dentro de sus límites de renovabilidad.

b) *Categoría de factibilidad económica*

Margen de ganancias modificado (MGM). Del ATE mencionado se calculó una tasa interna de retorno de 13.8%, y un tiempo de recuperación de la inversión de nueve años. Los costos de operación representan 79% de las ventas netas, por lo que el indicador MGM alcanza un valor de 0.79 (económicamente viable). La etapa de cultivo contribuye en 62% de los costos totales de producción, de los cuales los requerimientos de mano de obra representan el 58 por ciento.

c) *Categoría de desplazamiento de productos fósiles*

Reducción de uso de agua dulce (WR). En Yucatán, el agua dulce de carácter renovable es un recurso abundante ya que sólo 14.3% de éste fue utilizado en 2015 (Conagua, 2016). De esta manera, el valor crítico es $WR_c = 1.41$, lo cual indica que el consumo del agua de la biorrefinería puede ser hasta un 1.41 veces mayor al de su sistema de referencia. En su ciclo de vida, la biorrefinería consume 9.82 veces más agua que el sistema alternativo y, por tanto $WR = 6.95$, este valor indica que la biorrefinería potencialmente representaría una carga varias veces mayor que la que los recursos hídricos locales pudieran soportar. El mayor consumo de agua se presenta en la etapa agronómica debido a los altos requerimientos de irrigación para las plantaciones. Esta tendencia es común para cultivos con alta demanda de riego y es similar a lo reportado en otros trabajos (Chávez-Rodríguez y Nebra, 2010; Faist Emmenegger *et al.*, 2011; Yang *et al.*, 2012). Este indicador identifica un foco rojo en el consumo de agua. La decisión final sobre este punto recaerá en si es posible obtener los permisos de extracción de agua en los sitios de las plantaciones, en función de la disponibilidad de agua local, aspecto que no puede ser evaluado cuando se usa un enfoque de ciclo de vida.

Contribución de energía no renovable (NRES). La Unión Europea establece que la contribución de la energía no renovable al total de energía consumida por un proceso de producción no debe ser mayor al 42% para el año 2050. Este criterio fue definido como el valor crítico ($NRES_c = 0.58$). En la biorrefinería, 54% de los requerimientos energéticos son cubiertos con energía no renovable, y el resto con la electricidad producida de la biomasa lignocelulósica. De esta manera, no se alcanza la meta establecida por el marco europeo y por lo tanto $NRES = 1.29$. El mayor consumo de energía no renovable (69%) se presenta en la producción de los agroquímicos necesarios (pesticidas, herbicidas, fungicidas e insecticidas) usados en las plantaciones. Estos

resultados difieren de los reportados por otros estudios (Prueksakorn *et al.*, 2010; Eshton, Katima y Kituyi, 2013; Portugal-Pereira *et al.*, 2016) pues estos trabajos asumen mayores requerimientos de fertilizantes y menores (o incluso nulos) requerimientos de agroquímicos. Una manera de reducir el valor de este indicador es incorporando al proyecto el consumo de energías renovables como la solar o eólica, a costa de incrementar el capital de inversión inicial. Igualmente, la optimización en el consumo de fertilizantes y otros agroquímicos podría reducir el consumo de energía fósil en el ciclo de vida.

Relación de costos de materia prima (RCR). El cálculo del indicador *RCR* requiere de los costos de materia prima de la biorrefinería y del sistema de referencia. Sin embargo, no fue posible obtener de Petróleos Mexicanos (Pemex) estos costos, por lo que se optó por comparar costos totales de producción en vez de costos de materia prima. El Cuadro 5 resume la cantidad de productos que se desplazarían (según el sistema alternativo), así como el valor calculado del *RCR*. Se asumieron costos de producción de USD\$0.42 por litro para el diésel, USD\$0.23 por litro para el combustible, USD\$0.03 para el carbón, USD\$2.00 por millón de Btu para el gas natural y de USD\$0.52 por kg para el aceite de palma (Pemex-Refinación, 2018).

Cuadro 5. Productos desplazados por los escenarios analizados

DIÉSEL (KG/A)	ELECTRICIDAD CONVENCIONAL (KWH/A)	COMBUSTÓLEO (M ³ /A)	CARBÓN (KG/A)	K ₂ SO ₄ (KG/A)	COSTO DE PRODUCCIÓN (USD\$/A)	RCR
2 726 360	285 469	2 150	2 542 903	6.81	\$2 050 562	1.89

Fuente: elaboración propia.

El indicador *RCR* es mayor que 1, lo que indica que, en el contexto actual, la producción de los productos alternativos es menos costosa que la de los productos derivados de la *J. curcas*, lo que resultaría en una competencia insostenible.

d) Categoría de biodiversidad

Uso sostenible de la tierra (SLU). Se asumió que el cultivo de *J. curcas* se puede considerar “vegetación herbácea o de arbustos”, y que se estableció en “áreas no agrícolas, artificiales y con vegetación”. Los factores de caracterización para estos tipos de tierra son de 0.00 y 0.59, respectivamente (Frischknecht y Büsser Knöpfel, 2013). De esta manera, el indicador *SLU* alcanza un valor de 0.41, implicando que la biodiversidad

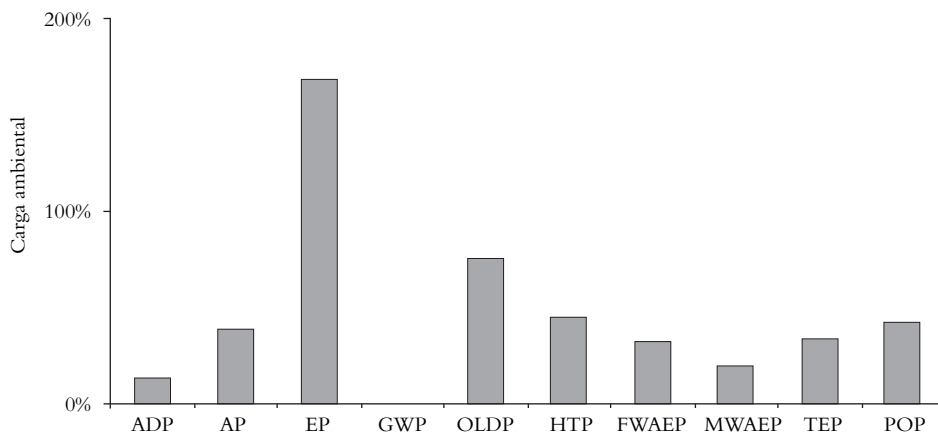
sería alrededor de 60% mayor en la plantación de *J. curcas* que en los pastizales que se sustituyeron. Por supuesto que este valor es una estimación preliminar en cuanto a la biodiversidad total, y no contempla que las plantaciones de *J. curcas* serían monocultivos, sino que se conservarían parches y corredores ecológicos. Si un proyecto de esta naturaleza se aprobara, las consideraciones sobre la biodiversidad deberán ser consideradas según las particularidades de los sitios en donde se den las intervenciones y bajo los ordenamientos ecológicos correspondientes.

e) Categoría de mitigación ambiental

Reducción de emisiones base (RBE). La Figura 2 muestra la carga ambiental de la biorrefinería, como un porcentaje referido a la carga ambiental del sistema alternativo (al que se le asigna 100%). La biorrefinería tiene la capacidad de reducir los potenciales de todas las categorías de impacto, excepto en el potencial de eutrofización (EP). Este último tiene un valor mayor que el sistema alternativo debido a la producción y uso de los agroquímicos requeridos en la etapa agronómica. Esta tendencia es, en general, una consecuencia implícita de la producción de biocombustibles (Shonnard *et al.*, 2015).

En los cálculos relacionados con el cambio de uso del suelo se consideró que la *J. curcas* se estableció en pastizales cultivados, ya que ésta se considera la situación más

Figura 2. Carga ambiental de los escenarios analizados



Fuente: elaboración propia.

probable en Yucatán. Como resultado, se alcanzarían captaciones anuales de 2 692 kg de CO₂ por hectárea cultivada. Dichas captaciones son suficientes para alcanzar una mitigación en el potencial de calentamiento global (GWP), es decir, la carga ambiental a este impacto ambiental es negativa, y para efecto de la metodología de sostenibilidad el valor se toma como cero por ciento.

El Cuadro 6 muestra los valores críticos de la reducción de emisiones ($ER_{c,i}$), los factores de ponderación (w_i) calculados con la ecuación (8) y el valor final del indicador *RBE*. El flujo crítico del GWP fue tomado de las metas establecidas por la RSB (RSB, 2011), mientras que los de las otras categorías de impacto fueron estimados usando las métricas del Ecological Scarcity Method (Frischknecht y Büsser Knöpfel, 2013), el cual considera flujos críticos (metas) establecidos con base en marcos legales. Ya que no hay flujos críticos establecidos para el contexto mexicano, los valores críticos ($ER_{c,i}$) de la legislación suiza fueron utilizados bajo el supuesto de que las conclusiones respecto al desempeño final de los sistemas analizados no cambiarían.

Cuadro 6. Flujos críticos ($ER_{c,i}$), factores de peso (w_i) y valor del Indicador *RBE*

CATEGORÍA DE IMPACTO AMBIENTAL	FLUJO CRÍTICO (→) ^a PORCENTAJE	FACTOR DE PESO (→) ^a PORCENTAJE	$w_i \cdot ER_i$
AP	57.4	20.1	0.13
EP	94.5	7.4	0.13
GWP	50.0b	26.4	0.00
OLDP	78.5	10.7	0.10
HTP	68.5	14.1	0.09
FWAEP	172.1	2.2	<0.01
MAEP	172.1	2.2	<0.01
TEP	86.5	8.8	0.03
POP	91.0	8.0	0.04
RBE	—	—	0.53

a Dato tomado de la legislación suiza, a menos de que se especifique otra cosa; b Tomado de las metas establecidas por la RSB (RSB, 2011).

Fuente: elaboración propia.

Los resultados indican que, aunque se identifican impactos en los que los flujos actuales son mayores a los deseables (FWAEP, MAEP), las mitigaciones logradas por la biorrefinería son mejores que las necesarias para corregir las emisiones del sistema alternativo. Así lo refleja el valor final de $RBE = 0.53$. Los impactos en las categorías

AP y EP son las mayores contribuciones al valor *RBE* debido a las emisiones durante el uso de sus productos finales (biodiésel, bioaceite y biocarbón) y a las emisiones en campo durante el cultivo de *J. curcas*.

f) *Categoría de desarrollo comunitario*

Grado de empleo (EE). En la industria química, los valores máximos (EE_{max}) y mínimos (EE_i) del grado esperado de empleo de la industria química son 4 y 0.5 empleos por millón de dólares en ventas, respectivamente (Cobb *et al.*, 2009). Para realizar una comparación justa con los parámetros de la industria química, el cálculo del indicador *EE* consideró únicamente a los trabajadores de la etapa industrial. Como resultado, la extensión de empleos de los escenarios analizados (EE_b) son mayores a los máximos observados para la industria química, esto hace que sus indicadores *EE* sean 0.

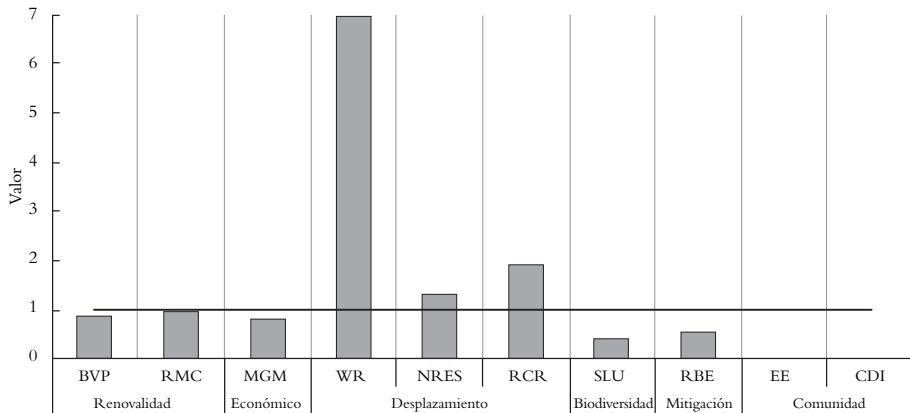
Inversión en desarrollo comunitario (CDI). Los valores máximos (CDI_{max}) y críticos (CDI_c) de la industria química, es decir, 0.13 y 0.03% de los ingresos económicos, respectivamente, fueron tomados como referencia (Cobb *et al.*, 2009). Los ingresos de la biorrefinería pueden cubrir los costos de producción y proyectar una inversión al desarrollo de proyectos comunitarios correspondiente al máximo observable en la industria química, por tanto, su *CDI* se puede ajustar al valor ideal de 0. Por supuesto que el valor real de este indicador dependerá de la gestión y políticas de las empresas implicadas, y el valor aquí utilizado es únicamente la propuesta durante el diseño conceptual.

g) *Huella de sostenibilidad*

La Figura 3 muestra la huella de sostenibilidad de la biorrefinería. Los indicadores relacionados con las categorías *Renovabilidad (BVP y RMC)*, *Biodiversidad (SLU)*, *Desarrollo comunitario (EE y CDI)* y *Mitigación ambiental (RBE)* son sostenibles, como ya se indicó en las secciones correspondientes a cada indicador. Sin embargo, la categoría de *Desplazamiento de productos fósiles* presenta desventajas con respecto al sistema alternativo en sus tres indicadores. El indicador *WR* presenta la desviación más grande con respecto al valor crítico, debido a que el consumo de agua es muy grande y posiblemente mayor a lo que las reservas de agua pudieran sostener. También, hay una gran demanda de energía en los procesos de la biorrefinería, especialmente en el proceso de pirólisis, por lo que se cubre la mayor parte de sus requerimientos

energéticos con energía no renovable (indicador *NRES*). Por último, el costo de producción de sus productos es mayor al de aquellos que pretenden sustituir (indicador *RCR*). Esto podría cambiar si los subsidios de las energías fósiles en México desaparecieran paulatinamente, como resultado de una eventual política nacional de reducción de emisiones o de fomento a las energías renovables.

Figura 3. Huella de sostenibilidad de los escenarios analizados



Uno (1) se refiere al valor crítico y cero (0) al estado de sostenibilidad ideal.

Fuente: elaboración propia.

Siguiendo con esta discusión, el rendimiento de semilla en campo tiene un alto impacto sobre los indicadores de sostenibilidad. A medida que el rendimiento de semilla aumenta, los indicadores pueden disminuir su valor, acercándose más al rango de sostenibilidad. Debido a que *J. curcas* no es aún un cultivo domesticado, los rendimientos promedio de semilla en los años por venir seguramente incrementarán por la aplicación de técnicas básicas de selección genética e identificación de variedades de alto rendimiento (Sacramento Rivero *et al.*, 2016). Siguiendo esta lógica, se hizo el análisis de cómo cambiarían los dos indicadores más desfavorables con un cambio en la productividad de semilla. El indicador *WR* no alcanzará un valor menor que 1 a menos que se alcance un rendimiento de semilla mayor a 15 410 kg/ha/a. Este rendimiento es prácticamente inalcanzable con las variedades actuales de *J. curcas*, pues las extrapolaciones más optimistas oscilan cerca de los 12 300 kg/ha/a (Axelsson *et al.*, 2012). Por otro lado, el indicador *NRES* sí podría alcanzar valores en el rango sostenible (menor a 1) si el rendimiento de semilla supera los 4 500 kg/ha/a.

Conclusiones

Una evaluación de sostenibilidad de sistemas bioenergéticos, como las biorrefinerías, debe necesariamente definirse en términos multidimensionales, abarcando la cantidad de objetivos de sostenibilidad como sea factible. Comúnmente el mayor énfasis se hace en las emisiones de gases de efecto invernadero, pero existen otros impactos de igual o mayor importancia, que sobresalen cuando se analizan las condiciones que afectan al ecosistema y las comunidades locales alrededor de los sitios donde se cultiva, procesa y utiliza la biomasa que alimenta a la biorrefinería.

En el caso de estudio analizado, en la evaluación se incluyeron las dimensiones de impactos ambientales al agua, aire y suelo desde la perspectiva del análisis de ciclo de vida, los aspectos técnicos y económicos más importantes, así como algunos otros de incidencia social relacionados con el empleo y contribuciones al desarrollo social. Como resultado se observó que los mayores impactos potenciales del sistema diseñado están en el uso eficiente del agua y la eficiencia energética del sistema, pues consume más agua que el sistema de referencia fósil y no alcanza las metas de reducción de consumo de energía fósil. En este último aspecto, la combinación de otras energías renovables, como la eólica o solar, podría ayudar a mejorar el desempeño energético del proceso y aminorar los costos de operación, a costa de un mayor capital de inversión. En general, las mayores emisiones y el consumo de energía fósil del sistema se concentran en la etapa de producción de fertilizantes y otros agroquímicos. Esto hace evidente que la optimización para reducir el consumo de estas sustancias, así como el uso de agroquímicos de origen renovable, tiene un gran impacto sobre la sostenibilidad global de la biorrefinería. De similar importancia es también incrementar el rendimiento de semilla en campo, puesto que esta variable tiene el potencial de ubicar casi todos los indicadores de la evaluación en el rango sostenible. Esto puede hacerse principalmente a partir de técnicas de selección genética, puesto que la *J. curcas* es un cultivo que aún no ha sido domesticado.

Es importante señalar que la metodología utilizada no representa una evaluación exhaustiva de la sostenibilidad del sistema, sino un análisis preliminar que puede realizarse en la etapa de diseño conceptual, previo a cualquier intervención real. Una vez identificados los focos rojos, deberá hacerse un análisis más detallado, con metodologías oficiales y vinculadas con las leyes y reglamentos locales, que permitan definir la viabilidad del proyecto. En el caso de la biorrefinería de *J. curcas*, por ejemplo, el indicador *WR* hace pensar que la cantidad de agua requerida para el riego de las plantaciones puede representar un problema de disponibilidad. Esto sólo

podrá verificarse después de analizar los sitios concretos de las plantaciones y con las metodologías de las autoridades correspondientes.

Bibliografía

- Axelsson, L. *et al.* (2012). “Jatropha cultivation in southern India: assessing farmers’ experiences”, *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*. Wiley-Blackwell, 6(3), pp. 246-256 [doi: 10.1002/bbb.1324].
- Balaban, A.T. (2000). “Process Design Principles: Synthesis, Analysis, and Evaluation”, by Warren D. Seider, J. D. Seader y Daniel R. Lewin. Nueva York: Wiley, 1999, American Chemical Society [doi: 10.1021/CI000347L].
- Chavez-Rodriguez, M.F. y S. A. Nebra (2010) “Assessing GHG Emissions, Ecological Footprint, and Water Linkage for Different Fuels”, *Environmental Science & Technology*. American Chemical Society, 44(24), pp. 9252-9257 [doi: 10.1021/es101187h].
- Cherubini, F. *et al.* (2009). “Toward a common classification approach for biorefinery systems”, *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*. John Wiley & Sons, Ltd. 3(5), pp. 534-546 [doi: 10.1002/bbb.172].
- Cobb, C. *et al.* (2009). “The AIChE Sustainability Index: The Factors in Detail”, *Chemical Engineering Progress*. AIChE, pp. 60-63 [http://www.aiche.org/uploadedFiles/IFS/Centers/AIChE_Sustainability_Index_Factors_in_Detail_Jan_09.pdf].
- Conagua (2016). “Atlas del Agua en México 2016”, Comisión Nacional del Agua. Subdirección General de Planeación, p. 135 [doi: 10.1017/CBO9781107415324.004].
- Cramer, J. *et al.* (2007). *Testing framework for sustainable biomass* [https://iet.jrc.ec.europa.eu/remea/sites/remea/files/testing_framework_biomass.pdf].
- Dale, B.E. y R.G. Ong (2014). “Design, implementation, and evaluation of sustainable bioenergy production systems”, *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*. Wiley Online Library, 8(4), pp. 487-503.
- Dale, V.H. *et al.* (2013). “Indicators for assessing socioeconomic sustainability of bioenergy systems: A short list of practical measures”, *Ecological Indicators*. Elsevier, 26, pp. 87-102 [doi: 10.1016/J.ECOLIND.2012.10.014].
- Duarte, L.C. *et al.* (2007). “Biotechnological valorization potential indicator for lignocellulosic materials”, *Biotechnology Journal*. INETI, Departamento de Biotecnologia, Lisboa, Portugal, 2(12), pp. 1556-1563 [http://dx.doi.org/10.1002/biot.20070 0183].
- Eshton, B., J.H.Y. Katima y E. Kituyi (2013). “Greenhouse gas emissions and energy balances of jatropha biodiesel as an alternative fuel in Tanzania”, *Biomass and Bioenergy*. Pergamon, 58, pp. 95-103 [doi: 10.1016/J.BIOMBIOE.2013.08.020].
- Faist Emmenegger, M. *et al.* (2011). “Taking into account water use impacts in the LCA of biofuels: an Argentinean case study”, *The International Journal of Life Cycle Assessment*. Springer-Verlag, 16(9), pp. 869-877 [doi: 10.1007/s11367-011-0327-1].

- Frischknecht, R. y S. Büsler Knöpfel (2013). *Swiss Eco-Factors 2013 according to the Ecological Scarcity Method, Federal Office for the Environment FOEN* [<http://www.bafu.admin.ch/publikationen/publikation/01750/index.html?lang=en>].
- GBEP (2011). *The Global Bioenergy Partnership Sustainability Indicators for Bioenergy*.
- Gnansounou, E. (2011). “Assessing the sustainability of biofuels: A logic-based model”, *Energy*. Pergamon, 36(4), pp. 2089–2096 [doi: 10.1016/J.ENERGY.2010.04.027].
- Ismail, M., A. Rossi y N. Geiger (2011). “A Compilation of Bioenergy Sustainability Initiatives: Update”, 0: pp. 1–34.
- Mata, T.M. *et al.* (2013). “Sustainability analysis of biofuels through the supply chain using indicators”, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. Elsevier, núm. 3, pp. 53–60.
- McBride, A.C. *et al.* (2011). “Indicators to support environmental sustainability of bioenergy systems”, *Ecological Indicators*. Elsevier, 11(5), pp. 1277–1289 [doi: 10.1016/J.ECOLIND.2011.01.010].
- Navarro-Pineda, F., R. Handler y J. Sacramento Rivero (2018). “Conceptual design of a biorefinery based on *Jatropha curcas* using a systematic sustainability evaluation”, *Biofuels, Bioproducts & Biorefining*.
- (2017). “Potential effects of the Mexican energy reform on life cycle impacts of electricity generation in Mexico and the Yucatan region”, *Journal of Cleaner Production* [doi: 10.1016/j.jclepro.2017.07.023].
- Navarro-Pineda, F.S. *et al.* (2016). “Advances on the processing of *Jatropha curcas* towards a whole-crop biorefinery”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Elsevier, 54, pp. 247–269 [doi: 10.1016/j.rser.2015.10.009].
- Nemecek, T. y J. Schnetzer (2012). *Methods of assessment of direct field emissions for LCIs of agricultural production systems*. Zurich: Life cycle inventories of Swiss and European agricultural production systems.
- Pemex-Refinación (2018) *Estructura de precios de gasolinas y diesel Precio ponderado nacional* [<http://ebdi.pemex.com/bdi/movil.do?action=cuadro&cvecua=IPET31>], fecha de consulta: 8 de julio de 2018.
- Peters, M., K. Timmerhaus y R. West (2002). *Plant Design and Economics for Chemical Engineers*.
- Portugal-Pereira, J. *et al.* (2016). “Life cycle assessment of conventional and optimised *Jatropha* biodiesel fuels”, *Renewable Energy*. Pergamon, 86, pp. 585–593 [doi: 10.1016/J.RENENE.2015.08.046].
- Prueksakorn, K. *et al.* (2010). “Energy analysis of *Jatropha* plantation systems for biodiesel production in Thailand”, *Energy for Sustainable Development*. Elsevier, 14(1), pp. 1–5 [doi: 10.1016/J.ESD.2009.12.002].
- RED (2009). “On the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC” [<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX:32009L0028>].

- RSB (2011). “Indicadores de cumplimiento de los principios y criterios de la RSB”, 2016(10.13) [http://rsb.org/pdfs/standards/12-08-23-RSB-IND-20-001_es.pdf].
- Sacramento-Rivero, J.C. (2012). “A methodology for evaluating the sustainability of biorefineries: framework and indicators”, *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 6(1), pp. 32-44 [doi: 10.1002/bbb.335].
- *et al.* (2016). “A three-dimensional sustainability evaluation of jatropha plantations in Yucatan, Mexico”, *Sustainability*, 8(12), pp. 1-18 [doi: 10.3390/su8121316].
- Sacramento-Rivero, J.C., F. Navarro-Pineda y L.E. Vilchiz-Bravo (2016). “Evaluating the sustainability of biorefineries at the conceptual design stage”, *Chemical Engineering Research and Design*. Institution of Chemical Engineers, 107, pp. 167-180 [doi: 10.1016/j.cherd.2015.10.017].
- Shonnard, D.R. *et al.* (2015). “A Review of Environmental Life Cycle Assessments of Liquid Transportation Biofuels in the Pan American Region”, *Environmental Management*. Springer, 56(6), pp. 1356-1376 [doi: 10.1007/s00267-015-0543-8].
- Washington State Department of Agriculture (2018). *Commercial fertilizer* [<https://agr.wa.gov/PestFert/Fertilizers/FertDB/product1.aspx>], fecha de consulta: 8 de julio de 2018.
- Yang, Y. *et al.* (2012). “Replacing Gasoline with Corn Ethanol Results in Significant Environmental Problem-Shifting”, *Environmental Science & Technology*. American Chemical Society, 46(7), pp. 3671-3678 [doi: 10.1021/es203641p].

Valorización de residuos agroalimentarios, contribución a la economía circular en Guanajuato

Gemma Cervantes
Estephanie de los Ángeles Solís
Sylvie Turpin

Introducción

La economía circular deriva de la economía ecológica, la cual interpreta la realidad como si estuviera formada por ciclos ecosistémicos. La economía circular pretende el cierre de estos ciclos materiales a nivel sistémico. En el estado de Guanajuato, el sector agroalimentario (sector primario: silvicultura, ganadería, agricultura y pesca; y agroindustria: empresas dedicadas a la transformación de materias primas en productos semielaborados o elaborados) es uno de los siete sectores productivos más importantes y, a nivel nacional, es el tercer sector exportador en importancia. Si se quiere avanzar hacia la economía circular en el estado, es imprescindible cerrar el ciclo de materia en este sector. La valorización de los residuos agroalimentarios es una de las maneras de tender hacia ese cierre de ciclo. En este capítulo se describe cómo valorizar residuos agroalimentarios para tender hacia la economía circular en Guanajuato. Se proponen alternativas para el cierre de ciclo de materia y aprovechamiento de energía en sistemas agroalimentarios, construyendo sinergias entre empresas existentes o proponiendo la creación de alguna nueva. Los datos se extrajeron de empresas del sector en el estado.

Algunas de las valorizaciones propuestas son: la elaboración de aminoácidos con el pelo de cerdo, la fabricación de grenetina a partir de pezuñas y párpados de cerdo, la transformación en biogás y/o energía eléctrica de los excrementos de animales, la obtención de láminas y tableros utilizando el bagazo de agave, la creación de una planta de composta a partir de residuos orgánicos de invernaderos y de mermas de semillas y alimentos. Con las sinergias propuestas, se pueden reducir los residuos generados por el sector agroalimentario, y aprovechar los generados por empresas

de diferentes giros agroalimentarios, lo que conlleva un beneficio ambiental y uno económico.

La economía circular y su relación con la ecología industrial

La economía circular (EC) es un paradigma económico de organización de sistemas basado en la economía ecológica, que promueve el cambio de la economía lineal a un modelo circular, imitando a los ecosistemas naturales (Hermida y Domínguez, 2014), objetivo que es el mismo para la ecología industrial (EI) (Cervantes, 2013).

La economía circular está definida de diferentes maneras, aunque el punto común de todas ellas sería que es una combinación de actividades de reducción, reúso y reciclaje de materiales, con el objetivo de cerrar el ciclo de los materiales, desde un punto de vista sistémico. Como objetivo principal de la EC, con base en los diferentes estudios internacionales, se cita la prosperidad económica, seguido de una mejora ambiental; en cambio no se considera significativa la mejora social para las futuras generaciones (Kirchherr *et al.*, 2017).

La economía circular ingresa con fuerza en las agendas políticas. Lo hizo con mucha fuerza en China desde principios de la década del 2000 y se concretó en 2009 con la Ley de Economía Circular. La Unión Europea consideró como única salida a la coyuntura económica, una transición hacia la economía circular, por considerarla regenerativa y eficiente con los recursos (Michelinia *et al.*, 2017). En los diferentes países que la consideran como política, esperan que produzca crecimiento económico, creación de empleos, ahorro de materiales, seguridad en los suministros y reducción de impactos y presiones ambientales (Kalmykova *et al.*, 2018).

La ecología industrial es un área interdisciplinaria que busca que los sistemas industriales tengan un comportamiento similar al de los ecosistemas naturales, transformando el modelo lineal de los sistemas productivos en el modelo cíclico, impulsando las interacciones entre economía, ambiente y sociedad e incrementando la eficiencia de los procesos industriales (Lowe *et al.*, 1997; Isenmann, 2003; Cervantes, 2013). Dentro de la EI, la simbiosis industrial es el método o experiencia que relaciona entidades a partir de sinergias, o sea de un intercambio de materiales, energía, agua y residuos, creando redes materiales y sociales que promueven el cierre de ciclo de materia (Chertow, 2000, 2007; Boons *et al.*, 2014).

Las sinergias que se establecen dentro de la simbiosis industrial también pueden ser la utilización o implantación conjunta de un servicio o infraestructura. De igual modo, se llama simbiosis industrial al sistema de industrias interrelacionadas a

partir del método de simbiosis industrial, por lo que el mismo término define a la vez el método y la realidad que éste origina (Cervantes *et al.*, 2009; Clift y Druckman, 2015).

En este trabajo se aplican los principios de la ecología industrial en torno a un Grupo Agroindustrial del municipio de Pénjamo (Guanajuato), con el fin de crear sinergias de materia y energía entre las empresas del Grupo y empresas que se encuentren cercanas, para que los residuos de unas empresas puedan ser usados como materia prima para otras de manera directa y así optimizar la valorización de los residuos en vistas de planes de manejo.

Por tanto, este trabajo contribuye al inicio de la economía circular en Guanajuato, ya que en este sentido se afirma que la ecología industrial, con sus herramientas, puede ayudar en la transición hacia la economía circular (Saavedra *et al.*, 2018).

El sector agroalimentario en Guanajuato

El sector agroalimentario comprende al sector primario (silvicultura, ganadería, agricultura y pesca) y a la agroindustria, esta última se refiere a la transformación de materias primas en productos semielaborados o elaborados (Cofece, 2015). Dentro de la industria agroalimentaria se encuentra la industria porcina. En México, en 2014 la producción de carne de porcino en canal ascendió a 1.29 millones de toneladas, y en 2015 se estimó a 1.32 millones de toneladas. En 2014, el sacrificio de ganado porcino para carne ascendió a 10.94 millones de cabezas, es decir, 8.7% menos que en 2013 (FIRA, 2015). Guanajuato es el sexto productor de carne de cerdo a nivel nacional y contribuye con 8.4% de la producción, principalmente en el municipio de Irapuato y en parte en Pénjamo; asimismo, en los municipios de Pénjamo y Celaya se encuentran establecidas algunas de las mayores empresas empacadoras de embutidos y procesamiento de carnes frías (Sagarpa, 2016; Confederación de Porcicultores Mexicanos, 2016).

En estas empresas, las instalaciones para sacrificio, que incluyen corrales de reposo, el sacrificio, la eliminación de la sangre, la separación de la piel o del pelo, el destripamiento, y la preparación para la venta, generan residuos a razón de 18 toneladas aproximadamente por 1 500 cerdos despiezados, compuestos esencialmente de vísceras, pelo y estiércol (Confederación de Porcicultores Mexicanos, 2016). Estos residuos no reciben los tratamientos adecuados, con sus consecuentes impactos, como la contaminación del agua, aire y suelos, la pérdida y alteración de ecosistemas y biodiversidad, y la contribución al cambio climático global (Gerber *et al.*, 2013).

Según la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (artículo 19) y en particular la Ley para la Gestión Integral de Residuos del Estado y los Municipios de Guanajuato (artículo 32), los residuos generados por las actividades piscícolas, agrícolas, silvícolas, forestales, avícolas o ganaderas, incluyendo los residuos de los insumos utilizados en esas actividades, son clasificados como de manejo especial y por tanto sujetos a planes de manejo que permitan su minimización, valorización y aprovechamiento (Semarnat, 2003; IEEG, 2005). Para la elaboración e implementación de planes de manejo de residuos de manejo especial, se establece la Norma Oficial Mexicana NOM-161-Semarnat-2011, sin embargo, ésta no sugiere una metodología en particular, la única recomendación es que los planes sean factibles técnicamente, ambientalmente aceptables y económicamente sustentables (Semarnat, 2013).

Cómo contribuir al cierre de ciclo de materia a partir de la valorización de residuos

Para poder cerrar el ciclo de materia en un grupo o red de entidades primero es necesario delimitar adecuadamente el sistema a estudiar. Esto se hace detectando empresas u otras entidades ubicadas dentro de una circunferencia de 30 km de radio (tomando como centro una de las entidades con la que pretendemos formar la red ecoindustrial), con el fin de que las entidades que vayan a establecer sinergias de materia, energía, servicios o infraestructura no estén demasiado alejadas ya que esto encarecería mucho los intercambios entre ellas. Para la identificación de éstas, se puede descargar del sitio web del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (Inegi), el Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (DENUE) que tiene un formato de datos compatible con los Sistemas de Información Geográfica y por tanto se pueden geolocalizar las entidades del área delimitada.

Posteriormente se deben diagnosticar los flujos de materia y energía de cada entidad que se encuentra dentro del área delimitada. Es necesario realizar visitas de campo y entrevistas, y representar los datos recogidos para cada entidad en *diagramas de caja negra* donde se representan únicamente las entradas de materias primas y energía, por un lado, y las salidas de productos, residuos, subproductos y emisiones, por otros, sin mostrar lo que pasa en el interior de cada entidad. Para la identificación de los flujos de materia y energía, es conveniente usar el código de colores del Grupo de Investigación en Ecología Industrial mostrado en la Figura 1 (Lule y Cervantes, 2010). Asimismo, es conveniente detectar si existen servicios o infraestructuras compartidas entre varias entidades y determinar el potencial de habilidades

adquiridas por las entidades para gestionar sus flujos residuales. También es necesario realizar visitas a las entidades de gobiernos cercanas y comprobar el estado de las vías de comunicación terrestre y otras infraestructuras *in situ*.

Figura 1. Código gráfico para diagramas de ecología industrial

DESCRIPCIÓN	FLUJO	FLUJO RESIDUAL
Materias primas	—————>	
Productos	—————>>	
Intercambio interno del proceso	—————>	
Energía	—————○	-----○
Agua	—————◁	-----◁
Residuos	—————■	-----■
Propuestas/alternativas de nuevas sinergias	—————>	

Fuente: elaboración a partir de Lule y Cervantes (2010).

La información recabada se representa en diagramas de flujo llamados *diagramas de sinergias*, que representan los flujos que entran y salen de cada entidad y los flujos que se interrelacionan entre entidades del sistema seleccionado. Analizando los flujos residuales de materia y energía que quedan sin aprovechar se pueden establecer nuevas propuestas de valorización de flujos residuales que, a su vez, pueden convertirse en materia prima o flujos energéticos de entrada que puedan ser utilizados por otra entidad del sistema. Estas propuestas se reflejan en un *diagrama de sinergias propuestas*; en el que también deben tenerse en cuenta las posibles sinergias de infraestructuras o de servicios.

Una propuesta de cierre de ciclo para el sector agroalimentario en el municipio de Pénjamo

Diagnóstico

El área de Pénjamo es una de las de mayor concentración agroalimentaria de Guanajuato. Para hacer una propuesta concreta de cierre de ciclo de materia en el sector agroalimentario del estado se seleccionó como punto central un Grupo Agroindustrial del municipio de Pénjamo que produce alimentos y productos derivados de

cerdo. El Grupo se encuentra en un predio de 26 hectáreas, y comprende seis entidades de cuatro empresas distintas (Solís, 2016):

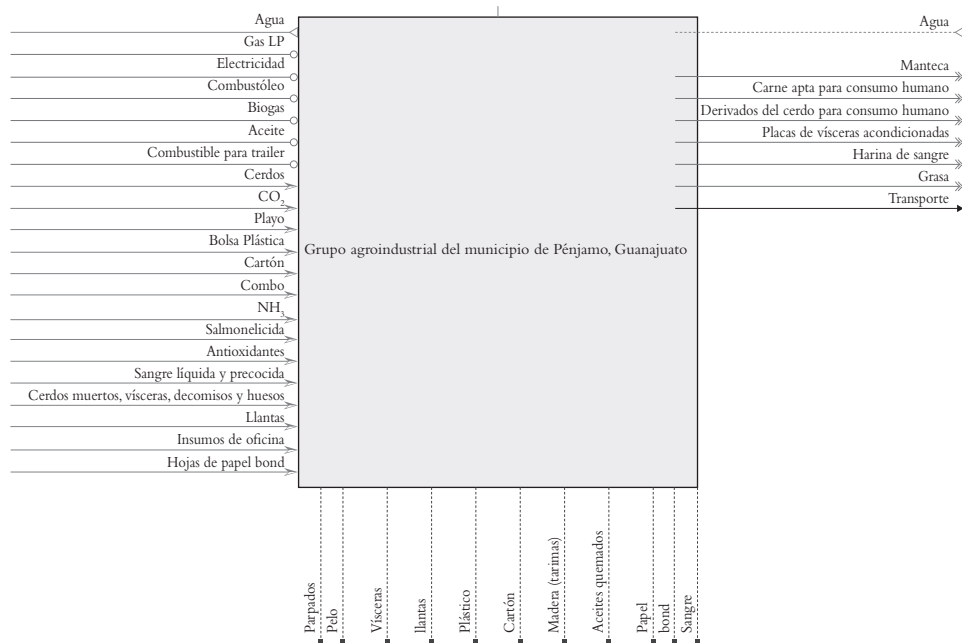
- 1) Un rastro catalogado con un sello de certificación Tipo Inspección Federal (TIF).
- 2) Una planta que procesa y comercializa la carne que proviene del rastro.
- 3) Una planta acondicionadora de vísceras rojas, que posteriormente se envían a empresas para hacer croquetas para perros.
- 4) Una planta de rendimiento que, a partir de vísceras, huesos, sangre, pelo, pezuñas y también animales muertos en los corrales o de las canales no apropiadas para el consumo humano, elabora suplementos alimenticios de consumo animal.
- 5) Una empresa de transportes, dedicada al autotransporte de carga federal, que transporta carne fresca de cerdo y sus derivados.
- 6) Una empresa de servicios logísticos, que se encarga de la logística del grupo, cubre la gestión y la planificación de las actividades de los departamentos de compras, producción, transporte, almacenaje, manutención y distribución y conforman un sistema de enlace entre la producción.

El diagrama de caja negra del Grupo Agroindustrial se muestra en la Figura 2, en la que se observan residuos no aprovechados, como pezuñas, párpados, pelo, sangre, vísceras verdes, llantas y tarimas usadas. Actualmente estos residuos se depositan en el tiradero del municipio o bien en fosas dentro de los terrenos de Grupo, sin mayor tratamiento.

El pelo presenta una gran problemática dentro del Grupo ya que, aunque el pelo de los cerdos se puede utilizar para hacer brochas de cerdas naturales, éste se encuentra mezclado con residuos de sangre, por lo que no puede ser valorizado. Otros residuos que se encuentran en la misma situación son la sangre y vísceras verdes. Tampoco se aprovechan las llantas desechadas por la empresa de autotransporte del Grupo y las tarimas usadas, entre otros.

Si se consideran cada una de las entidades separadas dentro del Grupo, se puede establecer un diagrama de sinergias del mismo Grupo Agroindustrial (Figura 3) donde se observan los flujos de materia y energía de las seis entidades. También se observan los intercambios de productos y residuos entre estas entidades, por ejemplo, los cerdos muertos o que no pasan inspección son llevados a la planta de rendimiento del mismo Grupo.

Figura 2. Diagrama de caja negra del Grupo Agroindustrial de Pénjamo



Fuente: elaboración propia.

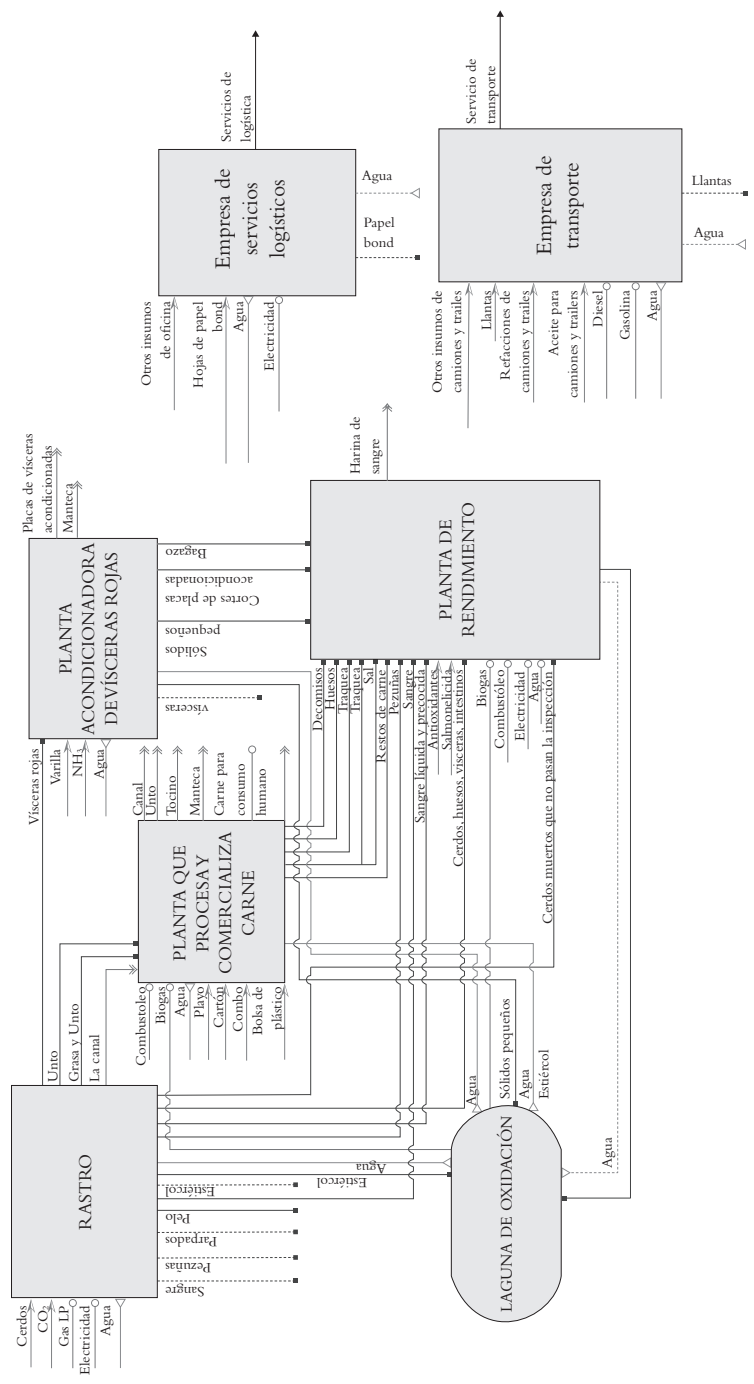
El Grupo Agroindustrial creó con agrotecnología una red de simbiosis industrial permitiendo la valorización de sus subproductos y residuos, teniendo 2 954.47 toneladas de residuos y subproductos tratados cada año y 97% de éstos se utilizan como materia prima para otras empresas (Sánchez, 2015).

En el diagrama se detectan 15 sinergias existentes, entre éstas la valorización de huesos que, junto con restos de carne no aptos para consumo humano y sangre, producen harinas de carne y sangre para la elaboración de alimentos pecuarios y/o de mascotas.

También cabe destacar el aprovechamiento de las vísceras rojas que son enviadas a la planta acondicionadora de vísceras, para su posterior entrega a una empresa fuera del Grupo, con las cuales se elabora alimento para mascotas.

Asimismo, se observa cómo agua residual, estiércol y sólidos pequeños son enviados a una laguna de oxidación con aprovechamiento de biogás. El biogás obtenido se utiliza como combustible en la planta dedicada al proceso y comercialización de carne y en la planta de rendimiento.

Figura 3. Diagrama de sinergias dentro del Grupo Agroindustrial de Pénjamo



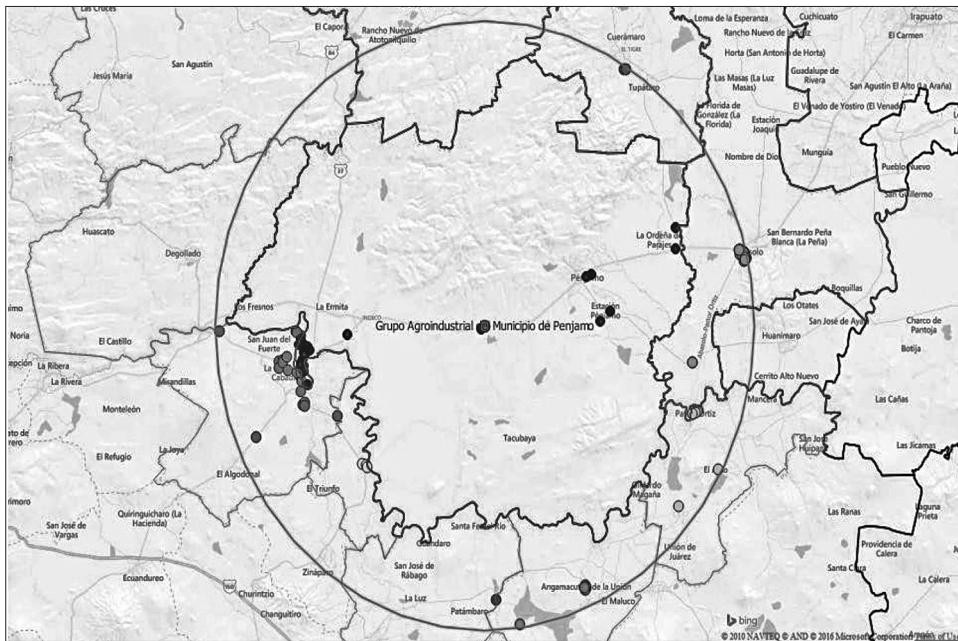
Fuente: elaboración propia.

Sin embargo, el desarrollo tecnológico con el que el Grupo Agroindustrial cuenta, no es suficiente para la valorización del cien por ciento de los flujos residuales. Si bien varios residuos se logran enviar a otras plantas y/o lagunas de oxidación dentro del Grupo, un porcentaje de éstos no es aprovechado siendo dispuesto en tiraderos municipales y/o fosas.

Para la creación de un sistema ecoindustrial más amplio se delimitó una circunferencia de 30 km de radio, tomando como centro el Grupo Agroindustrial, para así ubicar a las entidades con las que el Grupo podría establecer sinergias viables (Figura 4). Se observa cómo el Grupo se sitúa céntricamente dentro del municipio de Pénjamo, y que el perímetro de la zona de trabajo rebasa las fronteras de éste, pudiendo lograr extender los intercambios de flujos a otros municipios, como Abasolo y Cuerámara (en Guanajuato), Penjamillo, Numarán, Angamacutiro, La Piedad (en Michoacán), o Arándas (en Jalisco).

Existen cerca de 110 empresas incluyendo Pymes dentro de la zona de estudio (Inegi, 2015), y 18 de éstas constituyeron la muestra de estudio seleccionada, por

Figura 4. Área de establecimiento de sinergias en torno al Grupo Agroindustrial de Pénjamo



Fuente: elaboración con base en Inegi (2015).

considerarlas con posibilidades de establecimiento de sinergias. Las empresas seleccionadas (Cuadro 1) se encuentran en tres estados: Guanajuato, Michoacán y Jalisco, y tienen giros diversos como: comercio de ganado, aves y animales en pie, destacando la producción de cerdos; empaquetadoras de carne de cerdo y su comercialización; elaboración de bebidas destiladas de agave; autotransportes con y sin refrigeración; invernaderos; comercio de combustibles; y fabricación de calzado y de ladrillos.

Cuadro 1. Entidades agroalimentarias seleccionadas dentro del área de estudio en Pénjamo

ENTIDADES	MUNICIPIO	ESTADO
AGROINDUSTRIALES		
Frigorífico y Rastro de Santa Ana, SA de CV	Pénjamo	Guanajuato
Granjas porcícolas de Santa Ana Pacueco	Pénjamo	Guanajuato
Planta de Carne en Estado Natural	Pénjamo	Guanajuato
Mantequera Cendejas	La Piedad	Michoacán
Agrícola El Rosal (AER)	Pénjamo y La Piedad	Guanajuato y Michoacán
Grupo Agroindustrial de La Piedad*	La Piedad y Arandas	Michoacán y Jalisco
Tequilera Corralejo	Pénjamo	Guanajuato
Otras		
IPASA (metalmecánica)	La Piedad y Arandas	Michoacán y Jalisco
Taller de cerámica Urhani	Pénjamo	Guanajuato
Ladrilleras artesanales	Varios	Guanajuato
Multico (elaboración de productos eléctricos)	Pénjamo	Guanajuato
Silver Sport (maquila textil)	La Piedad	Michoacán

* Este grupo incluye: granja porcícola, planta procesadora de carne, planta comercializadora de carnes y embutidos, planta de elaboración de alimento para animales, planta dedicada al acondicionamiento de semillas, planta de elaboración de alimento para mascotas, invernadero de jitomates y pimientos, planta de comercialización de fertilizantes. Dentro del grupo hay diversas empresas.

Fuente: elaboración propia.

La información condensada acerca de las materias primas, energía y agua que estas empresas usan en la elaboración de sus productos, así como sus respectivas generaciones de residuos y productos se encuentra en el Cuadro 2.

En la Figura 5 se muestran las sinergias existentes entre el Grupo Agroindustrial de Pénjamo y las empresas externas seleccionadas. Cabe mencionar que, como parte de estas sinergias, se incluyeron las lagunas de oxidación y los biodigestores, aunque no son entidades productivas, estas instalaciones sirven al aprovechamiento de flujos residuales de agua y materia para la generación de biogás y/o electricidad.

Cuadro 2. Resumen de insumos y flujos residuales de algunas de las entidades del municipio de Pénjamo seleccionadas, agrupadas por tipos

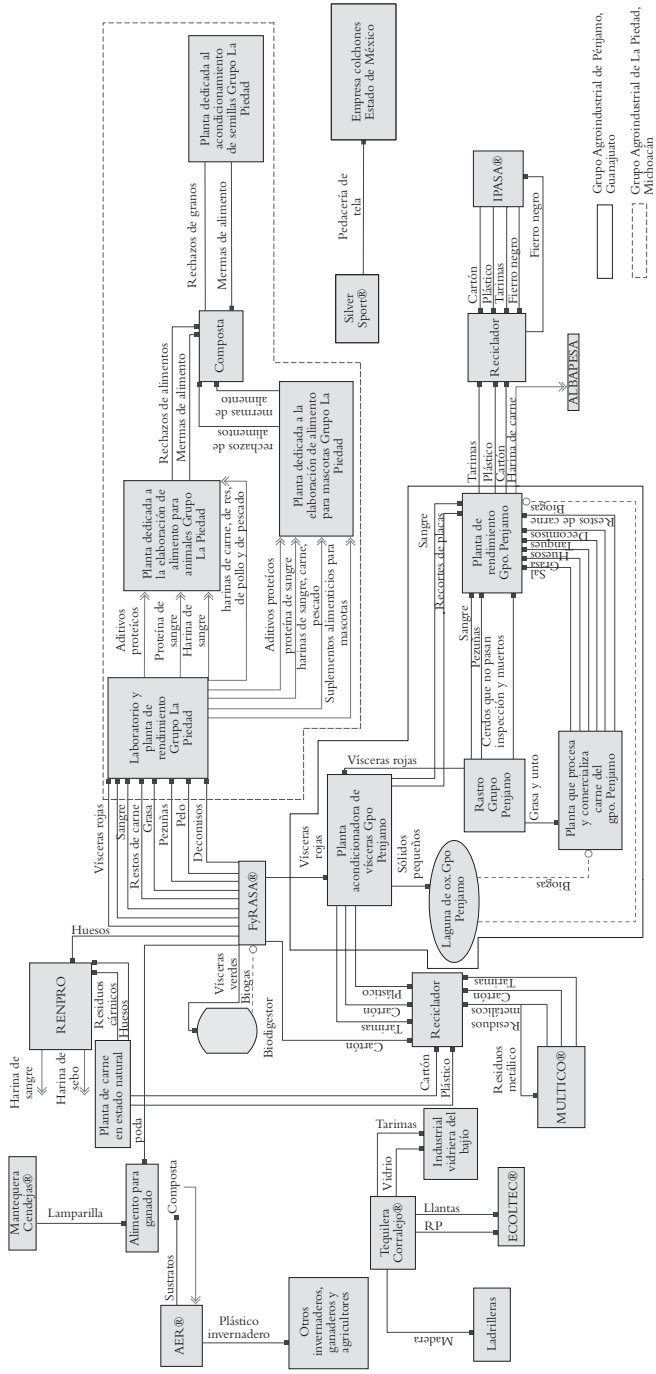
TIPO DE ENTIDADES	INSUMOS	FLUJOS RESIDUALES
Granjas porcícolas	Cerdos en pie	Purines
	Alimento pecuario	
	Agua	Agua residual
Invernaderos	Energía eléctrica	Mermas de plantas
	Semillas	
	Plántulas	Envases fitosanitarios
	Sustratos	Poliestireno expandido (unicel)
	Agua	Agua residual con alto contenido en sodio
	Energía eléctrica	Mermas de semillas
Frigoríficos	Gas natural	Mermas de jitomate
	Cerdos	Vísceras
	Insumos de sanidad	Pelo
	Agua	
Energía eléctrica	Agua residual	
Procesadoras de carne	Combustóleo	Huesos
	Canales	
	Bolsas plásticas	Vísceras
		Sangre
	Tarimas	Plástico
Tequilera		Agua residual
	Agave	Residuos de agave
	Energía eléctrica	Vinazas
	Envases	Tarimas
	Gas LP	Agua residual con nitrógeno

Fuente: elaboración propia.

En dicha figura se muestra la existencia de dos grupos agroindustriales, el de Pénjamo (Guanajuato) y el de la Piedad (Michoacán), los cuales manejan simbiosis industrial, mandando subproductos y residuos a otras entidades para la elaboración de otros productos.

Se destaca que la mayoría de las sinergias ya establecidas sea dentro de los grupos o con empresas externas a los dos grupos, están esencialmente relacionadas con

Figura 5. Sinergias existentes entre el grupo agroindustrial de Pénjamo y la muestra de entidades seleccionadas de la zona



* Los grupos agroindustriales de Pénjamo y de La Piedad se encuentran rodeados de una línea continua.

Fuente: elaboración propia.

la industria porcina y con la valorización de los residuos de cerdo después de su acondicionamiento para consumo humano, aunque dentro del Grupo de La Piedad, resaltan seis sinergias que favorecen el aprovechamiento de rechazos de alimentos y de grano para la elaboración de composta. También este Grupo recibe nueve subproductos y residuos generados por Fyrasa®, entre los cuales se encuentran pelo, pezuñas, sangre y vísceras rojas, que son enviados al laboratorio y planta de rendimiento, con los cuales se fabrican aminoácidos para después elaborar saborizantes artificiales, así como aditivos proteicos, que posteriormente son usados para la elaboración de alimentos pecuarios y de mascotas en una planta del mismo Grupo.

Asimismo, es visible el uso de la técnica de compostaje, tanto para las plantas de granos y/o alimentos pecuarios o de mascotas, como para invernaderos de jitomates y la tequilera. Además, se observa el uso de biodigestores, para la obtención de biogás, y posterior uso en las plantas que lo generan. Otras sinergias reflejadas y que no se relacionan a la industria porcina son: el reúso de tarimas, plástico y cartón, como complementos en las empresas para el embalaje de los productos y/o materias primas.

Se detectaron 39 tipos de flujos residuales generados por el Grupo y las empresas, que no son aprovechados, los principales se indican en el Cuadro 3, entre los que se encuentran residuos como pelo, párpados y pezuñas de cerdo, bagazo de agave, llantas, vísceras verdes, entre otros. Es importante señalar que un tipo de residuo puede ser generado por más de una empresa en el perímetro de estudio. Como se puede observar, en su mayoría, estos residuos son depositados en tiraderos o en fosas.

Propuestas para cierre de ciclo

Para establecer propuestas de nuevas sinergias y de posibles intercambios entre todas las empresas del perímetro de estudio para la valorización de los residuos, se consideraron:

- a) Las empresas viables para utilizar los residuos como materia prima, ubicadas dentro del perímetro de trabajo.
- b) Empresas fuera de la zona, con la posibilidad incluso de proponer nuevas, logrando que la red de ecología industrial se expanda a otras regiones.
- c) Proyectos generados por las empresas, para la gestión de sus residuos.
- d) Experiencias, regionales, nacionales y/o internacionales, de aprovechamiento de residuos, poniendo atención en las que actualmente son utilizadas por empresas dedicadas al reciclaje de materiales.
- e) Pruebas piloto de aprovechamiento de residuos.

Las propuestas de nuevas sinergias y de posibles intercambios entre empresas se pueden ver en el Cuadro 3 y en la Figura 6.

Cuadro 3. Principales flujos residuales no aprovechados, su manejo actual y su posible forma de aprovechamiento

RESIDUO	MANEJO ACTUAL	POSIBLE FORMA DE APROVECHAMIENTO
Aceite de fusel	Almacenado en la planta	Fijador en elaboración de perfumería
Aceite quemado de taller	Enviado a tiradero municipal (de Pénjamo y/o La Piedad)	Co-procesamiento (reciclaje térmico)
Agua de retro lavado (c/sodio)	Usada para riego de caminos	Se recomienda no sea utilizado para riego
	Vertida en drenaje	Evaporación para recuperar el sodio
Bagazo de agave	Enviado a tiradero municipal (de Pénjamo y/o La Piedad)	Elaboración de fibras, de láminas acanaladas, generación de energía
Bolsas con grasa	Enviadas a tiradero municipal (de Pénjamo y/o La Piedad)	Co-procesamiento (reciclaje térmico)
Cerdos muertos	Depositados en fosas	Compostaje, generación de biogás y/o energía eléctrica
CO ₂	Emitido a la atmósfera	Uso como gas para procesos (invernaderos, proceso de madanza)
Envases de fertilizantes y plaguicidas	Enviados a tiradero municipal (de Pénjamo y/o La Piedad)	Co-procesamiento (reciclaje térmico)
	Depositados en el invernadero	
Envases de medicamentos	Enviados a tiradero municipal (de Pénjamo y/o La Piedad)	Co-procesamiento (reciclaje térmico)
Estiércol	Depositado en fosas	Compostaje, generación de biogás y/o energía eléctrica
	Enviado a laguna de oxidación del Grupo Agroindustrial del municipio de Pénjamo	
Hojas bond	Enviadas a tiradero municipal (de Pénjamo y/o La Piedad)	Empresas recicladoras, compostaje, generación de biogás y/o energía eléctrica
	Enviadas a reciclaje	
Ladrillos echados a perder	Depositados en el sitio	Elaboración de nuevos ladrillos, material de relleno
Lamparilla	Enviada a granjas como alimento para ganado	Elaboración de jabones, harina de carne.
Lana de roca	Depositada en sitio	Compostaje, generación de biogás y/o energía eléctrica
Llantas	Enviadas a tiradero municipal (de Pénjamo y/o La Piedad)	Co-procesamiento (reciclaje térmico)
	Almacenadas en el sitio donde se generaron	
	Vendidas a refaccionarias	

Cuadro 3. Principales flujos residuales no aprovechados, su manejo actual y su posible forma de aprovechamiento (continúa)

RESIDUO	MANEJO ACTUAL	POSIBLE FORMA DE APROVECHAMIENTO
Madera	Regalada a personas que tienen estufas de leña	Leña para ladrilleras
Mermas de alimentos pecuarios y de mascotas	Enviadas a tiradero municipal (de Pénjamo y/o La Piedad)	Compostaje, generación de biogás y/o energía eléctrica
	Reenviados al proceso o compostaje	
Mermas de granos	Reenviados al proceso o compostaje	Compostaje, generación de biogás y/o energía eléctrica
Mermas y restos de plántulas	Enviadas a tiradero municipal (de Pénjamo y/o La Piedad)	Compostaje, generación de biogás y/o energía eléctrica
Overoles desechables	Enviados a tiradero municipal (de Pénjamo y/o La Piedad)	Se recomienda el cambio por overoles no desechables
Parpados de cerdo	Depositados en fosas	Elaboración de grenetina, de proteínas para consumo animal
	Enviados a tiradero municipal (de Pénjamo, y/o La Piedad)	
Pelo de cerdo	Depositado en fosas	Elaboración de saborizantes artificiales y aminoácidos, cepillos de cerdas naturales, biodigestor
	Enviado a tiradero municipal (de Pénjamo, y/o La Piedad)	
	Enviado al laboratorio de investigación y planta de rendimiento del Grupo Agroindustrial de La Piedad	
Pezuñas de cerdo	Depositadas en fosas	Elaboración de grenetina, de proteínas para consumo animal
	Enviadas a tiradero municipal (de Pénjamo y/o La Piedad)	
Plástico de invernadero	Depositado en el invernadero	Plástico reciclado
	Enviado a otros invernaderos	
Poda	Regalada a personas que mantienen animales de ganado	Compostaje, generación de biogás y/o energía eléctrica
	Enviada a tiradero municipal (de Pénjamo y/o La Piedad)	
Purines (excretas y orina)	Vertidos en drenaje	Generación de biogás y/o energía eléctrica
	Enviados a lagunas de oxidación	
Rafia	Enviado a Relleno Sanitario del municipio de la Piedad	Acopio en relleno sanitario para enviar a empresa de reciclaje de plástico
	Depositado en el invernadero	
Residuos cárnicos	Depositados en fosas	Fabricación de harina de carne, harina de sangre
	Enviados a tiradero municipal (de Pénjamo y/o La Piedad)	
	Enviados a la planta de rendimiento RENPRO	

Cuadro 3. Principales flujos residuales no aprovechados, su manejo actual y su posible forma de aprovechamiento (termina)

RESIDUO	MANEJO ACTUAL	POSIBLE FORMA DE APROVECHAMIENTO
Sangre	Harina y proteína de sangre	Fabricación de alimentos y proteínas para animales domésticos y de granjas
Suero de leche de cabra	Vertido en drenaje	Insumo para la planta de alimento para animales
Sustratos, sustrato de coco	Enviados a tiradero municipal (de Pénjamo y/o La Piedad)	Compostaje
	Depositados en el invernadero	
	Compostaje	
Unicel	Enviado a tiradero municipal (de Pénjamo y/o La Piedad)	Reciclaje de unicel, coprocesamiento (reciclaje térmico)
	Depositado en sitio	
Viscera verde	Enviada a biodigestor	Compostaje, generación de biogás y/o energía eléctrica
	Enviada a la planta de rendimiento del Grupo Agroindustrial del municipio de Pénjamo	
	Enviada a tiradero municipal (de Pénjamo y/o La Piedad)	
	Depositada en fosas	

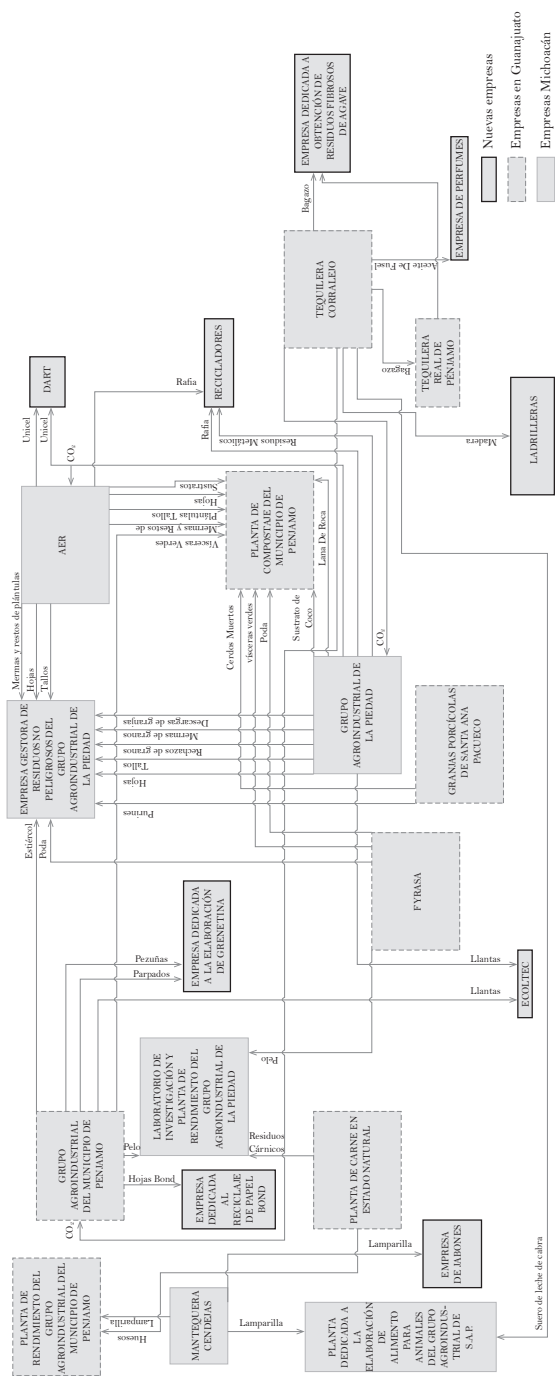
Fuente: elaboración propia.

Se dieron alternativas de aprovechamiento a 25 tipos de flujos residuales, y para algunos como las mermas de granos, mermas de alimentos pecuarios y/o de mascotas, se pudieron crear más de una sinergia. Se establecieron 45 sinergias entre 23 empresas de los estados considerados, de ramos parecidos dedicados principalmente al sector agroindustrial, o muy diferentes como el co-procesamiento de residuos.

Se propone que el pelo de cerdo, generado por el Grupo de Pénjamo, sea enviado al Grupo de La Piedad para ser aprovechado de la misma forma que el de la empresa Fyrasa®, para la elaboración de saborizantes artificiales y aditivos proteicos. Asimismo, pueden ser utilizados para las producciones de cosméticos y/o farmacéuticas. Los parpados y las pezuñas pueden ser utilizados por alguna empresa grenetina existente o que se instale dentro del área.

El bagazo de agave generado por las tequileras después de la destilación de éste, puede ser usado mezclando las fibras con polímeros, para la obtención de un material con aplicaciones similares a la madera, otra posibilidad es la fabricación de láminas acanaladas, que permitirían evitar el uso de otros materiales como el asbesto.

Figura 6. Sinergias propuestas entre entidades del perímetro de estudio en torno al municipio de Pérnjamo



Fuente: elaboración propia.

El CO₂ generado por las tequileras puede ser utilizado en los invernaderos ya que les sirve como sustrato para el crecimiento de las plantas, actualmente lo obtienen del proceso de calentamiento de agua y/o lo compran a empresas químicas, haciendo que se eleve el precio del producto debido al transporte de éste. También puede ser aprovechado por el rastro del Grupo de Pénjamo; ya que, para el proceso de matanza del cerdo, este rastro maneja una cámara de gas.

Los residuos de aceites quemados de taller, de envases de fertilizantes y de medicamentos, y las llantas pueden tener como fin el reciclaje térmico proporcionado por la empresa Ecoltec®, la cual posee una planta de recolección de residuos en la zona. Estos residuos pueden ser acopiados en el relleno sanitario del municipio de Pénjamo y ser enviados a la misma planta de recolección.

Los plásticos, playo, rafia y unicol, provenientes de embalajes de materias primas y/o productos, y las hojas bond pueden ser valorizados por empresas recicladoras, en la zona se encontraron diferentes Pymes que pueden ser enlace entre las entidades de trabajo y las grandes recicladoras.

La sangre puede ser aprovechada en las plantas de rendimiento de los dos grupos agroindustriales, para la fabricación de alimentos para animales domésticos y de granjas.

Un flujo residual de todas las empresas son las tarimas de madera, pueden llevarse a acopiadores para que sean enviadas a plantas recicladoras, las tarimas que ya no se recuperen pueden servir de insumo para las ladrilleras artesanales, evitando así la quema de llantas y aceites contaminados en la zona.

Otro grupo importante de residuos, debido a su volumen y cantidad generados por más de una empresa, son los de carácter orgánico; se encontraron 21 tipos diferentes derivados propiamente de las actividades agroindustriales, entre éstos: cerdos muertos, estiércol, lana de roca, mermas de plántulas, poda, sustrato de coco y vísceras verdes. Los cuales pueden ser enviados a la empresa gestora de residuos no peligrosos del Grupo Agroindustrial de La Piedad; esta empresa tiene planeada la construcción de un biodigestor en el cual se pretende valorizar los purines generados por las granjas porcícolas del Grupo, así como de los restos de las plántulas del invernadero de éste. En este tenor, podría también coadyuvar con la gestión de los residuos de otras granjas porcícolas, así como de los residuos orgánicos generados en la zona. Este biodigestor se propone como una nueva empresa.

Dentro de las sinergias existentes se señaló una planta de composta en el Grupo de la Piedad, ésta podría ampliarse, recibir más residuos orgánicos generados por las empresas de la zona así como los residuos del municipio, y podría ser gestionada con inversión público-privada; sin embargo los subproductos resultantes no son

utilizados en el área, aun cuando se cuenta con invernaderos dedicados a la cosecha de especies vegetales, por lo cual la idea del biodigestor para obtención de energía y/o gas resulta ser el método más apto para la valorización de los residuos.

Finalmente, otra manera de gestionar todos estos residuos es a partir de una bolsa de subproductos. Una bolsa de subproductos es un sistema de intercambio de residuos entre empresas, usualmente por medio de una comunicación virtual en una plataforma en línea. Las empresas anuncian sus residuos y otras las compran. La bolsa de subproductos se convierte así en un medio por el cual las empresas de distintos sectores pueden difundir e intercambiar subproductos o residuos, que pueden utilizar otras empresas como materia prima en la elaboración de sus productos (Hernández y Fernández, 2013).

En la elaboración de un plan de manejo de residuos especiales, la etapa de la organización y diseño de las formas de aprovechamiento de los residuos es la más importante, ya que de ahí se decide todo el flujo de residuos, y es también la más compleja porque las soluciones conocidas de aprovechamiento no aplican siempre o suelen ser costosas. Los resultados obtenidos en esta investigación mostraron que las herramientas de la ecología industrial y la simbiosis industrial, a partir de la búsqueda sistemática y metódica de opciones de intercambios entre empresas existentes o con nuevas estructuras, abren un panorama nuevo con alternativas viables y más satisfactorias para las partes.

Conclusiones

Se desarrolló una propuesta de valorización de los residuos no aprovechados del Grupo Agroindustrial del municipio de Pénjamo, Guanajuato, y de otras entidades colindantes a éste, usando los flujos de residuos de unas empresas como materias primas para otras empresas.

Se encontraron 39 tipos de flujos residuales generados por el complejo agroindustrial que no eran aprovechados y que, en su mayoría, eran depositados en tiraderos o en fosas. Con la idea de contribuir a una economía circular, se han descrito posibilidades de valorización para 25 de estos flujos, creando 45 sinergias con 23 empresas, de ramos parecidos dedicados principalmente al sector agroalimentario o muy diferentes, ubicadas en la zona que abarca a municipios de Guanajuato, Michoacán y Jalisco.

Se propusieron proyectos para la obtención de beneficios comunes entre empresas como el caso del CO₂ emitido por la tequilera y que puede ser aprovechado

por los invernaderos y el rastro de Grupo Agroindustrial de Pénjamo, o el pelo de cerdo que puede ser utilizado para la fabricación de saborizantes artificiales y aminoácidos. La planta de composta existente podría ampliarse para recibir los residuos orgánicos de invernaderos, mermas de semillas y alimentos, y podría contribuir a la gestión de residuos no sólo de la agroindustria, sino también del municipio.

Finalmente, se plantearon proyectos nuevos como plantas dedicadas a la producción de grenetina a partir de pezuñas y párpados, o la elaboración de láminas y tableros utilizando el bagazo de agave. También se propusieron estructuras nuevas como biodigestores en los que se utilizarían los residuos y purines de granjas porcícolas como sustrato para la obtención de biogás y/o energía eléctrica.

Dado que el sector agroalimentario es uno de los más importantes en Guanajuato, y que como se ha descrito la valorización de residuos es una de las bases de la economía circular, el estudio realizado puede considerarse un modelo de cómo iniciar el camino hacia la economía circular en Guanajuato en este sector. Este cierre de ciclo de los materiales nunca implica a un solo sector, de manera que se extiende por la economía del estado. En este caso están implicados los sectores: agroalimentario, de construcción, producción de energía, farmacéutico, perfumería, entre otros.

Bibliografía

- Boons, F., W. Spekkink e Y. Mouzakitis (2014). “The dynamics of industrial symbiosis: a proposal for a conceptual framework based upon a comprehensive literature review”. *Journal of Cleaner Production*, núm. 19, pp. 905-911.
- Cervantes, G. (2013). “El concepto de ecología industrial”, en Carrillo G. (coord.), *La ecología industrial en México*. Ciudad de México: Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Xochimilco, pp. 47-68 [http://bidi.xoc.uam.mx/tabla_contenido_libro.php?id_libro=423].
- , G. Sosa, H. Rodríguez y M. Robles (2009). “Ecología industrial y desarrollo sustentable”, *Ingeniería. Revista Académica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán*. 13(1), pp. 63-70.
- Chertow, M.R. (2000). “Industrial symbiosis: Literature and taxonomy”, *Annual Review of Energy and the Environment*, 25(1), pp. 313-337.
- (2007). “‘Uncovering’ industrial symbiosis”, *Journal of Industrial Ecology*, 11(1), pp. 11-30.
- Clift, R. y A. Druckman (2015). *Taking Stock of Industrial Ecology*. Nueva York: Springer (eB) [ISBN 978-3-319-20571-7. DOI: 10.1007/978-3-319-20571-7].

- Comisión Federal de Competencia Económica (Cofece) (2015). “Reporte sobre las condiciones de competencia en el sector agroalimentario” [https://www.cofece.mx/cofece/images/Estudios/COFECE_reporte_Agro.pdf], fecha de consulta: 10 de junio de 2018.
- Confederación de Porcicultores Mexicanos A.C. (2016). “Principales productores de carne” [<http://www.porcimex.org/estadisticas.htm>], fecha de consulta: 15 de febrero de 2016.
- FIRA (2015). “Panorama Agroalimenticio. Carne de Porcino 2015”. Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura Dirección de Investigación y Evaluación Económica y Sectorial [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/61951/Panorama_Agroalimentario_Carne_Porcino_2015.pdf].
- Gerber, P.J., H. Steinfeld, B. Henderson, A. Mottet, C. Opio, J. Dijkman, A. Falcucci y G. Tempio (2013). *Tackling climate change through livestock – A global assessment of emissions and mitigation opportunities*. Roma: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) [<http://www.fao.org/docrep/018/i3437e/i3437e00.htm>].
- Hermida, C. y M. Domínguez (2014). “Economía circular como marco para el ecodiseño: el modelo ECO-3”, *Informador Técnico*, 78:(1), pp. 82-90.
- Hernández, M.R. y G. Fernández (2013). “Bolsa de subproductos: una estrategia de ecología industrial”, en Carrillo G. (coord.), *La ecología industrial en México*. Ciudad de México: Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Xochimilco pp. 289-311 [http://bidi.xoc.uam.mx/tabla_contenido_libro.php?id_libro=423].
- IEEG (2005). “Ley para la gestión integral de residuos del Estado y los municipios de Guanajuato”. Instituto de Ecología del Estado de Guanajuato, *Periódico Oficial*, núm. 74, segunda parte del Estado de Guanajuato, 10 de mayo de 2005.
- Inegi (2015). “Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas”, Instituto Nacional de Estadística y Geografía [<http://www.beta.inegi.org.mx/app/mapa/denue/default.aspx>], fecha de consulta: 20 de febrero de 2015.
- Isenmann, R. (2003). “Industrial ecology: shedding more light on its perspective of understanding nature as model”, *Sustainable Development*, 11(3), pp. 143-158 [DOI: 10.1002/sd.213].
- Kalmykova, Y., M. Sadagopan y L. Rosado (2018). “Circular economy – From review of theories and practices to development of implementation tolos”, *Resources, Conservation & Recycling*, núm. 135, pp. 190-201.
- Kirchherr, J., D. Reike y M. Hekkert (2017). “Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions”, *Resources, Conservation & Recycling*, núm. 127, pp. 221-232.
- Lowe, E.A., J. Warren y S. Moran (1997). *Discovering industrial ecology: An executive briefing and sourcebook*. Columbus, Ohio: Battelle Press [ISBN 1-57477-034- 9].
- Lule, D. y G. Cervantes (2010). “Diagramas de flujo de sistemas industriales, una herramienta para la ecología industrial. El caso del corredor industrial de Altamira”, *Memorias del Quinto Congreso Internacional de Sistemas de Innovación para la competitividad 2010. Tecnologías Convergentes para la Competitividad* (Sinnco 2010). Celaya, México [<http://>

- docplayer.es/4416083-Diagramas-de-flujo-de-sistemas-industriales-una-herramienta-para-la-ecologia-industrial-el-caso-del-corredor-industrial-de-altamira.html], fecha de consulta: 1 de junio de 2015.
- Michelinia, G., R. Moraesa, R. Cunhab, J. Costaa y A. Omettoa (2017). “From linear to circular economy: PSS conducting the transition”, *Procedia CIRP*, núm. 64, pp. 2-6.
- Saavedra, Y., D. Iritani, A. Pavanc y A. Ometto (2018). “Theoretical contribution of industrial ecology to circular economy”, *Journal of Cleaner Production*, núm. 170(1), pp. 1514-1522.
- Sagarpa (2016). Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera: Infraestructura del sector agroalimentario. Secretaría de Agricultura Ganadería Desarrollo Rural Pesca y Alimentación [<http://www.cmgs.gob.mx:8080/infraestructuraSector/infraestructura.aspx>].
- Sánchez, L.P. (2015). “Sustainable agro technological cluster in Mexico: the case of Pénjamo as a model for agroindustrial symbiosis systems”. Poster presentado en ISIE Conference 2015, Guildford, Reino Unido [<http://programme.exordo.com/isie2015/delegates/presentation/1301/>], fecha de consulta: 6 de agosto de 2015.
- Semarnat (2003). “Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos Sólidos”, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, *Diario Oficial de la Federación*, 8 de octubre de 2003, actualizada el 7 de junio de 2013. México.
- (2013). “NOM-161-Semarnat-2011”, *Diario Oficial de la Federación*, 1 de febrero de 2013. México.
- Solís, J.E. (2016). “Propuesta de Ecología Industrial para un Grupo Agroindustrial en el Municipio de Pénjamo (Guanajuato)”, Proyecto terminal de la licenciatura en ingeniería ambiental. Ciudad de México: Universidad Autónoma Metropolitana-Unidad Azcapotzalco.

Biocombustibles: ¿puede México aprovechar estos energéticos?

Aleida Azamar Alonso
Daniel Tagle Zamora

Introducción

El petróleo ha sido para el mundo un combustible que ha marcado y orientado el rumbo durante buena parte de la historia ya que ha impulsado grandes cambios en el desarrollo tecnológico de la humanidad. La intensificación en el crecimiento económico ha conducido hacia un escenario en el que el agotamiento de este bien se encuentra cerca, por lo que se requieren alternativas para cubrir la función de dicho recurso.

Es así como las energías renovables: solar, eólica, mareomotriz y geotérmica son opciones que pueden ayudar al abandono del petróleo como fuentes de energía primaria; sin embargo, la transformación de éstas en combustibles adecuados para la mayor parte de industrias y productos actuales supone enormes retos, debido a que todos los recursos productivos —maquinaria, vehículos, etcétera— están adaptados a los hidrocarburos; por ello, es necesaria una opción que permita una transición que ayude a minimizar los riesgos.

Las energías renovables presentan algunas ventajas, como el hecho de ser inagotables en algunos casos y, por tanto, accesibles para la mayoría de las personas; sin embargo, no son fáciles de adaptar y su aplicación es compleja en algunos casos, sobre todo cuando los intereses del sector petrolero se ponen en riesgo. Adicionalmente a las energías ya mencionadas, existe la posibilidad de crear biocombustibles (BC) basados en el uso de materias primas que se producen de forma natural o artificial y en grandes cantidades. Esta es una de las mejores opciones para sustituir a los combustibles fósiles, pues dependiendo del proceso de realización, los BC pueden asemejarse mucho a estos últimos. No obstante, existen riesgos socioambientales derivados de una práctica inadecuada para su obtención o producción.

Se han observado ciertos riesgos, a escala internacional, en la producción de BC a partir del cultivo de cereales. En este estudio se pretende observar una correlación entre variables energéticas y alimentarias con implicaciones negativas para el precio de los alimentos que, en algunos casos, como el de México, podrían afectar a la población que depende de este tipo de recursos tanto para la alimentación de las personas como para el ganado.

La metodología que se utilizó fue por medio de la recopilación de información estadística sobre los precios de los bienes; además, se estimaron los valores de producción de los BC considerando los datos de la Energy Information Administration (EIA) –oficina de control y estadísticas sobre energía en Estados Unidos–, de esta forma se compararon los precios de los combustibles fósiles y de los BC, para señalar las ventajas de uso únicamente por el costo de materias primas (petróleo y maíz). Por ello se utilizó un método inductivo basado en el análisis de datos cuantitativos y consideraciones cualitativas –riesgos alimentarios, problemas de contaminación, etcétera– que se recuperan de estudios académicos actuales sobre el tema. En este sentido, se trata de una investigación post facto enfocada en señalar cuáles son las condiciones que favorecen el desarrollo de los BC actualmente y cuáles son las consecuencias.

El capítulo se divide en tres apartados, además de la introducción. En el primero se define a los BC, se revisan las condiciones internacionales que han impulsado su desarrollo y porqué podrían ser una alternativa al uso del combustible fósil. En la segunda sección se revisa el marco normativo para la promoción de los BC en México para identificar la forma en la que el país controla los posibles beneficios o peligros que representan este tipo de energéticos. En el tercer apartado se analizan las implicaciones de una masificación de BC basados en maíz, porqué resultan tan atractivos para la industria energética y cuáles serían los riesgos que representan. Finalmente, se presentan las conclusiones.

Biocombustibles, demanda energética y alternativas

Los BC son productos derivados del aprovechamiento de la materia orgánica disponible en diferentes formas, generalmente renovables, que bien pueden abarcar cultivos o ser desechos metabólicos (Ríos, Santos y Gutiérrez, 2017). La creación de éstos depende del interés del sector económico/productivo para el cual se quiera brindar una solución a sus necesidades energéticas. Los BC pueden emplearse para el remplazo de gasolina común en automóviles, pero también son alternativas eficientes en la producción de electricidad, calor, químicos, entre otros.

Cuadro 1. Aplicaciones de los biocombustibles

PROCESO	APLICACIONES
Mecánicos	Calefacción y electricidad
Termoquímicos	Calefacción, electricidad, transporte, industria química
Biotecnológicos	Calefacción, electricidad, transporte, industria química
Extractivos	Transporte, industria química

Fuente: elaboración con datos de Salinas y Gasca (2009).

En el Cuadro 1 se muestran los cuatro principales tipos de procesos para la obtención de BC con diversos métodos. Las diferencias entre las formas de elaboración de estos últimos son los impactos ambientales que producen, destacando los extractivos por ser los que pueden provocar mayores riesgos por la forma en que se consiguen –depredación intensiva del subsuelo, espacios forestales, etcétera– (Salinas y Gasca, 2009).

Los BC se clasifican por la materia prima empleada para su creación. Los de primera generación utilizan todo tipo de cultivo o alimento que un ser humano o algún animal podría consumir. Los de segunda generación emplean los desechos agrícolas –orgánicos o agroindustriales–, además no representan riesgo mayor para la seguridad alimentaria. Los de tercera generación son producto de microalgas y otras especies de plantas parecidas que se siembran de forma masiva sin hacer uso de tierra de cultivo. Los de cuarta generación son aquellos que se basan en material –bacterias– genéticamente modificado (Ríos, Santos y Gutiérrez, 2017).

Este tipo de energéticos biológicos se han vuelto el centro de la atención científica y económica durante las últimas décadas debido a la posibilidad de convertirse en una alternativa viable para el uso de combustibles fósiles. Y es que en este siglo se ha dado un gran cambio en el ámbito energético del país por la legislación que impulsa el desarrollo de BC y otras alternativas, debido a los riesgos socioambientales y a la eventual carencia de los hidrocarburos que puede poner en riesgo el bienestar económico nacional por la dependencia fiscal hacia esta industria.

La carencia de estabilidad en el precio de los hidrocarburos y sus derivados ha tenido efectos perjudiciales en la capacidad financiera de la administración federal debido a la histórica dependencia de los ingresos por este sector, también por la correlación negativa entre el tipo de cambio y los precios del recurso fósil, además porque una de las mayores fuentes de ingresos para México son los que

se recaudan fiscalmente por la industria petrolera.¹ Es decir, aunque la dependencia nacional de este sector es menor que en antaño, todavía existen amenazas al bienestar por efecto del aumento en los costos o en la disminución de la demanda de este recurso.

Varias de estas dificultades son producto de la falta de planeación e infraestructura adecuada para la provisión local de combustibles, limitándose a la importación de refinados que por la caída en el valor de los hidrocarburos se convierte en un negocio deficitario para la nación y con impactos graves en el costo social.

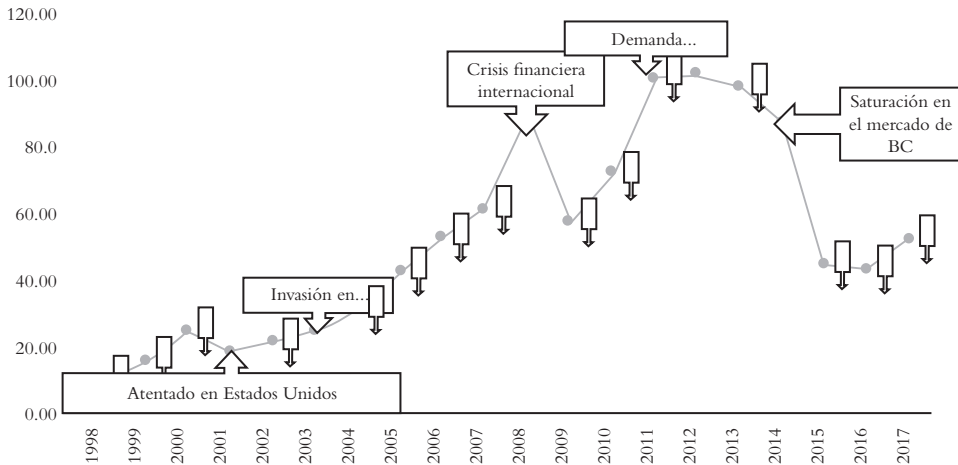
Debe señalarse que si bien existen numerosos elementos externos que pueden afectar a la industria energética mexicana y que han derivado en la reducción de los precios de este bien (Gráfica 1), la realidad es que la carencia de la inversión pública, la falta de visión de largo plazo y las reformas estructurales —realizadas desde la década de 1990, enfocadas en competir internacionalmente sin fortalecer la industria local—, han generado una crisis energética que revela la debilidad y dependencia de México ante un recurso no renovable del cual no existen alternativas eficientes que se puedan usar actualmente.

El problema es la falta de innovación al interior de la principal empresa productora de Petróleo en el país: Petróleos Mexicanos (Pemex), la cual ha sido relegada en los esquemas modernos del modelo de desarrollo nacional, por lo que sus ingresos se destinan en su mayoría a cubrir parte del déficit fiscal del gobierno, aportando casi 40% de la tributación durante el presente siglo (SHCP, 2015). Por lo que se desaprovecharon los ingresos extraordinarios fruto del alto precio del combustible durante el mismo periodo (Gráfica 1).

Como se observa en la Gráfica 1, el precio del petróleo ha variado constantemente en las últimas décadas, lo que responde principalmente a conflictos internacionales o crisis económicas, como el atentado de 2001, en Estados Unidos; la invasión a Irak en 2003; la crisis financiera internacional de 2008; la drástica reducción de la demanda de petróleo por parte de Asia a partir de 2011; además de otros eventos relacionados con los BC, los cuales compiten directamente con los combustibles derivados del petróleo, pues representan una opción mucho más económica y eficiente que los hidrocarburos.

¹ Aunque los combustibles fósiles y otros productos derivados de éstos representan entre 6 y 10% del producto interno bruto (PIB) nacional y menos del 15% de las exportaciones totales, lo cierto es que la venta de combustibles a sobre precio del que se maneja internacionalmente y los impuestos a esta industria generan un elevado beneficio para el país, por lo que la fluctuación constante en el valor del petróleo tiende a generar riesgos económicos elevados en el largo plazo.

Gráfica 1. Precio del petróleo y efectos históricos en dólares por barril a nivel internacional (1998-2017)



Fuente: elaboración con datos de EIA (base de datos en línea).

En 2014 se incrementó la producción de BC por parte de Estados Unidos y por otros países del continente americano –Brasil y Argentina–, en este escenario la oferta en el mercado se ha saturado y los precios han caído hasta la mitad de su valor en 2012 (Baffles *et al.*, 2015). El hecho de que este tipo de productos hayan afectado la demanda del petróleo se relaciona con dos factores esenciales: el primero es que al no utilizarse los recursos no renovables fundamentalmente para la producción de BC –sobre todo los de tercera y cuarta generación– se puede establecer un objetivo de seguridad energética independientemente de los ciclos naturales sobre los hidrocarburos; el segundo es que la crisis ambiental en la que se encuentra el mundo es atribuida científicamente y públicamente al uso de combustibles fósiles.

Por otro lado, los BC son teóricamente menos agresivos ecológicamente, tanto en su producción como en su uso, lo que implica menores riesgos a futuro –por la carencia de materias primas– y una orientación más sustentable en el largo plazo (Ríos, Santos y Gutiérrez, 2017). En contraste, los hidrocarburos tienden a la volatilidad en sus precios y a la disminución constante en las reservas, por lo que se convierten en un activo de elevada incertidumbre económica que termina por beneficiar a los BC debido a estos riesgos (Pérez *et al.*, 2017).

Considerando los posibles problemas de los combustibles fósiles, además de los beneficios desde la perspectiva de la sustentabilidad energética y económica de largo

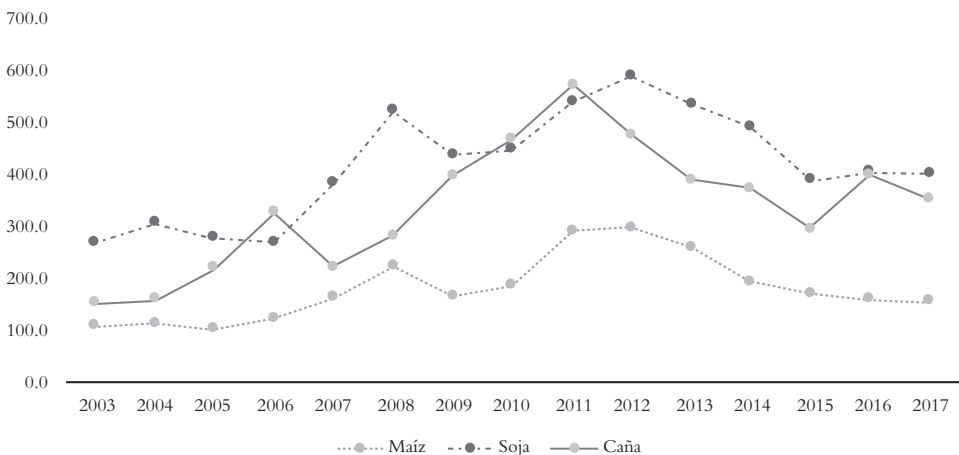
plazo, los BC podrían ser la opción más razonable para su uso en la industria (Oswald, 2017), ya que una buena parte de estos energéticos depende de almidones presentes en varios cereales, azúcares de frutos, residuos orgánicos –agrícolas y animales–, así como de algas y otros cultivos artificiales, con la facilidad de que estos dos últimos se pueden producir masivamente en espacios reducidos (Agüero *et al.*, 2015; Azamar y Salazar, 2015; Romero *et al.*, 2015; Zamora *et al.*, 2014).

La mayor parte de estos elementos provienen del maíz, soja, caña y piña, entre otros que son fundamentales en la dieta alimenticia de millones de personas, pero también son bienes de refugio utilizados comúnmente en periodos de crisis financiera para especular con ellos, cuestión que se refleja notablemente después de 2007 (Gráfica 2) y que se suma a la inestabilidad de los hidrocarburos afectando el precio de los recursos alimentarios.

Los efectos negativos en los mercados de cereales han sido producto de los problemas del modelo energético neoliberal basado en la petro-dependencia, el cual ha sido fundamental para el desarrollo económico que entró en riesgo durante el siglo XXI debido al incesante aumento en el precio de este bien, lo que supuso un acicate para impulsar la industria de los BC basados en el uso de materias primas y, por lo tanto, disparó el costo de estos bienes.

Como se observa en la Gráfica 2, el precio internacional del maíz, la soja y la caña se han mantenido en constante crecimiento durante el presente siglo debido

Gráfica 2. Evolución en el precio por tonelada de maíz, soja y caña de azúcar a nivel internacional en dólares (2003-2017)



Fuente: elaboración con datos de Indexmundi (base de datos en línea).

a la falta de seguridad en la provisión de estos recursos para cubrir la demanda alimentaria y energética.

En Estados Unidos gran parte de su producción se desvió hacia su industria de BC, lo mismo sucedió en Brasil. Por otra parte, Argentina y otros países productores de estos bienes sufrieron desastres naturales graves que afectaron las previsiones anuales de producción, aunado al incremento en los precios de los combustibles, por ello se encareció la capacidad campesina para enfrentar la situación internacional de desabasto (Rubio, 2017).

La crisis financiera de 2007 generó incertidumbre atrayendo el interés sobre los *commodities*, minerales, agrícolas y petrolíferos, lo que potenció el precio de estos recursos creando un riesgo alimentario para las comunidades que dependen intensivamente de éstos en su canasta básica.²

Aunque en general el precio de estos recursos se ha elevado, el del maíz mantiene una mayor estabilidad y, en 2017, dicho producto se mantuvo como el más barato en contraste con la soja y la caña, lo que eleva el interés por usarlo en la producción de energéticos. En naciones como México, donde se emplea intensivamente este producto, se debe enfatizar en materia legislativa y también socioambiental antes de impulsar la industria de este tipo de energéticos.

Legislación y biocombustibles en México

La calidad y cantidad de BC disponibles depende enteramente del tipo de materia prima empleada, por lo que se deben considerar las capacidades naturales de cultivo de estos recursos para generar energéticos viables prácticos –de uso–, seguros –sin riesgos ambientales, de salud o alimentarios– y económicos –que sean más baratos que sus alternativas.

Es importante mencionar que la producción de BC implica riesgos notables que, por falta de previsión y planeación, pueden terminar impactando en una o varias de las dimensiones de la sustentabilidad. Como ya se ha comentado, en el caso de los BC producidos en el continente americano se emplean cereales –maíz, soja y caña entre otros–, los cuales son bienes que se mantienen en la canasta de consumo

² En México la alimentación recomendada incluye varios productos que dependen del maíz: aceites, harinas, tortillas; además, la carne es un bien que depende del uso del maíz para la alimentación de los animales.

familiar de varios países de la región o que son empleados por otras industrias como la refresquera, en el caso de la caña de azúcar.

En México existe una divergencia entre la disponibilidad y la necesidad de dichos recursos, tanto para consumo humano –tortilla, harinas, aceites, etcétera– como para la industria –forraje para animales, jarabes, etcétera–, por lo que aumentar la demanda de éstos al incluirlos activamente en la producción de energéticos tiende a generar otro tipo de riesgos con un trasfondo más poblacional.

Desde el aspecto social se pasa de una dependencia de los combustibles elaborados con fósiles a los que se producen con granos y otros productos que podrían provocar una falta de disponibilidad de alimentos en caso de un alto nivel de demanda. Por otro lado, desde la perspectiva económica, la transformación de víveres en carburantes supondría que los costos de los comestibles o de los BC se verían directamente afectados por los cambios en el mercado de uno u otro.

Debido a que el marco normativo nacional carece de incentivos para mejorar la competitividad de los cereales –maíz, caña, soja– que se utilizan globalmente para la realización de estos energéticos, es difícil que los campesinos y las empresas agroindustriales se preocupen por destinar parte de su producción al mercado de consumo humano, orientándose hacia el mercado industrial de los BC. No obstante, existen algunos esfuerzos legislativos por atender las múltiples dimensiones que estos combustibles impactan, un ejemplo es la Ley de Desarrollo y Promoción de los Bioenergéticos en México (LDPBM) de 2005, la cual tiene por objeto la promoción y desarrollo de los bioenergéticos con la finalidad de coadyuvar a la diversificación energética y al desarrollo sustentable como condiciones que permiten garantizar el apoyo al campo mexicano. En otras palabras, la ley incentiva la creación de bioenergéticos –basados en el uso de maíz y la caña– para el progreso e incremento de múltiples fuentes de energías y para mejorar las condiciones de competencia en el sector agrícola.

Además de la invención, desarrollo y producción de energía renovable, también busca mejorar la calidad de vida de la población rural. No obstante, la ley no especifica de qué manera se lograría. Asimismo, dicha ley menciona que la producción de bioenergéticos será con base en insumos de origen vegetal, sin alterar ningún patrón de consumo y sin poner en riesgo la seguridad alimentaria, cuestión que no se aborda en ninguna ley secundaria ni en el plan de producción de estos recursos.

Dicha Ley es un complemento de la Ley sobre el Aprovechamiento de Fuentes Renovables de Energía (LAFRE) (2005), la cual tenía como principal objetivo generar hasta 8% de energía eléctrica en el país por medio de recursos potencialmente

renovables, lo cual sí se logró, pero no fue por medio de las materias primas sino a partir de las energías eólica e hidráulica. El interés fundamental de la LDPBM es la creación de BC basada en cultivos agrícolas y de aceites.

Además, ambas leyes buscan crear un marco de desarrollo para el campo mexicano y transitar hacia otro esquema basado en energías renovables por medio del Programa Especial para el Aprovechamiento de las Energías Renovables y Financiamiento hacia la Transición Energética. Este proyecto y las dos leyes mencionadas fortalecen el aspecto de producción de BC en México, pero se centran en la obtención del producto y descuidan el nivel de investigación y desarrollo para la planeación en el país.

A pesar de las leyes comentadas no existe un marco de apoyo que fortalezca a los campesinos productores de maíz, caña y otros recursos que pueden verse afectados por la creación de estos energéticos o que les motiven a beneficiar al mercado alimentario local por encima de la industria internacional de BC que puede pagar mejor sus productos.

Adicionalmente se debe considerar la falta de una institución o comisión única para el impulso y desarrollo de BC en México, pues no se cuenta con una estructura especializada en el tema que afronte los riesgos potenciales que plantea esta industria para el campo y la alimentación del país.

Los organismos públicos encargados de este tema son: la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (Sagarpa), la Secretaría de Energía (Sener), la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat), la Secretaría de Economía (SE) y Secretaría de Hacienda y Crédito Público (SHCP), lo que dificulta la creación de una agenda estratégica adecuada debido a la falta de comunicación oportuna entre estas instituciones para evitar la creación de leyes que generen una situación de trámites repetidos –información duplicada, doble ventanilla, entre otras.

La carencia de un ordenamiento adecuado y los problemas de coordinación entre organismos públicos tiende a generar incapacidad para evitar o resolver conflictos de todo tipo, como en este caso, la producción de BC. En cambio, un adecuado esquema institucional puede facilitar el desarrollo de respuestas ante problemas complejos que generan los BC, tales como el aumento en el uso de estos alimentos para la producción de dichos energéticos, ya que se genera una necesidad de incrementar las tierras de cultivo para suplir el déficit de la demanda y los potenciales riesgos de afectar irreversiblemente el equilibrio ambiental de las zonas en donde se realicen monocultivos masivos.

De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO)³ (2016), los países que se consideran en vías de desarrollo tienden a sufrir una pérdida anual de bosques y selvas debido a que destinan estos lugares para ampliar la superficie agrícola para la plantación de recursos exclusivos para la producción de biocombustibles.

Producción de biocombustibles e impactos de la industria

América Latina destaca por las dificultades y bajas capacidades agrícolas para cubrir su propia demanda interna de varios de los alimentos empleados para los BC (Morelos, 2016), por lo que la producción de este tipo de energéticos resulta controversial debido a que profundizaría los riesgos alimentarios para los sectores marginados que dependen de productos básicos –maíz, soja, caña de azúcar, entre otros– y, en un plano más económico, resultaría impráctico, pues los monocultivos masivos tienden a la disminución de rendimientos y calidad en el largo plazo.

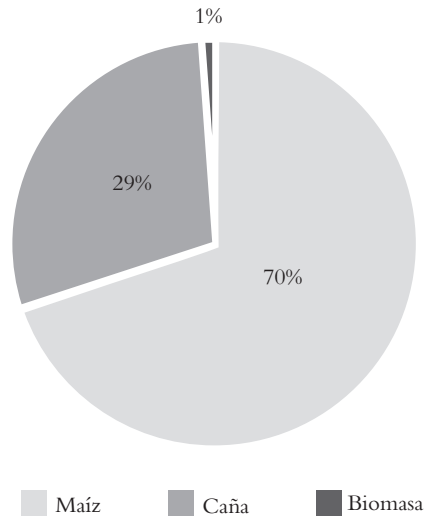
Este último factor es producto de las condiciones sociales que se presentan en zonas rurales de países como México, donde se concentra aproximadamente 30% de sus habitantes, la cual es mayoritariamente pobre (Coneval, 2017), por lo que fomentar el consumo de un bien elemental como el maíz –que además tiene un déficit de producción en el país–, generaría un incremento natural en su precio derivando en un impacto inmediatamente negativo sobre el bienestar familiar de este segmento de la población que vería encarecida su capacidad de acceder a alimentos (FAO, 2016).

El problema de fondo es que naciones desarrolladas como Estados Unidos –principal productor mundial de maíz–, han destinado gran parte de las cosechas de sus bienes comestibles a la creación de estos BC, alcanzando cifras récord en la creación de energéticos en 2017, produciendo 120 millones de litros (EIA, 2018), la mayor parte de los cuales están íntimamente relacionados con la utilización de cereales y otros recursos fundamentales para la alimentación humana (Pérez *et al.*, 2017).

En la Gráfica 3 se señala que la principal materia prima empleada para la creación de BC es el maíz (70%), seguido de la caña (29%) y solamente 1% es producto de la biomasa. Al observar estos datos en conjunto con los precios de producción de BC y gasolina fósil calculados para 2017 (presentados en el siguiente párrafo) se puede formular un diagnóstico más preciso sobre el elevado interés por el uso de alimentos para la creación de energéticos a pesar de los riesgos que representa.

³ Por sus siglas en inglés: Food and Agriculture Organization.

Gráfica 3. Composición de las principales materias primas para la producción de biocombustibles mundiales en 2017 (porcentaje)



Fuente: elaboración con datos de Pérez *et al.* (2017).

El costo por un barril de petróleo (159 litros) internacional en 2017 fue de 61.19 dólares, mientras que la tonelada de maíz (1 000 kilos) costó 148.98 dólares. De acuerdo con los datos estimados de EIA (2018) la producción que un litro de gasolina utiliza en promedio es de 2.8 litros de petróleo, mientras que un litro de BC utiliza 2.3 kilos de maíz (cálculo propio con base en la aproximación de 420 litros por cada tonelada). De esta forma, producir un litro de gasolina a precios de 2017 costaría 1.07 dólares el litro, en contraste con un litro de BC, que costaría 0.34 centavos de dólar.

Al analizar la información anterior se pueden asumir varios hechos: el primero es que con base en los datos de las gráficas 1 y 2, aun cuando el costo de petróleo se mantiene a la baja, la producción de gasolina tiene un precio mucho mayor que el de los BC. Aunque esto no estima las capacidades de producción, gastos de tecnología y el posible encarecimiento en el precio del maíz y otros cereales derivados del uso intensivo de estos recursos. En el largo plazo, y ante el uso de otros materiales más baratos para la producción de BC, sería posible suponer que los fósiles no son rentables económicamente y tampoco en términos prácticos si se considera que es imposible producirlos artificialmente (Pérez *et al.*, 2017).

No obstante, a pesar de lo anterior, la visión puramente economicista –mejores precios determinan completamente la producción– impacta negativamente en la población, pues el precio de los bienes comestibles en el mercado internacional se ha visto afectado principalmente por la producción de BC debido al uso intensivo de granos por su bajo costo (Alejos y Calvo, 2015).

De forma particular y solamente para el caso de México, se ha demostrado que el incremento en la producción de energéticos biológicos aumenta hasta 30% el precio del maíz y sus derivados (Azamar y Salazar, 2015; Hochman *et al.*, 2015). Aunque existen otras opciones como la caña, éstos generan otros problemas como el incremento en el uso de suelo para cumplir con la demanda interna de azúcar y de los BC en el país, lo que provoca erosión y otros factores negativos como baja calidad en la cosecha (Platas *et al.*, 2016).

La producción de BC crece en todo el mundo, pero es liderada por dos países del continente americano –Estados Unidos y Brasil. El primero realiza su producción principalmente basada en maíz y el segundo en caña; en México también se elabora este energético, pero su capacidad es mínima, aunque en 10 años ha pasado de 10 millones de galones hasta casi 200 millones (Pérez y Venegas, 2017).

Cuadro 2. Principales países productores de biocombustibles a nivel mundial 2007–2016 (porcentaje)

	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Estados Unidos	49.63	52.74	53.84	59.34	60.76	59.39	56.66	58.09	57.54	57.55
Brasil	38.33	36.69	32.38	30.88	24.31	25.06	26.70	25.15	27.56	27.39
México	0.02	0.04	0.09	0.11	0.12	0.14	0.19	0.19	0.19	0.20
Otros	12.01	10.53	13.69	9.67	14.81	15.41	16.45	16.57	14.70	14.86

Fuente: elaboración con datos de Pérez y Venegas (2017).

En el Cuadro 2 se observa cómo México representa menos de 1% del total de BC producido a nivel mundial, por lo que su limitada capacidad no tiene impacto en el mercado internacional de este bien, lo que debilitaría cualquier propuesta de impulsar una industria nacional de este bien (Romero *et al.*, 2015).

Adicionalmente, con la información del Cuadro 2 se observa que la tendencia de estos energéticos es hacia el incremento productivo, lo que mantendría en niveles altos los precios del maíz, la soja y la caña; asimismo, podría disminuir el valor del petróleo, aún más por la posible baja demanda de este bien y crearía otros mercados

en los que el país puede participar con mayor seguridad –vehículos y maquinaria que utilicen biocombustibles.

Por otra parte, si se considera que las tendencias actuales en la producción de BC se mantendrán y en un plazo no mayor a 10 años se incrementarán –pasando de producirse aproximadamente 100 millones de litros en 2016, hasta los 150 millones de litros en 2025, se aceleraría la demanda de los BC y, por tanto, los costos de los comestibles aumentarían en mayor medida–, por ello, se debería evaluar la creación de una plataforma de apoyo de desarrollo al campo mexicano que logre potenciar la producción de estos recursos y aproveche el incremento en los precios internacionales en el largo plazo.

En el caso particular del maíz (principal materia prima actualmente para este tipo de producción y fuente primaria de alimentos en México), ya se observan cambios drásticos en el precio de la tortilla –uno de los bienes más consumidos en el país. Esto corresponde con lo mencionado por Romero *et al.* (2015), quienes señalan que las condiciones internacionales del mercado de los BC tienen un efecto negativo inmediato sobre el maíz mexicano.

Una cuestión que se debe recuperar es que los BC mantienen una evolución constante en cuanto al uso de materiales para su realización, por lo que otra forma de obtener un provecho de esta tendencia es a partir de la inversión en desarrollo e investigación para el empleo de más baratas y mejores materias primas que puedan ser empleadas como alternativas a los cereales.

Conclusiones

La creación de BC desde la perspectiva social busca disminuir los riesgos de una producción regida por la demanda del mercado, la cual es ajena a las necesidades de la sociedad: campesinos, indígenas y población urbana.

Para que la producción de BC sea eficiente se requiere que su elaboración utilice menos energía que la que éste va a proporcionar, pero son necesarias varias toneladas de alimentos para producir 1 000 litros de BC, lo que también es considerablemente más contaminante por la cantidad de desperdicios que necesariamente se originan en el proceso de tratamiento.

El uso de BC en gran medida es para reducir el impacto ambiental que generan los combustibles fósiles, pero si los BC no logran este propósito, entonces es necesario evaluar otras formas de producir carburantes.

Para el caso de México, la aplicación de un modelo sustentable utilizando BC para su mercado energético requiere todos los posibles elementos –alimentos, desechos, microalgas, entre otros– para la producción de éstos. Sin embargo, el maíz al ser un alimento esencial de la dieta mexicana y que además presenta déficit en su producción, carece de bondades suficientes para que pueda ser considerado como materia prima para los biocombustibles.

Por otro lado, el uso del maíz para la creación de BC como en el caso de Estados Unidos, la caña de azúcar en Brasil y los cereales y oleaginosas en la Unión Europea ponen en riesgo la seguridad alimentaria, no solamente de estas naciones, sino de aquellos países en donde se consumen intensivamente estos productos.

Adicionalmente, la producción intensiva de los BC tiene efectos inmediatos en los precios internacionales de los alimentos, lo que genera riesgos colaterales en países fundamentalmente importadores de estos bienes.

Como se ha podido observar, el precio de la tortilla –un bien consumido en todo el país de forma generalizada–, mantiene una relación más cercana con la creación de BC que con el precio del petróleo, el cual se asocia tradicionalmente a los costos de combustibles para el transporte y a la generación de energía en la producción de este bien.

Por otro lado, México no posee un plan estructurado adecuadamente para el desarrollo de un programa de protección ambiental, social y económica de todos los agentes involucrados en la creación de BC, lo que le resta capacidad, facilidad de innovación y presencia en este cambio. Por ello se requiere del apoyo del Estado a partir de programas continuos de capacitación y mejoramiento técnico para que los productores mexicanos de BC puedan optimizar las técnicas ya conocidas y mejorar la viabilidad económica de este tipo de productos.

En nuestro país resulta fundamental y necesario establecer un plan de desarrollo de largo plazo que considere la debilidad del campo mexicano y sus capacidades, de forma que se disminuya el interés en el uso del maíz o caña de azúcar que ponen en riesgo la seguridad alimentaria.

Bibliografía

Agüero Rodríguez, J., J. Tepetla Montes y A. Torres Beristaín (2015). “Producción de biocombustibles a partir de la caña de Veracruz, México: perspectivas y riesgos socioambientales”, *Ciencia*, núm. 9, pp. 74-84.

- Alejos C. y E. Calvo (2015). “Biocombustibles de primera generación”, *Revista Peruana de Química e Ingeniería Química*, núm. 18, pp. 19-30.
- Azamar Alonso, A. y C. Salazar (2015). “Amenaza y seguridad alimentaria: producción de etanol en Estados Unidos”, *Memorias*, 13(24), pp. 87-104.
- Baffles, J., M.A. Kose, F. Ohnsorge y M. Stocker (2015). *The great Plunge in Oil Prices: Causes, Consequences, and Policy Responses, Policy Research Note*. Washington: World Bank.
- Centi, G., P. Lanzafame y P. Siglinda (2011). “Analysis of the alternative routes in the catalytic transformation of ligno cellulosic materials”, *Catalysis Today*, 167(1), pp. 14-30.
- Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (Coneval) (2017). “Coneval informa la evaluación de la pobreza 2010-2016”. México: Coneval.
- García Jiménez, F. (1996). “La petroquímica en México”, *Journal of the Mexican Chemical Society*, 40(5), pp. 194-196.
- Hochman, G., D. Rajagopal, G. Timilsina y D. Zilberman (2015). “Quantifying the causes of global food commodity prices crisis”, *Biomass and Bioenergy*, núm. 68, pp. 106-114.
- Huber, G., S. Iborra y A. Corma (2006). “Synthesis of transportation fuels from biomass: chemistry, catalysts and engineering”, *Chemical Reviews*, 9(106), pp. 4044-4098.
- Ley de Desarrollo y Promoción de los Bioenergéticos en México (LDPBM), expedida en el *Diario Oficial de la Federación* el 1 de febrero de 2008. Texto vigente, México.
- Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética, expedida en el *Diario Oficial de la Federación* el 7 de septiembre de 2005. Texto vigente: última reforma publicada en el *Diario Oficial de la Federación* el 12 de enero de 2012. México.
- Morelos, G.J. (2016). “Análisis de la variación de la eficiencia en la producción de biocombustibles en América Latina”, *Estudios Gerenciales*, núm. 32, pp. 120-126.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) (2016). “El estado mundial de la agricultura y la alimentación: cambio climático, agricultura y seguridad alimentaria”. FAO.
- Oswald, Ú. (2017). “Seguridad, disponibilidad y sustentabilidad energética en México”, *Revista Mexicana de Ciencias Políticas y Sociales*, LXII(230), pp. 155-195.
- Pérez Fernández, A. y J.A. Venegas Venegas (2017). “Producción de bioetanol en México: implicaciones socioeconómicas”, *Revista Internacional Administración & Finanzas*, 10(1), pp. 13-24.
- Pérez Fernández, A., M.I. Rivas Martínez, I. Caamal Cauich y D. Martínez Luis (2017). “La producción de bioetanol y su impacto en el precio de productos agrícolas en México”, *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 4(12), pp. 597-602.
- Platas, R., C. Zetina, A.J. Vilaboa y H.R. Martínez (2016). “Adaptación y mitigación del cambio climático con la producción de bioenergéticos en suelos marginales”, *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, núm. 14, pp. 2857-2866.

- Ríos Badrán, I.M., J. Santos Cruz y C. Gutiérrez Antonio (2017). “Biocombustibles sólidos: una solución al calentamiento global”, *Ciencia*, 68(4), pp. 1-7.
- Romero, P.A., J. Hernández, M. León y D.M. Sangermán Jarquín (2015). “Impacto en el mercado mexicano de maíz en ausencia de políticas de producción de biocombustibles en Estados Unidos de América”, *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, núm. 6, pp. 1023-1033.
- Rubio Vega, B.A. (2017). “El movimiento campesino en América Latina durante la transición capitalista, 2008-2016”, *Segunda época*, núm. 31, pp. 15-38.
- Salinas Callejas, E. y V. Gasca Quesada (2009). “Los biocombustibles”, *El Cotidiano*, núm. 157, pp. 75-82.
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (Sagarpa) (2014). *Informe de labores*. México: Sagarpa.
- Secretaría de Hacienda y Crédito Público (SHCP) (2015). *Criterios generales de política económica para la Iniciativa de Ley de Ingresos y el Proyecto de Presupuesto de Egresos de la Federación correspondientes al ejercicio fiscal 2015*. México: Secretaría de Hacienda y Crédito Público.
- Zamora Hernández, T., A. Prado Fuentes, J. Capataz Tafur, E. Barrera Figueroa y J.M. Peña Castro (2014). “Demostraciones prácticas de los retos y oportunidades de la producción de bioetanol de primera y segunda generación a partir de cultivos tropicales”, *Educación química*, núm. 25, pp. 265-274.
- Zoebelin, H (2001). *Dictionary of renewable resources*. Wiley, Alemania.

Biorrefinería basada en aguas residuales municipales e industriales: producción de biomasa, lípidos, pigmentos y bioenergía*

Luis Gilberto Torres Bustillos

Introducción

El cultivo de microalgas se ha empleado desde tiempos ancestrales para la generación de bienes. Pueblos tan antiguos como los aztecas y los chinos ya cultivaban algas con fines alimenticios (Posten, 2012). Las microalgas son los productores primarios de oxígeno (fotosíntesis) y presentan un enorme potencial para aplicaciones biotecnológicas; su cultivo es también una opción interesante para el tratamiento de aguas residuales. Estos microorganismos son eficientes en la recuperación de grandes cantidades de nitrógeno, fósforo inorgánico y metales pesados de los efluentes. Además, las microalgas son responsables de la reducción de CO₂ de efluente gaseoso y de la atmósfera, reduciendo el impacto de gases de efecto invernadero. Por otra parte, la biomasa de microalgas se puede utilizar para la producción de pigmentos, lípidos, alimentos, y la energía renovable (Torres, 2104).

Varios autores han descrito la producción de biomasa algal empleando aguas residuales (i.e., Mehmood *et al.*, 2014). En algunos de esos trabajos se resalta el uso de diferentes cepas e incluso cultivos mixtos (Abou-Shanab *et al.*, 2014; Arbid *et al.*, 2013; Ryu *et al.*, 2014; Yang *et al.*, 2009; Coppens *et al.*, 2014; Ruiz *et al.*, 2011).

* Agradezco al SIP-IPN (Proyecto 20170640) el apoyo financiero para la realización de los cultivos de *Chlorella* y *Spirullina* en medios definidos y aguas residuales; a mis alumnos de doctorado, maestría y licenciatura, quienes participaron en el proyecto de microalgas, entre ellos a Yaremi López, Julio César Roldán, Raúl Gálvez, Benjamín Campos, Roberto Cárdenas, Alexa Urzua y María Torre.

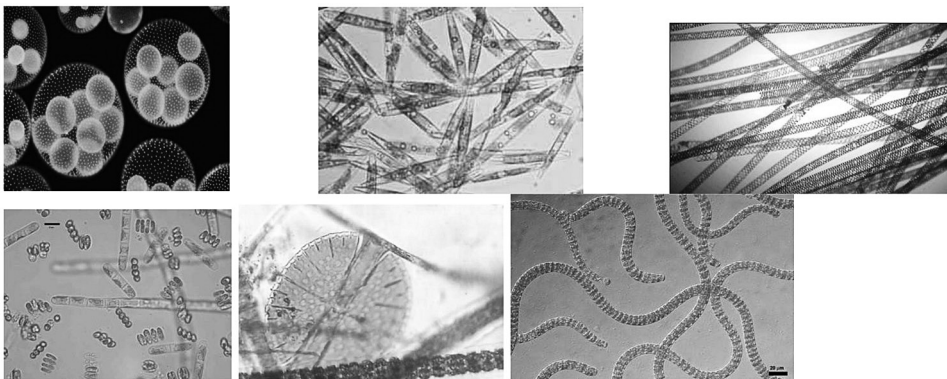
Géneros y especies de microalgas más empleadas

Las cepas más empleadas en el tratamiento de aguas residuales son: *Chlorella sp.* (Yang *et al.*, 2009; Cho *et al.*, 2011), *Chlorella vulgaris* (Márquez *et al.*, 2013; Ruiz *et al.*, 2011; Ryu *et al.*, 2014; Arbid *et al.*, 2013; Dominguez *et al.*, 2013; Mostafa *et al.*, 2012; Domínguez *et al.*, 2013), *Chlorella Kessleri* (Arbib *et al.*, 2013), *Chlorella protothecoides* (Fei *et al.*, 2014) y *Scenedesmus obliquus* (Arbib *et al.*, 2013; Ruiz *et al.*, 2014), aunque otras cepas tales como *Micractinium reisseri* (Abou-Shanab *et al.*, 2014), *Nostoc muscorum*, *Anaeba flousaquae*, *Oscillatoria sp.*, *Anaeba orizae*, *Wöllea saccata*, *Nostoc humifusum*, *Phormidium fragile* (Mostafa *et al.*, 2012) y *Botryococcus terribilis* (Domínguez *et al.*, 2013) han sido reportadas también (Figura 1).

Aguas residuales empleadas en el cultivo de microalgas

Las microalgas pueden ser cultivadas en agua dulce, salada y aun en aguas residuales de distintos orígenes. ¿Cuál es el interés de cultivarlas en estas últimas? Básicamente: 1) no emplear aguas limpias o potables; 2) aprovechar los contenidos de N y P y material carbonado que poseen las aguas para producir biomasa y al mismo tiempo lípidos, pigmentos y bioenergía, y 3) dar tratamiento a dichas aguas, antes de disponerlas. Las aguas más empleadas sin duda, son las municipales (Ruiz *et al.*, 2011;

Figura 1. Existen diferentes cepas de microalgas de agua dulce, salobre y salada que pueden ser reproducidas en aguas residuales



Fuente: elaboración propia.

Yang *et al.*, 2009; Ryu *et al.*, 2013; Abou-Shanab *et al.*, 2014), aunque dichas aguas pueden emplearse sin tratar, tras un tratamiento anaerobio o aerobio; o después de procesos primarios (Abou-Shanab *et al.*, 2014). El Cuadro 1 muestra algunas de las aguas residuales empleadas en el cultivo de microalgas, así como los productos y concentraciones alcanzadas.

Cuadro 1. Aguas residuales, microalgas y productos generados

AGUA RESIDUAL PROVENIENTE DE:	ESPECIE MICROALGAS	PRODUCTOS	REFERENCIA
Efluentes secundarios	<i>Chlorella sp.</i>	0.11 g/L	Xin <i>et al.</i> (2009)
Agua residual municipal (ARM)	<i>Chlorella sp.</i> <i>Desmodesmus sp.</i> <i>Scenedesmus sp.</i> <i>Chlorococcu sp.</i> <i>Coelastru sp.</i> <i>Pinnularia sp.</i> <i>Micractinium sp.</i>	Productividad biomásica de 11,4 g/m ² día	Santiago <i>et al.</i> (2013)
Agua residual de rastro de cerdos +trat. secundario	<i>Botryococcus braunii</i>	Biomasa >7 g/L. día	An <i>et al.</i> (2003)
ARM tratamiento secundario	<i>Chlorella sp.</i> 227	Biomasa, lípidos	Cho <i>et al.</i> (2011)
ARM	<i>Micractinium sp.</i> , <i>Desmodesmus sp.</i>	Crecimiento g/de 8 m ² día	Craggs <i>et al.</i> (2012)
ARM	<i>Chlorella minutissima</i>	Biomasa. Crecimiento mixotrófico	Bhatnagar <i>et al.</i> (2010)
Efluente secundario ARM	Consortio	Biomasa 71 ton métricas/ha año	Dalrymple <i>et al.</i> (2013)
ARM con diferentes niveles de tratamiento	<i>Clamydomonas reinhardtii</i>	Biomasa hasta 22 g/L día	Kong <i>et al.</i> (2010)
AMR concentrado	<i>Chlorella sp.</i> <i>Haematococcus sp.</i> <i>Scenedesmus sp.</i> <i>Chlorococcum sp.</i>	Biomasa 2 g/L	Li <i>et al.</i> (2011)
Aguas residuales industriales sin tratar	Consortio	Biomasa Productividad de 21.1 g/m ² día	Chinassamy <i>et al.</i> (2010)
Industria láctea y ARM	Consortio	Lípidos. Productividad 2.8 g/m ² día	Woertz <i>et al.</i> (2009)
Aguas residuales y estiércol digerido	<i>Chlorella</i> , <i>Scenedesmus</i> , <i>Botryococcus</i> , <i>Ankistrodesmus</i> , <i>Tetraadron</i> , <i>Tetrecystis</i> , <i>Nannochloris</i> , <i>Crucigenia</i> , <i>Dictyochloris</i> , <i>Chlamydomonas</i>	Biomasa, alta tasa de crecimiento	Zhou <i>et al.</i> (2012)

Fuente: adaptado de Mehmood *et al.* (2014).

Otros medios empleados para el cultivo de microalgas son las mezclas de agua residual y glicerol (que proviene del proceso de transesterificación de los triacilglicéridos, en la producción de biodiésel) (Domínguez *et al.*, 2013), así como las vinazas de caña, previamente tratadas por digestión anaerobia (Márquez *et al.*, 2013). Recientemente se ha publicado el uso de ácidos grasos volátiles VFA (i.e., acético, propiónico y butírico), que provienen de otro proceso biotecnológico, i.e., la producción de hidrógeno por fermentación oscura (Fei *et al.*, 2014).

Mehmood *et al.* (2014) incluyen una tabla en su revisión, en la que se reporta que una gran cantidad de empresas producen biomasa algal y lípidos (fundamentalmente) y realizan el tratamiento de aguas residuales tan diversas como las provenientes de plantas de regeneración a partir de carbón, empresas productoras de aceite de oliva, lodos municipales digeridos, granjas de cultivo de cerdos, etcétera. En estos sistemas se eliminaron básicamente P y N de las corrientes, pero en algunas de ellas también se reporta la eliminación de metales pesados, entre ellos Hg, Cd, Pb, Zn, etcétera.

Cabe resaltar que en los trabajos anteriormente citados, las microalgas son crecidas en general en autotrofia, por lo que sólo utilizan el N y el P presente en las aguas residuales. En algunos trabajos, como el de las vinazas de caña de azúcar y en el de los VFA, las microalgas crecen en condiciones de heterotrofia/mixotrofia.

Contenido de P y N de las diferentes aguas residuales

Recientemente se ha reportado la importancia que tiene el análisis de las aguas residuales ya sea municipales o industriales en cuanto al contenido de P y N y más aún, del N y P disponibles para el crecimiento de microalgas (Monfet y Unc, 2016).

Remoción de materia orgánica, P y N en aguas residuales

Una de las características del cultivo de microalgas en aguas residuales municipales o industriales, es el hecho de que éstas emplean el P y el N contenido en las aguas para desarrollarse y producir lípidos y otros productos de interés (crecimiento autotrófico, con presencia de luz y fuente de carbono inorgánica como CO_2 o HCO_3^{-1}).

Por otro lado, en el caso de aguas residuales que contienen cantidades importantes de materia carbonada, las microalgas pueden eliminar carga orgánica (como DQO) además de P y N (crecimiento en heterotrofia, sin necesidad de luz).

Coppens *et al.* (2014) estudiaron varias cepas de diatomeas en la reducción de nitratos de aguas residuales. Las remociones de N y P, así como el crecimiento de biomasa fueron bien modelados por las ecuaciones propuestas. También se encontró que las eficiencias máximas de remoción y el crecimiento biomásica fueron una función del tiempo de retención hidráulico HRT. La biomasa máxima fue producida con un HRT de aproximadamente 20 horas, mientras que las mayores remociones de N (casi del 100%) y P (casi 80%) fueron encontradas a un HRT de 45 días.

Por otro lado, Ruiz *et al.* (2011) estudiaron la remoción de P (como fosfatos) y N (como nitratos o NH_4) presentes en aguas residuales municipales, empleando la microalga *Chlorella vulgaris*. Para modelar el crecimiento emplearon la ecuación propuesta por Verhulst y para la remoción de nutrientes fue aplicado el modelo de Luedeking-Piret. Las velocidades de producción de biomasa fueron de 0.95 g SS/L día, mientras que los valores del rendimiento células/N y células/P fueron de 11.51 g SS/g N y 0.04 g SS/ g P.

Finalmente, Arbib *et al.* (2013) estudiaron la eliminación de P y N, la fijación de CO_2 y la producción de lípidos de tres cepas diferentes, incluyendo *Scenedesmus* y dos cepas de *Chlorella*. Los experimentos se llevaron a cabo en las aguas residuales municipales y un medio sintético para propósitos de comparación. La remoción de fósforo y nitrógeno se modelaron usando el modelo cinético propuesto por Quiroga-Sales (citado por Arbib *et al.*, 2013).

En muchos trabajos se ha reportado la habilidad de las microalgas para crecer en modo heterotrófico, esto es, empleando una fuente de carbón orgánica, además del P y N que requieren para su proliferación. Se conoce que el crecimiento heterótrofo de las microalgas es muy productivo, ya que, dependiendo de la fuente de carbón y su concentración en el medio, se han alcanzado concentraciones de biomasa de hasta 13-15 g/L (para el caso en que se usó específicamente azúcar de caña). También se ha reportado que es común hacer uso de aguas residuales municipales pero, sobre todo, industriales para el cultivo de microalgas en ausencia de luz.

Cultivo masivo de microalgas

En algunos trabajos se han discutido los medios, las cepas de microalgas y el tipo de aguas residuales empleadas. Otro aspecto importante para el desarrollo de la tecnología es el sistema en el que crecen masivamente las microalgas.

Como describe Mehmood (2014) en su revisión, las microalgas han sido cultivadas en aguas residuales empleando diversos sistemas abiertos y cerrados. Entre

los primeros encontramos a los *raceways* fundamentalmente, mientras que entre los segundos podemos mencionar a los reactores tubulares (*airlifts*, reactores tubulares horizontales, etcétera) y a los reactores de placas planas.

Respecto a la configuración de los biorreactores y su operación, Michels *et al.* (2014) estudiaron el efecto de la concentración de biomasa en la productividad de *Tetraselmis suecia* en un reactor tubular a escala piloto que emplea luz natural. Estos autores hicieron pruebas en reactores con concentraciones biomásicas de 0-5, 0.7, 0.9, 1.5 y 2 g/L. Encontraron que la productividad volumétrica neta de la microalga fue una función de los fotones de luz recibidos (con un máximo de 0.45 g/L día para un flux de fotones de alrededor de 15 moles/día). Por otro lado, la concentración de la biomasa en el reactor también tuvo un marcado efecto sobre la productividad biomásica (las mayores concentraciones de biomasa promovieron menores productividades). Esto es debido, entre otros factores, al efecto de oscurecimiento que producen unas microalgas sobre otras a altas concentraciones celulares. De acuerdo con este trabajo, las mejores productividades pueden alcanzarse si se mantienen concentraciones celulares de alrededor a 0.7 g/L (0.35 g/L. día).

Arbib y colaboradores (2013) estudiaron el efecto del control de pH por medio de la adición de CO₂ en tres diferentes tipos de reactores que tratan aguas residuales a largo tiempo de proceso. Estos tres fotobiorreactores fueron un *raceway* simple, un *raceway* con un sistema profundo para burbujear CO₂ y un reactor tubular horizontal. Los tres fueron operados en lote hasta estabilizar el proceso y una vez alcanzado ese punto se les adicionó CO₂ en diferentes proporciones i.e., 10, 15 y 20 L/min.

La irradiación solar al exterior tuvo grandes fluctuaciones en los tiempos del experimento, pero alcanzó valores promedio de alrededor de 500 mmoles de fotones/m²día, con máximos de hasta 2,250 mmoles de fotones/m²día. La adición de CO₂ mejoró las concentraciones máximas de microalgas en los tres sistemas, sobre todo en el sistema tubular y en el *raceway* con sistema profundo para burbujeo de gases. En operación continua se alcanzaron concentraciones de alrededor de 500 mg SS/L en el *raceway* modificado y de hasta 750 mg SS/L en el reactor tubular, para velocidades de aereación de 15 L/min.

Cultivos mixtos microalgas-bacterias

Un caso diferente de tratamiento de aguas residuales empleando microalgas, es cuando éstas se emplean combinadas con bacterias, para la eliminación de materia orgánica, P y N simultáneamente o en etapas. Den Hende *et al.* (2014) estudiaron el tratamiento

de aguas residuales con flocs de microalgas y bacterias en reactores secuenciales por lote. Con este sistema trataron aguas residuales provenientes de la acuicultura, el procesamiento de alimentos, como tratamiento de estiércol y aun de la industria química. A pesar de las grandes diferencias entre la calidad de las aguas residuales de tales industrias, su sistema fue capaz de remover carbón, con velocidades de hasta 65, 30, 256 y 157 mg TOC/L día para las aguas provenientes de la acuicultura, tratamiento de estiércol, industria alimenticia e industria química (TOC se refiere al carbón orgánico total presente). En cuanto a las remociones de nitrógeno, las velocidades para las mismas aguas residuales fueron de 9.8, 4.5, 29.1 y 18.1 mg NT/L día, respectivamente. Finalmente, para las remociones de fósforo para los mismos efluentes, se alcanzaron velocidades de hasta 1.56, 0.11, 2.74 y 0.31 mg PT/L día.

Otro aspecto que debe considerarse es la necesidad de pretratar los influentes. Es claro que no siempre se desea eliminar sustancias carbonadas, por lo que las aguas residuales deberían ser sometidas a tratamiento primario y secundario. Por otro lado, como lo mencionan Mehmood *et al.* (2014), una gran cantidad de bacterias pueden estar presentes en las aguas residuales y pueden impedir el crecimiento de las microalgas. Las opciones para la desinfección de tales bacterias serían básicamente la esterilización por UV, u otras oxidaciones avanzadas. Obviamente para aplicar cualquiera de estas técnicas, debe reducirse la cantidad de materia carbonada disuelta y los sólidos presentes.

Productos del cultivo de microalgas en aguas residuales

La lista de productos obtenidos a partir del cultivo de microalgas es muy extensa. Incluye la biomasa misma como alimento humano o animal, componentes específicos, tales como proteínas, carbohidratos lípidos, pigmentos, etcétera.

La producción de lípidos (específicamente triacilglicéridos) se ha estudiado extensivamente, ya que se busca la manera de producir un biocombustible seguro y barato. Muchas microalgas pertenecientes a distintos grupos como las cianobacterias, cianofitas, heterocontofitas, euglenfitas rodofitas y dianofitas, producen cantidades interesantes de triacilglicéridos (entre 2 y 39%). Las microalgas en las que se reportan mayores concentraciones de triacilglicéridos son *Auxenochlorella protoecoides* (39.3%), *Gymnodinium sp* (29.6%) y *Chlorella vulgaris* (26%) (D'Alessandro y Fihlo, 2016).

Los lípidos que producen las microalgas se dividen en polares y no polares. Los polares (fosfolípidos y glicolípidos, constituyentes de la membrana celular) y

los neutros (constituidos por los di, tri y monoglicéridos y los ácidos grasos libres). Los más interesantes para la producción de biodiésel son los triglicéridos. Los ácidos grasos son cadenas largas de entre 4 y 36 carbonos. Pueden no estar saturados SFA, mono-insaturados MUFAs, di-insaturados DUFAs y en general, poli-insaturados PUFAS.

Los lípidos más costosos de esta gran lista son los tri-insaturados, específicamente los llamados $\alpha 3$ y $\alpha 6$, que indican la distancia entre la doble ligadura y el carbón amino terminal en el lípido. Entre éstos se encuentran el ácido α -linoléico, γ -linoléico y sus derivados. Algunos MUFAs de interés son el ácido miristoleico, palmitoleico, petroslenico, oleico, vacenico y gadoleico, entre otros. Los SFA se encuentran siempre presentes en los lípidos generados por las microalgas, al igual que en las oleaginosas. Entre ellos están los ácidos tutírico, capríónico, láurico, mirístico, palmítico y esteárico, entre otros.

En la revisión de Mahmood (2014) se presentan algunos de los productos más importantes. Todos éstos son producidos en laboratorios de universidades; como se mostró en el Cuadro 1, en la mayor parte de los trabajos que se citan se refieren a la producción de biomasa y lípidos, poco se ha reportado aún sobre proteínas, pigmentos y otros productos de alto valor.

En el Cuadro 2 se presentan más productos generados a partir del cultivo de microalgas. No se especifican los sistemas de producción ni las cepas empleadas, pero sí los costos de los productos y los mercados mundiales. Es impresionante la comparación entre algunos productos tradicionales como la mezcla de lípidos para biodiésel (con un costo aproximado de 6.6×10^{-04} USA\$/kg) con el costo de las ficobiliproteínas (en un rango de $3.25-17 \times 10^3$ USA\$/Kg).

Otro aspecto que debemos resaltar es el tamaño de los mercados para los productos que se enlistan. Por ejemplo, el mercado para la biomasa para uso humano es el mayor de todos los productos enlistados. A pesar de que el precio de la biomasa rodea los 50 USA\$/kg, el mercado mundial está en el rango de 1 250/3 800 millones de dólares.

Otros mercados interesantes son el de los ácidos poli-insaturados ($1\ 530 \times 10^6$ USA\$) y el mercado de alimentos para acuicultura (600×10^6 USA\$). Finalmente, los pigmentos (incluido el β -caroteno y las astaxantinas) tienen mercados de 10 a 275×10^6 USA\$. Como en muchos casos de la biotecnología existen productos con amplísimos mercados a pesar de que los costos del producto sean bajos (biomasa, lípidos, etcétera) y otros mercados muy grandes para montos más moderados de productos de alto valor agregado.

Cuadro 2. Productos, costos y mercados

PRODUCTO	COSTO	MERCADO
	USAS\$/kg	106 USAS\$/año
Astaxantina	882.0	-
Ficobiliproteínas	130/15 000	-
Clorofila	1×10^{-02} - 1×10^{-01}	-
Proteína de alta calidad	6.6×10^{-03}	-
Ácidos grasos poli-insaturados	2.64×10^{-03}	-
Carbohidratos para generar energía	1.32×10^{-03}	-
Proteína cruda	9.9×10^{-04}	-
Lípidos para generar energía	6.6×10^{-04}	-
Biomasa para humanos	50	1 250/3 800
Alimento para acuicultura	160	700
β-Caroteno	300/ 3 000	280
Astaxantina	2 500/10 000	150/200
Ácidos grasos poli-insaturados	60	1 530
ficobiliproteínas	3 250/17,000	12/50
Metabolitos radio-marcados	60 000/38 × 1006	5/13
β-Caroteno	-	275
Luteína	-	240
Astaxantina	-	235
Capaxantina	-	145
Anatto	-	145
Cantaxantina	-	95
Licopeno	-	75
β-apo-6-carotenal	-	25
Zeaxantina	-	20
β-apo-8-carotenal-éster	-	10

Fuente: elaboración con base en Li *et al.* (2011), González-Delgado *et al.* (2013), Hannon *et al.* (2010), Borowitzka *et al.* (2013).

También debemos considerar aquí la biomasa gastada, una vez que se han extraído los lípidos, pigmentos o proteínas, y su uso como sustrato para la producción de bioenergías.

Maurya *et al.* (2014) hicieron una excelente revisión al respecto, enumerando los procesos y productos en este campo de los bioenergéticos, así como de otros productos. El Cuadro 3 recupera algunos de esos procesos y productos.

Cuadro 3. Procesos y productos para las microalgas desgrasadas

PROCESO	PRODUCTO	EJEMPLOS DE MICROALGAS EMPLEADAS
Procesos biológicos		
Digestión anaerobia con o sin pre-tratamiento	Biometano	<i>Chlorella</i> , <i>Scenedesmus</i> , <i>Nannochloropsis salina</i> , <i>Nanofrustulum sp.</i> , <i>Auxenchlorella proptotecoides</i> , <i>butyrococcus brauni</i> , etcétera.
Digestión anaerobia con o sin pre-tratamiento	Biohidrógeno	<i>Scenedesmus sp.</i> , consorcio.
Fermentación previa hidrólisis de la microalga	Bioetanol, ácido láctico, maltodextrinas, etcétera.	<i>Pseudochoricystis ellipsoidea</i> , <i>Dunandiella tertiolecta</i> , <i>Nannochloropsis salina</i> , <i>Chlorella vulgaris</i>
Conversión termoquímica		
Licuefacción hidrotérmica	Biocombustibles	<i>Scenedesmus sp.</i> , <i>Nannochloropsis oceanica</i> ,
Pirólisis	Biocombustibles	<i>Nannochloropsis sp.</i> , <i>Spirulina sp.</i> , <i>Chlamydomonas sp.</i> , <i>Chlorella vulgaris</i> , <i>S obliquous</i> , <i>Dunandiella tertiolecta</i> , <i>tribonema minus</i>
Gasificación	Biocombustibles	<i>Botyrococcus brauni</i>
Otras transformaciones menores		
Activación o ninguno	Biosorbentes	<i>Nannochloris oculata</i> , <i>Pseudochorysistis ellipsoidea</i> , <i>Microspora sp.</i> , <i>Chlorella sp.</i>
Hidrólisis parciales o ninguno	Fertilizantes	<i>Nannochloropsis salina</i> , <i>Chlorella variabilis</i> , <i>Lyngbya majuscula</i>
Hidrólisis parciales o ninguno	Suplemento alimenticio	<i>Haematococcus pluvialis</i> , <i>Navicula sp.</i> , <i>Staurisira sp.</i> , <i>Nannochloropsis salina</i>

Fuente: adaptada de Maurya *et al.* (2016).

Extracción de los productos de alto valor agregado

Sin duda, además de la producción de la biomasa algal y de los productos de interés (pigmentos, lípidos, proteínas, ficobiliproteínas, etcétera), es importante tomar en cuenta los sistemas a escala industrial que se requerirían para extraer los productos con la más alta eficiencia y el más bajo costo. Como en el caso de muchos productos biotecnológicos, la etapa de recuperación de productos podría representar un alto porcentaje del costo total de producción. Muchos trabajos se abocan al desarrollo de tecnologías ya conocidas o a proponer nuevas técnicas para lograr extraer los componentes de interés a un bajo costo y con la aplicación de la menor cantidad de energía posible. Cuellar-Bermudez *et al.* (2014) publicaron una interesante revisión de los métodos de extracción y purificación de metabolitos de alto valor agregado a partir de microalgas (enfocada principalmente a lípidos esenciales, astaxantinas y

ficobiliproteínas). Los trabajos de Parniakov *et al.* (2015) en cuanto al empleo de pulsos de campos eléctricos para la extracción de compuestos valiosos de *Nannochloropsis spp.* usando mezclas de solventes orgánicos y agua son muy novedosos. Finalmente, Grimi *et al.* (2014) reportaron una comparación de métodos de extracción selectiva de compuestos contenidos en *Nannochloropsis sp.* usando diferentes técnicas de ruptura celular, tales como campos de pulsos eléctricos, descargas eléctricas de alto voltaje, ultrasonificación y homogenización de alta presión. Dichos autores concluyeron que todos los métodos son efectivos, pero tienen costos energéticos y eficiencias diferentes. La eficiencia de los sistemas se debe definir de acuerdo con el producto de interés (proteínas, azúcares, lípidos, pigmentos, etcétera).

La biomasa residual como fuente de energía

Una vez que se han extraído básicamente los lípidos de las microalgas (aunque también podría aplicarse a la extracción de proteínas, pigmentos, etcétera), los residuos de dichas microalgas contienen una cantidad de energía residual que puede extraerse por medio de diferentes métodos. Uno de éstos es la digestión anaerobia. Este procedimiento incrementa el rendimiento energético de las microalgas y la sustentabilidad del proceso global. Otros procesos aplicables son la hidrolícuofacción térmica HLT (Leow *et al.*, 2015), la pirolisis y la gasificación. Muchos autores reportan al respecto. En particular Torres *et al.* (2015) estudiaron dos microalgas, *Botryococcus brauni* y *Nannochloropsis gaditana*. Éstas fueron convertidas en 407 y 450 mL CH₄/g VS respectivamente, mismos que correspondieron a 56 y 61% de la energía total de cada microalga. Es importante conocer el valor calorífico de cada microalga (crecida bajo condiciones específicas de N, P, temperatura, pH, etcétera). El Cuadro 4 muestra algunos datos del valor calorífico para *Botryococcus brauni* y *Nannochloropsis gaditana*, pero también para otras cepas reportadas en Torres *et al.* (2015). Es interesante que *Botryococcus brauni* y *Nannochloropsis gaditana* mostraron altos valores caloríficos si se comparan con *Haematococcus*, *Chlorella*, *Nannochloropsis* y *Scenedesmus*, antes de la extracción de los lípidos.

Algunas experiencias de nuestro grupo de trabajo

En el grupo de Fotobioreactores verticales del UPIBI-IPN tenemos algunos años trabajando el cultivo de microalgas en autotrofia y heterotrofia. En cuanto al trabajo

Cuadro 4. Valor calorífico de algunas microalgas antes y después de la extracción de lípidos

MICROALGA	VALOR CALORÍFICO		
	ANTES	DESPUÉS	UNIDADES
<i>Botryococcus brauni</i>	28.5	19.5	MJ/Kg VS
<i>Nannochloropsis gaditana</i>	28.8	21.6	MJ/Kg VS
<i>Chlorella vulgaris</i>	18-24	NR	MJ/Kg TS
<i>Scenedesmus obliquous</i>	20.2	NR	MJ/Kg TS
<i>Scenedesmus sp</i>	22.5-23.3	NR	MJ/Kg TS
<i>Haematococcus pluvialis</i>	25.8	NR	MJ/Kg TS

NR: no reportado.

Fuente: adaptado de Torres *et al.* (2015)

en autotrofia, hemos empleado a *Chlorella sp.*, además de un consorcio formado por *Chlorella*, *Desmodesmus* y otras microalgas y protozoarios para cultivar biomasa, lípidos y pigmentos, empleando aguas residuales municipales provenientes de la Planta de San Juan Ixhuatepec, Estado de México. Estas aguas fueron tratadas empleando un tren que comprende la sedimentación primaria, reactor biológico (lodos activados) y sedimentación secundaria. Básicamente se han disminuido las concentraciones de sólidos y de materia carbonada disuelta, pero aún persisten sustancias nitrogenadas y relacionadas al fósforo. Las características generales de dichas aguas se muestran en el Cuadro 5 (Flores-Guerrero, 2016):

Cuadro 5. Composición de las aguas residuales tratadas, de la planta San Juan Ixhuatepec, Estado de México

PARÁMETRO	AGUA RESIDUAL TRATADA
pH	7.84
Conductividad (ms)	205
DQO (mg/L)	68
Sólidos Totales (mg/L)	19.5
PO ₄ ⁻ (mg/L)	6.3
NTK (mg/L)	18.6

Fuente: elaboración propia.

Adicionalmente trabajamos con diluciones de orina, ya que el uso de los baños secos permite utilizar estos efluentes, que contienen importantes cantidades de

P y N. Por ejemplo, una caracterización de orina obtenida por muestreo en nuestra escuela se muestra a continuación (Flores-Guerrero, 2016):

Cuadro 6. Composición de las corrientes de orina proveniente de los baños secos del plantel de UPIBI-IPN, México

PARÁMETRO	VALOR (MG/L)	PARÁMETRO	VALOR (MG/L)
N Total	1 110.8	N/P	6.48
Nitratos	0.065	Na	2.31
Nitritos	0.147	K	1.64
N ^{-NH4}	492.25	Ca	26.9
N _{Kjeldal}	618.32	Mg	1.70
P _{tot}	172.52	Zn	0.0442

Fuente: elaboración propia.

Como resultado del crecimiento de *Chlorella* en aguas residuales, se encontró que en la dilución 1/150 se observó la mayor producción de biomasa. Adicionalmente, también a esa dilución se observó la mejor producción de lípidos (186.8 mg/L). En cuanto al consumo de N y P, se demostró que la dilución 1/200 fue la más adecuada, pues removió 90% del nitrógeno inicial. En cuanto al P, se observa que a la dilución de 1/100 se removió el 61.8% del P inicial.

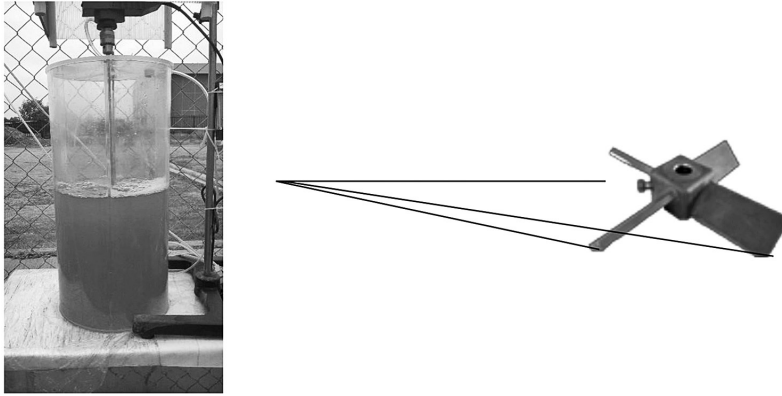
Cuadro 7. Crecimiento de *Chlorella* en diluciones de orina. Efecto de la dilución

DILUCIÓN	X _{MAX} (G/L)	μ _{MAX} (DÍAS ⁻¹)	P _X (G/L DÍA)	L (MG/L)	PL (MG/L DÍA)	REMOCIÓN DE NITRÓGENO (%)	REMOCIÓN DE FÓSFORO PO ³⁺ 4 (%)
1/50	0.874	0.154	0.058	171.33	11.42	48.07	43.90
1/100	1.313	0.138	0.087	176.66	11.78	51.19	61.83
1/150	1.314	0.141	0.087	186.83	11.89	42.44	61.72
1/200	1.179	0.112	0.078	178.33	12.06	90.00	50.20

Fuente: elaboración propia.

Después de esas experiencias a nivel matraz, se trataron aguas residuales de la Planta de San Juan Ixhuatepec en un reactor agitado de 20L, trabajando al exterior (temperatura e irradiancia variables). Se utilizó un reactor con capacidad de 20 litros, se mantuvo un flujo de aire de 1 vvm, con un agitador de paletas inclinadas A200 y una agitación de 200 rpm. En la Figura 2 se muestra el reactor empleado, así como el impulsor A200.

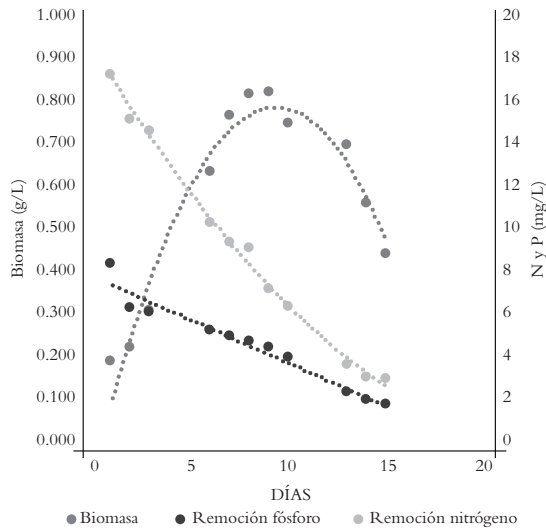
Figura 2. Reactor de 20 litros con agitador de paletas inclinadas A200



Fuente: elaboración propia.

En la Figura 3 se muestra la cinética del cultivo, donde se aprecia que se alcanzó una biomasa de hasta 0.818 g/L creciendo las microalgas en aguas residuales.

Figura 3. Cinética de crecimiento de *Chlorella* en el reactor de 20 l



Las remociones de N y P fueron aceptables (82 y 77%, respectivamente). La máxima biomasa fue de 0.44 g/L, y la producción de lípidos fue de 306 mg/L. El resumen del proceso se muestra en el Cuadro 8.

Fuente: elaboración propia.

Cuadro 8. Resumen de resultados reactor de 20 L

(G/L)	X _{MAX}	Px(G/L) DÍA	(MG/L)	(MG/L)	REM, N (%)	REM PO ₄ ³⁻ (%)	MÁX (D ⁻¹)	N	PO ₄ (D ⁻¹)
	0.818	0.054	296.660	19.778	82%	77%	0.197	0.187	0.272

X_{max}: biomasa máxima; Px: productividad biomásica; L: Lípidos finales; PL: productividad lipídica.

Fuente: elaboración propia.

Recientemente trabajamos con aguas residuales y aun con soluciones de orina, para la producción de *Spirulina*. La cianobacteria *Spirulina* se produce masivamente desde hace muchas decenas de años y se emplea como complemento alimenticio, alimento para acuacultura y para extracción de pigmentos. Se publicó en un congreso en Estados Unidos (Torres *et al.*, 2017a), que es factible cultivar *Spirulina* en un medio salino que llamaremos Enerviva, compuesto de varias sales, bicarbonato de sodio y NaCl, pero se pueden alcanzar eficiencias similares si crecemos la misma cianobacteria en una solución de agua de mar, orina y bicarbonato de sodio (medio orina) o un medio que contiene sólo agua de mar nutrientes y bicarbonato (medio nutrientes). Las pruebas se hicieron por triplicado a nivel de matraces bafleados (Figura 4).

Figura 4. Crecimiento de *spirulina* en matraces sobre tres diferentes medios

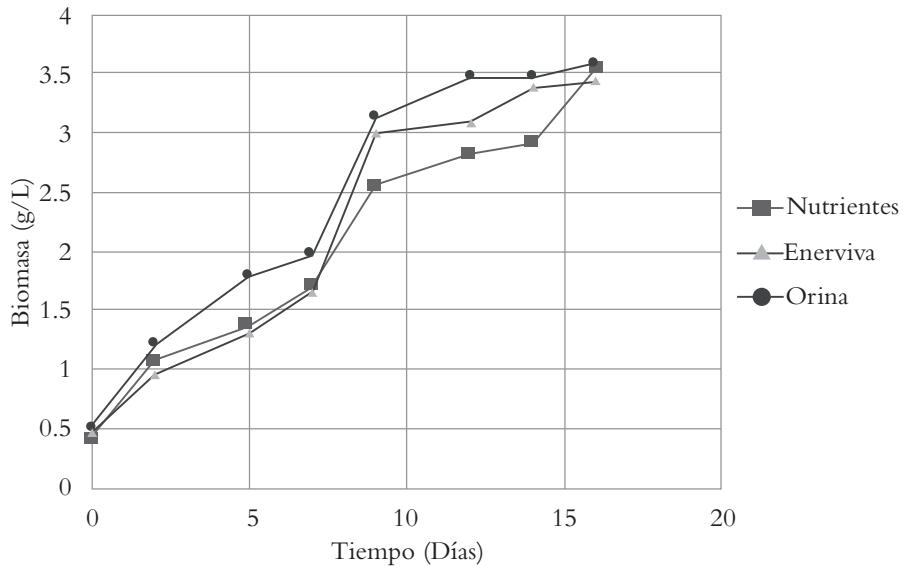


Fuente: elaboración propia.

En la Figura 5 se muestran las cinéticas de crecimiento de *Spirulina*. Aunque al final del proceso los tres medios lograron una concentración similar de la cianobacteria, en el medio con orina *Spirulina* creció más rápido, seguido del medio Enerviva y al final el medio nutriente.

Las aguas residuales que se emplearon en este trabajo fueron previamente tratadas en la planta de San Juan Ixhuatepec y tienen características similares a las reportadas en el Cuadro 5. En cuanto a las características de los productos generados, se puede decir las siguiente: se midieron los valores de clorofila a y b como modelo de pigmentos en *Spirulina*. Se sabe que además de estas clorofilas, *Spirulina* produce también b-caroteno, feofitina, diadinocromo y otros.

Figura 5. Crecimiento de biomasa en los tres medios



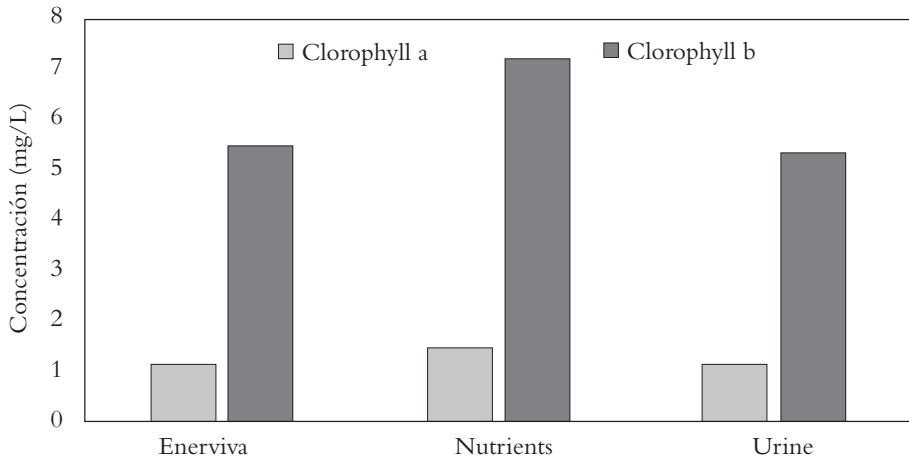
Fuente: elaboración propia.

En la Figura 6 se muestra una comparativa de la producción de clorofilas por *Spirulina* en los tres medios antes descritos.

Es interesante que en el medio nutrientes fue en el que se produjo más clorofila a y b, seguido del medio Enerviva y al final el medio de orina, Siempre se observó una mayor producción de clorofila b.

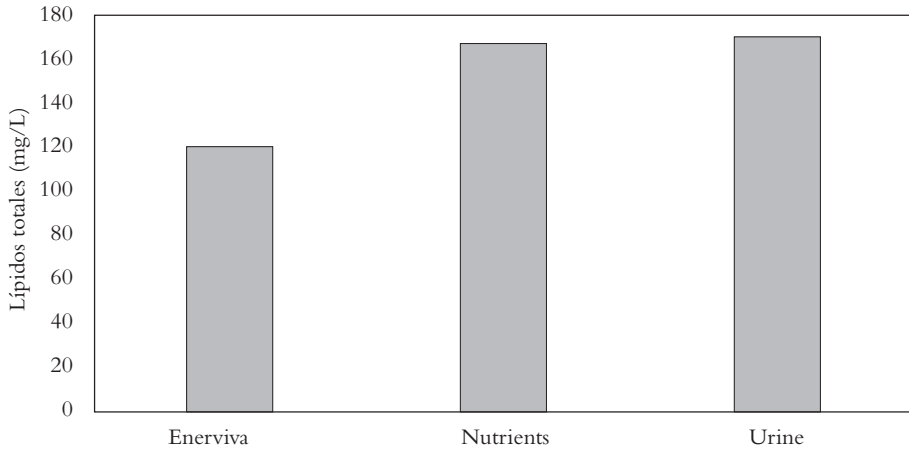
Finalmente, la Figura 7 muestra las concentraciones de lípidos obtenidas en el crecimiento de *Spirulina* en los tres medios.

Figura 6. Producción de *spirulina* en los tres medios



Fuente: elaboración propia.

Figura 7. Producción de lípidos en los tres medios



Fuente: elaboración propia.

Como se puede observar en la Figura 7, la producción de lípidos en el medio nutrientes y en el medio orina fueron muy semejantes (más de 160 mg/L), mientras que en el medio Enerviva se obtuvieron poco más de 120 mg/L.

Por otro lado, medimos el poder calorífico superior de microalgas como *Chlorella* y *Spirulina*, antes y después de extraer pigmentos, lípidos o proteínas (Torres *et al.* 2017b), aunque algunos de estos productos fueron cultivados en aguas residuales y otros en medios salinos definidos.

El Cuadro 9 muestra un resumen de varias mediciones del PCS para productos de *Chlorella* y *Spirulina* y procesos. En el caso de las primeras, es notable que las diferencias entre los productos iniciales y los productos extraídos van del 0.59 al 10.1% (4.7% en promedio). En el caso de *Spirulina* reactor 1, hay un aumento del 9.2%, y probablemente se deba a que al extraer con una solución acuosa, se hallan arrastrado sales que estaban presentes en la muestra. Para el caso de las extracciones con acetona, las dos muestras analizadas mostraron una pérdida del alrededor de 3.4% en promedio.

Cuadro 9. Cambios en la PCS después de extracción de metabolitos de interés

	PCS INICIAL (MJ/KG)	PCS FINAL (MJ/KG)	PERDIDA DE PCS (%)
<i>Spirulina</i> mezcla	16.21	15.40 ^a	5.00
<i>Spirulina</i> reactor 1	18.94	20.68 ^a	-9.22
<i>Spirulina</i> reactor 2	24.60	22.10 ^a	10.17
<i>Spirulina</i> reactor 3	19.32	18.67 ^a	3.38
<i>Spirulina</i> comercial	20.90	20.78 ^a	0.59
<i>Spirulina</i> comercial	20.90	20.16 ^b	3.56
<i>Chlorella</i> comercial	20.59	19.92 ^b	3.24

a Extracción de ficobiliproteínas i.e., aloficocianina, ficocianina y ficoeritrina.

b Extracción de lípidos.

Fuente; elaboración propia.

Conclusiones

El cultivo de microalgas en aguas residuales municipales e industriales es una forma sustentable de reducir las cargas de C, N y P que se disponen al medio ambiente, y que adicionalmente entrega productos de mediano a alto valor agregado, tales como 1) biomasa (que se puede emplear como alimento animal o para producción de fertilizantes); 2) lípidos (como mezcla de PUFAs pueden ser convertidos en biodiésel, individualmente pueden tener aplicaciones en alimentos y farmacia); 3) pigmentos (desde clorofilas hasta ficobiliproteínas de altísimo valor agregado, pasando por carotenos y otros pigmentos de interés industrial), y 4) energía que puede obtenerse a partir de la hidrólisis de las microalgas (para producción de etanol) o bien

a partir de la licuefacción térmica de la microalga o por la digestión anaerobia de éstas para producir metano).

Quizá el uso de microalgas para el tratamiento de aguas residuales industriales se ha reportado en menor medida, pero tiene un gran potencial, ya que se obtienen mayores concentraciones de biomasa (3-10 veces más que en autotrofia), buenas concentraciones de lípidos y pigmentos, altas remociones de DQO, nitrógeno y fósforo en sus diferentes formas y es un proceso que no precisa de luz, por lo que se puede llevar a cabo en reactores cerrados convencionales.

México es un país con un gran potencial en cuanto a los residuos de origen vegetal (esquilmos agrícolas, pasos, etcétera), pero también en cuanto a los grandes volúmenes de aguas residuales municipales e industriales que no se tratan por otros métodos. Una de las muchas razones por las que no se tratan esas corrientes, es la falta de medios económicos para instalar y operar las plantas de tratamiento. La promesa de obtener biomasa, lípidos, pigmentos y energía a partir del tratamiento de dichas aguas podría incentivar a los particulares a instalar ese tipo de plantas de tratamiento.

Hace falta mucho desarrollo en estos temas en México, pero hay diversos grupos en las diferentes universidades y centros de investigación, estudiando las bases de los procesos para escalarlos a nivel real. Hace falta poner en contacto a la academia con los industriales y los representantes gubernamentales para plantear estrategias y leyes que favorezcan dichos desarrollos. Cada estado de la República podría contar con una o varias refinerías basadas en el uso de las aguas residuales y/municipales, contribuyendo así a la instauración de una economía circular en México.

Bibliografía

- Abou-Shanab, R.A.I., M.M. El-Daltony, E.D. Mostafa, M.M. El-Sheekh, E.S. Salama, A.N. Kabra y B.H. Jeon (2014). "Cultivation of a new microalgae, *Micractinium reisseri*, in municipal wastewater for nutrient removal, biomass, lipid, and fatty acid production", *Biotechnology and Bioprocess Engineering*, núm. 19, pp. 510-518.
- An, J.Y., S.J. Sim, J.S. Lee y B.W. Min (2003). "Hydrocarbon production from secondarily treated piggery wastewater by green algae *Botryococcus braunii*" *Journal of Applied Phycology*, núm. 15, pp. 185-191.
- Arbib, Z., J. Ruiz, P. Álvarez-Díaz, C. Garrido-Pérez y J.A. Perales (2014). "Capability of different microalgae species for phytoremediation process: Wastewater tertiary treatment, CO₂ fixation a low-cost biofuels production", *Water Research*, vol. 49, pp. 465-474.

- Arbib, Z., J. Ruiz, P. Álvarez-Díaz, C. Carrido-Pérez, J. Barragán y J.A. Perales (2013). “Effect of pH control by means of flue gas addition on three different photo-bioreactors treating wastewaters in long-term operation”, *Ecological Engineering*, núm. 57, pp. 226-235.
- Bhatnagar, A., M. Bhatnagar, S. Chinnasamy y K. Dass (2010). “*Chlorella minutissima*- a promising fuel algae for cultivation in municipal wastewaters”, *Applied Biochemistry and Biotechnology*, núm. 161, pp. 523-536.
- Borowitzka, M. (2013). “High-value products from microalgae-their development and commercialization”, *Journal of Applied Phycology* [Doi 10.007/s10811-013-9983-9].
- Chao, S., T.T. Luong, D. Lee, Y.K. Oh y T. Lee (2011). “Reuse of effluent water from municipal wastewater treatment plant in microalgae cultivation for biofuel production”, *Bioresource Technology*, 102(18), pp. 8639-8645.
- Chinnasamy, S., A. Bhatnagar, R. Claxton y K. Das (2010). “Biomass and bioenergy production potential of microalgae consortium in open and closed bioreactors using untreated carpet industry effluent as growth medium”, *Bioresource Technology*, 101(17), pp. 6751-6760.
- Cho, S., T.T. Luong, D. Lee, Y.K. Oh y T. Lee (2011). “Reuse of effluent water from a municipal wastewater treatment plant in microalgae cultivation for biofuel production”, *Bioresource Technology*, 102(18), pp. 39-45.
- Coppens, J., B. Decostere, S. Van Hulle, I. Nopens, S.E. Vlaeminck, L. De Gelder y N. Boom (2014). “Kinetic exploration of nitrate-accumulating microalgae for nutrient recovery”, *Applied Microbiology and Biotechnology* [Doi 10.1007/s00253.014-5854-9].
- Craggs, R., D. Sutherland, H. Campbell (2012). “Hectare-scale demonstration of high rate algal ponds for enhanced wastewater treatment and biodiesel production”, *Journal of Applied Phycology*, 24(3), pp. 327-337.
- Cuellar-Bermudez, S., I. Aguilar-Hernández, D.L. Cárdenas-Chávez, N. Ornelas-Soto, M.A. Romero-Ogawa y R. Parra-Saldivar (2014). “Extraction and purification of high-value metabolites from microalgae: essential lipids, astaxantin and phycobiliproteins”, *Microbial Technology*, núm. 8, pp. 190-209.
- D’Alessandro, E.B. y N.R.A. Filho (2016). “Concepts and studies on lipid and pigments of microalgae: A review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, núm. 58, pp. 832-841.
- Darlymple, O.K., T. Alhade, I. Udom, B. Giles, J. Wolan, Q. Zhang y S. Ergas (2013). “Wastewater use in algae production for generation of renewable resources: a review and preliminary results”, *Aquatic Biosystems*, 9:2.
- Den Hende, S., E. Carre, E. Cocaud, V. Beelen, N. Boon y H. Vervaeren (2014). “Treatment of industrial wastewaters by microalgal bacterial flocs in sequencing batch bioreactors”, *Bioresource Technology*, núm. 16, pp. 245-254.
- Domínguez, I.T., Z. Arbib, F.A. Chinalia, C. Oliveria, J.A. Perales, P.F. Almeida, J.I. Druzian y I.A. Nascimento (2013). “From waste to energy: microalgae production in wastewater and glycerol”, *Applied Energy*, núm. 109, pp. 283-290.

- Domínguez, I.T., J. Ruiz, Z. Arbib, F.B. Chinalia, C. Carrido-Pérez, F. Rogalla, I.A. Nascimento y J.A. Perales (2013). “Comparing the use of different domestic wastewaters for coupling microalgal production and nutrient removal”, *Bioresource Technology*, núm. 131, pp. 429–436.
- Grimi, N., A. Dubois, L. Marchal, S. Jubeau, N.I. Lebovka y E. Vorobiev (2014). “Selective extraction from microalgae *Nannochloropsis sp.* Using different methods of cell disruption”, *Bioresource Technology*, núm. 153, pp. 254–259.
- Fei, Q., R. Fu, L. Shang, C.J. Brighman y H.N. Chang (2014). “Lipid production by microalgae *Chlorella protothecoides* with volatile fatty acids (VFA) as carbon sources in the heterotrophic cultivation and its economic assessment”, *Bioprocess and Biosystems Engineering* [Doi 10.1007/s00449-014-1308-0].
- González-Delgado, A.D., A.F. Barajas-Solano y V. Kafarov (2013). “Obtaining high value products in a biorefinery topology using microalgae” *CT&F Ciencia, Tecnología y Futuro*, 5(3), pp. 95–106.
- Hannon, M., J. Gimpel, M. Tran, B. Rasala y S. Mayfield (2010). “Biofuels from algae: challenges and potential”, *Biofuels*, 1(5), pp. 763–784.
- Li, J., D. Zhu, J. Niu, S. Shen y G. Wang (2011). “An economic assessment of astaxanthin production by large scale cultivation of *Haematococcus pluvialis*”, *Biotechnology Advances*, núm. 29, pp. 568–574.
- Márquez, S.S.I., I.A. Nascimento, P.F. de Almeida y F.A. Chinalia (2013). “Growth of *Chlorella vulgaris* on sugar cane vinasse: the effect of anaerobic digestion pretreatment”, *Applied Biochemistry and Biotechnology*, núm. 171, pp. 1933–1943.
- Maurya, R., Ch. Paliwal, T. Ghosh, I. Pancha, K. Choskshi, M. Mitra, A. Ghosh y S. Mishra (2016). “Applications of de-oiled microalgal biomass towards development of sustainable biorefinery”, *Bioresource Technology*, núm. 214, pp. 787–796.
- Mehmood, M.A., U. Rashid, M. Ibrahim, F. Abbas, Y.H. Taufiq-Yap (2014). “Algal biomass production using wastewater”, en Hakeem, K.R. (ed.), *Biomass and Bioenergy: Processing and Properties*, Ginebra: Springer International.
- Michels, M.H.A., P.M. Slegers, M.H. Vermue y R.H. Wijffels (2014). “Effect of biomass concentration on the productivity of *Tetraselmis suecica* in a pilot-scale tubular photobioreactor using natural sunlight”, *Algal Research*, núm. 4, pp. 12–18.
- Mostafa, S.S.M., E.A. Shalaby y G.I. Mahmoud (2012). “Cultivating microalgae in domestic wastewater for biodiesel production”, *Naturale Scientia Biologica*, 4(1), pp. 56–65.
- Posten, C. (2012). “Introduction-Discovering microalgae as source for sustainable biomass”, Chapter 1, en C. Posten y C. Walter (eds.), *Microalgal Biotechnology; Potential and Production*. Berlín: De Gruyter.
- Ruiz, J., P. Álvarez, Z. Arbib, C. Garrido, J. Barragán y J.A. Perales (2011). “Effect of nitrogen and phosphorus concentration on their removal kinetic in treated urban wastewater by *Chlorella vulgaris*”, *International Journal of Phycorremediation*, núm. 13, pp. 884–896.

- Ruiz, J., Z. Arbib, P.D. Álvarez-Díaz, C. Garrido-Pérez, J. Barragan y J.A. Perales (2012). “Photobiotreatment model (PhBT): a kinetic model for microalgae biomass growth and nutrient removal in wastewater”, *Environmental Technology*. iFirst, pp. 1-13.
- Ruiz, J., Z. Arbib, P. Álvarez-Díaz, C. Garrido-Pérez, J. Barragán, J.A. Perales (2014). “Influence of light presence and biomass concentration on nutrient kinetic removal from urban wastewater by *Scenedesmus obliquus*”, *Journal of Biotechnology*. In press.
- Ryu, B.G., E.J. Kim, J. Kim, Y.E. Choi, J.W. Yang (2014). “Simultaneous treatment of municipal wastewater and biodiesel production by cultivation of *Chlorella vulgaris* with indigenous wastewater bacteria”, *Biotechnology and Bioprocess Engineering*, núm. 19, pp. 201-210.
- Santiago, A.F., M.L. Calijuri, P.P. Assemany, C. Calihuri Mdo, A.J. dos Reis (2013). “Algal biomass production and wastewater treatment in high rate algal ponds receiving disinfected effluent”, *Environmental Technology*, 34(13-14), pp. 1877-1885.
- Sarabia, L. (2013). “Remoción de DQO de aguas residuales por microorganismos del grano verde de café en un reactor *airlift*”. Tesis de maestría en ciencias en biotecnología. Mexico: Cinvestav, Unidad Zacatenco.
- Torres, L.G. (2014). “Introduction”, en Luis G. Torres (ed.), *Microalgae and other phototrophic bacteria: culture, processing, recovery and new products*. Estados Unidos: Nova Science Publishers.
- Torres, L.G., J.C. Roldán, Y. López (2017a). “*Spirulina* production using three different media: biomass, pigments and lipids production”. Memorias del 7th International Conference on Algal Biomass, Biofuels and Bioproducts: Miami, Florida, 18-21 de junio de 2017.
- Torres, L.G., B. Campos, Y. López (2017b). “Poder calorífico superior de *Chlorella* y *Spirulina* antes y después de la extracción de pigmentos, proteínas y/o lípidos”. Memorias del Sexto Simposio Nacional de ingeniería química y bioquímica aplicada. Tlaxcla, Tlaxcala. Octubre de 2017.
- Xin, L., H. Hong-Yin, H. Jia (2009). “Lipid accumulation and nutrient removal properties of a newly isolated freshwater microalga, *Scenedesmus* sp.LX1, growing in secondary effluent”, *Nature Biotechnology*, 27(1), pp. 59-63.
- Yang, L., M. Min, Y. Li, P. Chen, Y. Chen, Y. Liu, Y. Wang, R. Ruan (2009). “Cultivation of green algae *Chlorella* sp. in different wastewaters from municipal wastewater treatment plant”, *Applied Biochemistry and Biotechnology* [Doi: 10-1007/s12010-009- 8666-7].

Pretratamientos de la biomasa para la producción de azúcares fermentables

*Eulogio Castro Galiano
Inmaculada Romero Pulido
Encarnación Ruiz Ramos*

Introducción

La utilización de recursos renovables para la producción de energía y compuestos químicos, que constituía hasta fechas recientes una opción de futuro, se ha convertido en una necesidad insoslayable sustentada en factores económicos, ambientales y sociales.

En primer lugar, la disminución progresiva de las fuentes de energía fósiles y la localización geográfica de las mismas origina situaciones de inestabilidad en los precios e incertidumbre en los suministros, así como una elevada dependencia energética de muchos países. Esta situación puede paliarse mediante el uso masivo de fuentes de energía renovables, entre las cuales la biomasa puede representar una opción ventajosa, caracterizada por su amplia distribución geográfica. Si además se considera el aprovechamiento de la biomasa de tipo residual, es decir, la constituida por los residuos de los cultivos o de su procesamiento, se puede añadir entonces una ventaja adicional de tipo medioambiental, al suponer una alternativa a los métodos convencionales de eliminación de estos residuos que, por su naturaleza, deben ser retirados de los campos de cultivo o de los centros de transformación. Indudablemente, la utilización de estos residuos como materia prima para procesos productivos representará también una oportunidad de desarrollo tecnológico y una fuente de empleo, particularmente en el medio rural, con los consiguientes beneficios socioeconómicos.

El aprovechamiento de la biomasa desde el punto de vista de la producción de compuestos de interés está basado, en gran medida, en la utilización de los hidratos de carbono que forman parte de todo tipo de biomasa. Los procesos de transformación

requieren, por lo general, disponer de los azúcares en su forma más sencilla, monomérica, por lo que será necesario romper las estructuras poliméricas de las que aquellos forman parte.

En las biomásas de tipo azucarado o amiláceas, como la caña de azúcar o los cereales, los azúcares se encuentran en forma de sacarosa o de almidón; la ruptura de los enlaces de esas estructuras y la liberación de las moléculas de glucosa (o de glucosa y fructosa) puede conseguirse de una forma relativamente sencilla, mediante enzimas, y poco costosa en términos energéticos (enlaces α 1-2 entre las moléculas de glucosa y fructosa o α (1-4) y α (1-6) entre las moléculas de glucosa en el almidón).

Sin embargo, en la biomasa de naturaleza lignocelulósica, la predominante en los residuos de plantas y cultivos agrícolas, los azúcares sencillos se encuentran en forma de celulosa (polímero de glucosa) y de hemicelulosas (polímeros de varios tipos de azúcares y otros compuestos). La ruptura de estos enlaces por medios enzimáticos requiere que el acceso de las enzimas sea posible y efectivo, reduciendo la barrera que representa el tercer componente fundamental de la biomasa lignocelulósica, la lignina, entre otros aspectos. Y para conseguir este objetivo es necesario efectuar un pretratamiento, mucho más costoso en términos energéticos y que puede también provocar la degradación de los componentes de la biomasa. En el caso de la celulosa, las moléculas de glucosa se encuentran unidas por enlaces β 1-4 glicosídicos, más difíciles de romper que los existentes en el caso del almidón, existiendo también puentes de hidrógeno intra e intermoleculares.

En este capítulo se realiza un resumen de los pretratamientos más frecuentes y se describen algunos casos significativos en los que se han aplicado a diferentes biomásas.

Características comunes de los pretratamientos de biomasa

El pretratamiento persigue alterar la estructura de la biomasa para eliminar lignina y hemicelulosa, reducir la cristalinidad de la celulosa y aumentar la porosidad del material para facilitar el acceso de los agentes hidrolíticos (Gong *et al.*, 1999; Esteghlalian *et al.*, 1997); además, debe cumplir con los siguientes requerimientos (Sun y Cheng, 2002):

- a) Mejorar la formación de azúcares o la posibilidad de obtenerlos en la hidrólisis enzimática posterior.

- b) Evitar la degradación o pérdida de azúcares.
- c) Evitar la formación de subproductos inhibidores de las etapas posteriores (hidrólisis y fermentación).
- d) Ser económicamente viable.

Teniendo en cuenta lo anterior, los pretratamientos suelen clasificarse atendiendo a la naturaleza del principal agente que actúa sobre la estructura celulósica, sea éste de naturaleza física, química o biológica.

Pretratamientos físicos

Son pretratamientos físicos aquellos que no involucran compuestos químicos (distintos del agua). Entre éstos pueden citarse los siguientes:

- Molienda o, en general, reducción de tamaño.
- Ultrasonidos.
- Microondas.
- Explosión con vapor.
- Autohidrólisis.

Frecuentemente se emplea alguno de estos pretratamientos como etapa previa o asociado a otro tipo de pretratamiento.

Molienda o reducción de tamaño

Aunque la molienda puede no considerarse propiamente un pretratamiento, puesto que en general siempre hay que reducir el tamaño de la biomasa para poder tratarla, en determinados casos la molienda puede constituir un pretratamiento al incrementar la accesibilidad de las enzimas a la matriz lignocelulósica. Por ejemplo, para la producción de etanol a partir de residuos de maíz, es preciso que éstos tengan un tamaño entre 0.5 y 3 mm (Miao *et al.*, 2011). El principal efecto de la reducción del tamaño parece residir en la disminución de la cristalinidad, produciendo un aumento en el rendimiento de hidrólisis enzimática (Sant'Ana *et al.*, 2010).

a) Pretratamiento por ultrasonidos

En general, puede considerarse que la aplicación de ultrasonidos constituye una fuente de energía adicional en el proceso de extracción, como pueden serlo la agitación o el calentamiento, resultando finalmente en unos rendimientos de extracción superiores a los de la extracción convencional. Cuando una biomasa se somete a pretratamiento por ultrasonidos, la pared celular se ve afectada por esta energía, de forma que se incrementa la extractabilidad de sus componentes en el medio líquido (García *et al.*, 2011).

Frecuentemente, el uso de ultrasonidos se asocia con otro tipo de pretratamiento, para reforzar su acción. Por ejemplo, en conjunción con la hidrólisis ácida diluida con ácido nítrico, se ha demostrado que el empleo de ultrasonidos es muy eficiente en la producción de furfural a partir de celulosa (Santos *et al.*, 2017). También se han ensayado los ultrasonidos como etapa previa al pretratamiento biológico de paja de trigo, resultando un incremento en los productos de degradación de la lignina y en la digestibilidad *in vitro* de ese material (Sabarez *et al.*, 2014). En el campo de la producción de azúcares fermentables a partir de caña de azúcar también se han encontrado resultados significativamente superiores cuando la hidrólisis enzimática de bagazo fue precedida de tratamiento por ultrasonidos, prácticamente duplicando el rendimiento en azúcares (Lunelli *et al.*, 2014).

La producción de etanol por sacarificación y fermentación simultáneas con maíz como materia prima es otro ejemplo en el que se utilizan ultrasonidos con el resultado de un incremento en la concentración de etanol obtenida de 11%. El mecanismo de actuación parece indicar que la cavitación provocada por los ultrasonidos incrementa la degradación de los gránulos de almidón, favoreciendo la liberación de glucosa (Nikolić *et al.*, 2010).

b) Pretratamiento por microondas

Las microondas corresponden a una forma de energía electromagnética ubicada en el entorno de los 2.45 GHz o los 900 MHz que es absorbida cuando un material es situado en el interior de un campo eléctrico alternante, lo que resulta en un rápido calentamiento. Debido a la rapidez de calentamiento, el pretratamiento con microondas representa una alternativa frente al calentamiento convencional o a otros métodos como los ultrasonidos (Kostas *et al.*, 2017).

El calentamiento por microondas es empleado frecuentemente, al igual que los ultrasonidos, en conjunción con prácticamente cualquier otro pretratamiento,

aportando la eficiencia y rapidez en el calentamiento, lo que posibilita además reducir el tiempo que el pretratamiento se efectúa a alta temperatura. Por ejemplo, Binod *et al.* (2012) estudiaron la utilización de microondas en conjunto con un pretratamiento ácido, alcalino o una combinación de ambos, obteniéndose resultados de hasta 90% de eliminación de lignina de bagazo de caña de azúcar.

c) Pretratamiento por explosión con vapor

El pretratamiento de explosión con vapor consiste en someter a la biomasa a la acción de vapor saturado, durante un determinado tiempo para después provocar una rápida reducción de la presión. Como consecuencia, la biomasa sufre alteraciones de origen físico (ya que la despresurización brusca origina unas fuerzas de cizalla que producen la separación de las fibras) y químico (debido al efecto hidrolítico de los grupos acetilo de las hemicelulosas, también llamado autohidrólisis).

El tratamiento resulta en la hidrólisis de la hemicelulosa, la ruptura de la estructura lignocelulósica y la depolimerización de la lignina con lo que la accesibilidad de la celulosa a la degradación enzimática se ve favorecida (Moniruzzaman, 1996; Heitz *et al.*, 1991). Las condiciones típicas en las que se realiza el pretratamiento oscilan entre 160 y 260 °C y entre unos segundos y varios minutos. Las variables que afectan al proceso son el tiempo de residencia, la temperatura, el tamaño de partícula y el contenido en humedad (Duff y Murray, 1996).

El pretratamiento por explosión con vapor en dos etapas parece ser también una buena alternativa para aumentar los rendimientos globales del proceso de conversión de madera en etanol (Nguyen *et al.*, 1999). En la primera de las etapas se persigue la solubilización de la hemicelulosa, mientras que, en la segunda, en condiciones más severas y utilizando impregnación ácida, se hidroliza una parte de la celulosa mientras que la restante queda más accesible a la acción de hidrólisis enzimática (Söderström *et al.*, 2003).

Para comparar distintas condiciones de pretratamiento, puede utilizarse un factor de severidad (Overend *et al.*, 1987) que se define como: $RO = t \cdot \exp[(T - 100)/14.75]$, donde t es el tiempo de proceso (minutos) y T la temperatura (°C). Para incluir el efecto del empleo de ácido, se utiliza el denominado factor de severidad combinada (Chum *et al.*, 1990): $CS = \log(RO) - \text{pH}$. Sin embargo, aunque estos parámetros pueden resultar útiles para analizar tendencias generales, no siempre predicen correctamente la acción del pretratamiento (Lloyd y Wyman, 2005). Por otra parte, no recogen otros factores que pueden influir en la severidad relativa del tratamiento como el tamaño de partícula o la humedad del material (Cullis *et al.*, 2004).

d) Pretratamiento por autohidrólisis

Este pretratamiento consiste en mantener el material lignocelulósico en contacto con agua caliente a presión, durante un determinado tiempo. Las condiciones de operación más habituales incluyen temperaturas alrededor de 200 °C durante varios minutos. Al igual que el pretratamiento por explosión con vapor, el agua caliente a presión presenta ciertas ventajas con respecto a la prehidrólisis ácida, pues no requiere inversión en adquisición de ácidos ni materiales especiales; tampoco es necesario una reducción específica del tamaño de partícula del residuo (Walsum *et al.*, 1996). Asimismo, la neutralización de los hidrolizados origina una menor cantidad de precipitado.

Durante la reacción de la biomasa lignocelulósica con el agua (proceso de autohidrólisis), se produce la hidrólisis de las hemicelulosas a partir de reacciones catalizadas por el ión hidronio. En las primeras etapas de reacción, los iones hidronio generados de la ionización del agua dan lugar a la depolimerización de las hemicelulosas y a la liberación de los grupos acetilo. En posteriores etapas, los iones hidrógeno generados de la autoionización del ácido acético actúan también como catalizadores, mejorando las cinéticas de reacción (Carvalho *et al.*, 2005). Nabarlatz *et al.* (2007), en la autohidrólisis a 179 °C durante 23 minutos de seis residuos agrícolas de diferente origen botánico, encontraron rendimientos en xilooligosacáridos (XOs) proporcionales al contenido en grupos acetilo en las materias primas.

Dependiendo de las condiciones de operación, los principales productos obtenidos por autohidrólisis de materiales lignocelulósicos son una mezcla de oligosacáridos, monosacáridos, ácido acético y productos de degradación de azúcares (ej., furfural, hidroximetilfurfural), que a su vez pueden dar lugar a posteriores reacciones de descomposición. Además, se liberan otros compuestos debido a la solubilización de la fracción de extractos y de la lignina ácido soluble, lo que hace de los líquidos resultantes un medio de compleja composición (Garrote *et al.*, 2003).

Comparado con el pretratamiento por explosión con vapor, el agua caliente a presión proporciona por lo general una mayor recuperación de azúcares hemicelulósicos en la fracción líquida y menores concentraciones de compuestos inhibidores de las etapas siguientes (Laser *et al.*, 2002). Además, el proceso resulta en una máxima solubilización de la hemicelulosa, quedando los azúcares disueltos en forma de oligosacáridos; al no producirse la hidrólisis total hasta los monómeros, la degradación de éstos hasta diferentes aldehídos se minimiza (Mosier *et al.*, 2005), lo que incide positivamente en la posterior fermentación.

Una variante de este pretratamiento consiste en hacer circular agua caliente a presión a través de un lecho del residuo lignocelulósico. Esta forma de operar permite acelerar la solubilización de hemicelulosa y lignina, alcanzándose mayores rendimientos en azúcares hemicelulósicos y una mayor digestibilidad de la fracción celulósica en comparación con la autohidrólisis tradicional. Utilizando esta técnica, se han obtenido recuperaciones superiores al 90% en azúcares hemicelulósicos a partir de bagazo de caña (Allen *et al.*, 1996). Los mejores resultados han sido obtenidos a altas velocidades de flujo de agua, lo que parece indicar que la transferencia de materia desempeña un papel importante en la hidrólisis de la hemicelulosa. Como contrapartida, el consumo tanto de agua como de energía aumenta considerablemente a elevados flujos de agua, aunque se estudian otras configuraciones para hacer circular el agua a través del lecho biomásico (Liu y Wyman, 2005).

Pretratamientos químicos

a) Ácidos

La hidrólisis con ácidos minerales está ampliamente reconocida como el pretratamiento más común para biomásas lignocelulósicas. Se puede aplicar a bajas temperaturas (40 °C, por ejemplo) y altas concentraciones de ácidos (30–70%) (Taherzadeh y Karimi, 2007) o bien, a altas temperaturas (140–200 °C) con ácidos diluidos (concentraciones inferiores al 4%) (Galbe y Zacchi, 2012). Esta segunda opción es la más común ya que el empleo de ácidos muy concentrados conlleva problemas de corrosión y, por tanto, requiere de materiales de construcción especiales encareciendo el proceso. Además, también por razones económicas, sería necesaria la recuperación del ácido empleado y esto implica un alto costo energético (Chiaramonti *et al.*, 2012).

El pretratamiento con ácido diluido consigue la solubilización de los azúcares hemicelulósicos a la vez que altera la estructura celulósica favoreciendo así el acceso de las enzimas a dicha estructura en la posterior etapa de hidrólisis. Aunque el efecto del ácido sobre la lignina no es relevante, algunos autores afirman que dicha fracción también puede verse alterada (Yang y Wyman, 2008). Los pretratamientos a bajo pH se caracterizan por conseguir altas recuperaciones de azúcares hemicelulósicos en la fase líquida y un sólido enriquecido en celulosa con alta digestibilidad enzimática.

El ácido más empleado es, sin duda, el ácido sulfúrico. Numerosos residuos agrícolas fueron pretratados con ácido sulfúrico diluido, como tallos de girasol (Ruiz *et al.*, 2013), paja de colza (Castro *et al.*, 2010) o biomasa de olivo (Romero *et al.*, 2010);

Martínez-Patiño *et al.*, 2017). No obstante, otros ácidos minerales como el H_3PO_4 han sido probados en el pretratamiento de eucalipto (Castro *et al.*, 2014), paja de colza (López-Linares *et al.*, 2013a) o el residuo de la poda de olivo (Martínez-Patiño *et al.*, 2015). Sin embargo, es cierto que el bajo coste del ácido sulfúrico lo hace especialmente interesante frente a un escalado industrial.

No obstante, a pesar de ser reconocidos como los pretratamientos con mayor proyección a escala industrial (Jönsson y Martin, 2016), los tratamientos con ácido diluido presentan ciertos inconvenientes que vale la pena destacar. Así, la aparición de reacciones de degradación de azúcares se considera su principal inconveniente, ya que supone pérdidas en la recuperación de azúcares y, a la vez, la formación de compuestos que resultan tóxicos para los microorganismos fermentativos (Chiaramonti *et al.*, 2012). Las altas temperaturas en medio ácido provocan la degradación de glucosa y xilosa a furfural e hidroximetilfurfural, respectivamente. Asimismo, reacciones de degradación de ambos furanos dan lugar a la formación de ácido fórmico. Además, otros compuestos típicos de los tratamientos a bajo pH son el ácido acético y compuestos fenólicos procedentes de la degradación de hemicelulosa y lignina, respectivamente (Jönsson *et al.*, 2013).

b) Hidrólisis alcalina

Mientras que los pretratamientos a bajo pH disuelven hemicelulosa y alteran la estructura celulósica, los pretratamientos a pH básico afectan fundamentalmente a la solubilización de la lignina (Yang y Wyman, 2008). El mecanismo de la hidrólisis alcalina está basado en la rotura de los enlaces éster (saponificación) entre la lignina y las cadenas de celulosa y hemicelulosa, y esto contribuye a un incremento en la porosidad de la biomasa (Gaspar *et al.*, 2007). Estos tratamientos consiguen una solubilización parcial de lignina, lo que favorece la hidrólisis enzimática ya que las enzimas se unen a la lignina mediante enlaces no productivos reduciendo el rendimiento del proceso hidrolítico (Kim *et al.*, 2016). En general, la influencia de los álcalis sobre la hemicelulosa suele ser escasa o nula si bien, en ocasiones, ésta podría ser parcialmente hidrolizada por determinados álcalis, aunque siempre en menor medida que en los tratamientos ácidos (Chiaramonti *et al.*, 2012).

Cabe destacar que el efecto de estos pretratamientos depende del tipo de biomasa ya que los álcalis resultan más eficaces en materiales lignocelulósicos con bajo contenido en lignina, como es el caso de los residuos agrícolas o cultivos herbáceos mientras que en maderas blandas su efecto es más limitado (Alvira *et al.*, 2010; Gupta y Lee, 2010; Galbe y Zacchi, 2012; Kim *et al.*, 2016).

Los métodos alcalinos suelen aplicarse en condiciones suaves, temperaturas moderadas, incluso a temperatura ambiente, aunque con tiempos largos de reacción y disoluciones concentradas de álcalis (Tahezadeh y Karimi, 2008). En consecuencia, esto evita el requerimiento de materiales especiales en la fabricación de los equipos, con coste elevado, como ocurre en el caso de los pretratamientos ácidos (Kim *et al.*, 2016).

El agente alcalino más empleado es el hidróxido sódico (NaOH), aplicado con probada eficacia en el pretratamiento del bagazo de caña de azúcar (Asgher *et al.*, 2013), la paja de colza (Mathew *et al.*, 2011) o el sorgo (McIntosh y Vancov, 2010). Igualmente, otros residuos lignocelulósicos como el rastrojo de maíz (Li *et al.*, 2010) o las cáscaras de cebada (Kim *et al.*, 2008) han sido pretratados con NH_4OH . Asimismo, el hidróxido cálcico (CaO) se ha usado en el pretratamiento de madera de álamo (Sierra *et al.*, 2009), entre otros, con la ventaja de su bajo coste, seguridad en el manejo y amplia disponibilidad (Yang y Wyman, 2008). No obstante, el hidróxido sódico es uno de los catalizadores básicos más fuertes y su acción en el pretratamiento de biomasa lignocelulósicas se evidencia en mayores rendimientos de hidrólisis enzimática que los alcanzados con otros agentes alcalinos (Kim *et al.*, 2016).

Tras el pretratamiento básico, los carbohidratos quedan concentrados en la fase sólida mientras que la lignina solubilizada forma parte de la corriente líquida junto con productos de degradación. No obstante, la presencia de esos compuestos tóxicos en el prehidrolizado no supone un inconveniente ya que no se justifica su valorización por fermentación dada la escasa presencia de azúcares en la misma (Gupta y Lee, 2010). En cambio, la precipitación de esa lignina disuelta mediante el empleo de ácidos puede resultar de interés para extraerle compuestos de interés o usarla como combustible (Galbe y Zacchi, 2012).

El empleo de peróxido de hidrógeno a pH básico y temperatura ambiente durante tiempos variables (6–24 h) es un método efectivo de pretratamiento de biomasa. Este pretratamiento oxidativo–alcalino resulta una opción interesante de delignificación que favorece la hidrólisis enzimática (Tahezadeh y Karimi, 2008). Según Gould (1984), la reacción de delignificación es más eficiente a pH 11.5 y con una relación H_2O_2 /sustrato, al menos, de 0.25 (p/p). El peróxido de hidrógeno se descompone con facilidad en medio alcalino liberando radical hidroxilo (OH^\cdot) y aniones superóxido (O_2^\cdot) que son responsables de la degradación de la lignina (Nigam *et al.*, 2009). No obstante, estas reacciones resultan muy dependientes del pH y de la temperatura por lo que resulta conveniente la optimización de ambas variables (Gupta y Lee, 2010). En el pretratamiento de residuos agrícolas, como la paja de trigo o los rastrojos de maíz con disolución alcalina de peróxido de hidrógeno a 25 °C se consigue una solubilización

casi completa de hemicelulosa y una deslignificación del 50% (Gould, 1984). Gupta y Lee (2010), al pretratar residuos herbáceos a 85° con NaOH consiguieron una deslignificación del 75% con una digestibilidad enzimática del 70%, que se incrementó hasta 90% al añadir 5% de H₂O₂ manteniendo la temperatura.

c) Organosolventes

El pretratamiento con organosolventes está basado en la capacidad de determinados disolventes orgánicos como metanol, etanol, acetona o etilenglicol, entre otros, para solubilizar la lignina. Se emplean mezclas acuosas de estos disolventes que consiguen la rotura de los enlaces lignina-carbohidratos incrementando a su vez la digestibilidad enzimática de la fracción celulósica que queda en el sólido. En este tipo de pretratamiento resulta muy común el empleo de un catalizador ácido como H₂SO₄, HCl o ácido oxálico para favorecer el proceso de deslignificación. No obstante, el empleo del catalizador se puede evitar incrementando la temperatura por encima de 185 °C (Sun y Cheng, 2002; Alvira *et al.*, 2010).

En estos tratamientos, por razones económicas y ambientales, la recuperación del disolvente por destilación, por ejemplo, y su reutilización en el proceso resulta crucial. Además, interesa separar el disolvente del prehidrolizado para evitar problemas de inhibición en las posteriores etapas de hidrólisis y fermentación (Galbe y Zacchi, 2012). El empleo de etanol o metanol resulta ventajoso económicamente frente a otros disolventes de mayor peso molecular como el etilenglicol (Alvira *et al.*, 2010). Comparado con otros pretratamientos químicos, el tratamiento con disolventes orgánicos permite recuperar la lignina con un elevado grado de pureza, lo que supone una ventaja considerable (Tahezadeh y Karimi, 2008; Zhao *et al.*, 2009). Numerosos residuos agrícolas como la paja de trigo (Salapa *et al.*, 2017), bagazo de caña de azúcar (Gurgel *et al.*, 2016) o la poda de olivo (Díaz *et al.*, 2011) han sido pretratados con diferentes solventes orgánicos.

Algunos autores sugieren el empleo de organosolventes como segunda etapa dentro de un pretratamiento combinado ácido diluido-organosolvente alcanzando un nivel de deslignificación del 70% y pérdidas de azúcares inferiores al 2% (Papatheofanous *et al.*, 1995).

d) Sales metálicas

Actualmente, el empleo de sales metálicas como catalizadores en el pretratamiento de biomasa lignocelulósicas se plantea como una opción de interés. Al igual que los

pretratamientos ácidos, las sales metálicas son sistemas de bajo pH aunque con mayor actividad catalítica que los ácidos inorgánicos (Kamyreddy *et al.*, 2013). En cambio, frente al empleo de disoluciones ácidas, las sales metálicas no requieren materiales especiales de construcción dada su baja corrosividad, además de ser fácilmente reciclables (Romero *et al.*, 2016).

Las sales metálicas pueden ser cloruros, fosfatos, sulfatos o nitratos de álcalis metálicos (Li, Na, K), de metales alcalinotérreos (Ca, Mg), de metales de transición (Cr, Fe; Cu, Mn, Co, Zn) o de Al. El papel de las sales metálicas en la transformación de la biomasa lignocelulósica está relacionado con su carácter de ácido de Lewis. Así, el catión metálico interviene en la ruptura de los enlaces glucosídicos de las cadenas de hemicelulosa favoreciendo su hidrólisis con baja degradación de xilanos (Romero *et al.*, 2016).

Numerosas investigaciones han estudiado el efecto de diversas sales metálicas: FeCl_3 (López-Linares *et al.*, 2013b), CuCl_2 , AlCl_3 (Kamyreddy *et al.*, 2013) o MgCl_2 (Kang *et al.*, 2013) sobre residuos lignocelulósicos. López-Linares *et al.* (2013b) optimizaron el pretratamiento del residuo de poda de olivo con FeCl_3 alcanzando un rendimiento global de 37 g azúcares fermentables/100 g materia prima en las condiciones optimizadas (153 °C; 0.265 M FeCl_3 ; 30 min).

e) Líquidos iónicos

En las últimas décadas, el pretratamiento de biomásas lignocelulósicas con líquidos iónicos ha despertado cierto interés y su efectividad fue contrastada con celulosa pura cristalina. No obstante, su aplicabilidad a sustratos más complejos como son los residuos lignocelulósicos requiere actualmente de un mayor estudio y desarrollo (Sáez *et al.*, 2013).

Los líquidos iónicos son disolventes con baja volatilidad que presentan una elevada estabilidad química y térmica. Químicamente, se trata de sales formadas con grandes cationes orgánicos y pequeños aniones inorgánicos, que se encuentran en forma líquida a temperatura ambiente, y que tienen capacidad para disolver carbohidratos y lignina de forma simultánea con baja formación de inhibidores (Yang y Wyman, 2008). La eficacia de los líquidos iónicos ya ha sido probada en el pretratamiento de sustratos como la paja de trigo (Li *et al.*, 2009) o la madera (Lee *et al.*, 2009). Sáez *et al.* (2013) pretrataron la paja de cebada con acetato de 1-etil-3-metilimidazolio, a 110 °C durante 30 min, y consiguieron solubilizar 86% de los azúcares presentes en dicha materia prima.

No obstante, se requieren estrategias eficaces para recuperar hemicelulosa y lignina del líquido del pretratamiento. Así, la dificultad para separar estos líquidos de baja volatilidad del prehidrolizado, junto con su alto coste, limitan su uso de cara a una implantación a escala industrial. Además, no está clara la toxicidad de los líquidos iónicos ante enzimas y microorganismos, lo que puede limitar su uso como una verdadera alternativa en el pretratamiento de biomasa para producción de etanol (Yang y Wyman, 2008). Sin embargo, el empleo de líquidos iónicos puede resultar atractivo para la obtención de compuestos de alto valor añadido a partir de biomasa lignocelulósicas (Galbe y Zacchi, 2012).

f) Pretratamientos biológicos

Los pretratamientos biológicos de la biomasa lignocelulósica, basados en el empleo de metabolitos procedentes de microorganismos, son tecnologías prometedoras por su bajo consumo de energía y de productos químicos. Se han estudiado distintos tipos de hongos, ubicuos en la naturaleza, capaces de producir diferentes enzimas que descomponen la estructura de la biomasa. Por una parte, los hongos de poredumbre blanca, que degradan la lignina por medio de tres tipos de enzimas: lignina peroxidasas, manganeso peroxidasas y lacasas. Por otra, los hongos de poredumbre parda que actúan principalmente sobre la holocelulosa (celulosa y hemicelulosa) con escasa modificación de la lignina, produciendo un marcado descenso del grado de polimerización. También se pueden emplear los llamados hongos de poredumbre blanda, que producen un amplio rango de enzimas celulolíticas y también otras enzimas como las lacasas, con capacidad para degradar la lignina (Wan y Li, 2012).

Los mecanismos implicados en la degradación de la lignocelulosa dependen de los distintos tipos de enzimas secretadas por los hongos. En cuanto a las enzimas lignilolíticas, la lignina peroxidasa provoca la ruptura oxidativa de los componentes aromáticos de naturaleza no fenólica de la lignina, mientras que la manganeso peroxidasa oxida numerosos compuestos fenólicos (especialmente siringilos) en presencia de Mn^{2+} . Las lacasas son enzimas oxidativas que contienen cobre y que actúan también sobre compuestos fenólicos o de naturaleza similar (Wan y Li, 2012). El hongo de poredumbre blanca *Phanerochaete chrysosporium* es uno de los más efectivos para la eliminación de la lignina de maderas (Shirkavand *et al.*, 2016).

Con respecto a las enzimas hidrolíticas, existe un amplio rango de enzimas celulolíticas segregadas por hongos, incluyendo endo-1,4-glucanasa, exo-1,4- β -glucanasa y 1,4- β -glucosidasa, que pueden degradar completamente la celulosa. Estas enzimas son producidas principalmente por hongos de poredumbre blanda, como

Aspergillus niger o *Trichoderma reesei*, que son los más utilizados para el pretratamiento de biomasa lignocelulósica (Hamed, 2013; Kataria y Ghosh, 2011).

Los hongos de pobredumbre parda utilizan tanto degradación enzimática como no enzimática. Además de endo-glucanasas y β -glucosidasas, también pueden producir endo-xilanasas y β -xilosidasas, necesarias para la ruptura de la hemicelulosa (Barry *et al.*, 2008). Estos hongos utilizan el peróxido de hidrógeno producido durante la ruptura de la hemicelulosa, que al ser una molécula pequeña se dispersa rápidamente a través de las paredes celulares degradando la holocelulosa a partir de reacciones radicalarias, en las que interviene el radical hidroxilo que se genera por la reacción de Fenton (Ray *et al.*, 2010). Por ejemplo, *Gloeophyllum trabeum* es una de las cepas de este tipo de hongos más estudiadas para la producción de biocombustibles y otras aplicaciones (Shirkavand *et al.* 2016).

Los principales parámetros que afectan a los pretratamientos biológicos son el tipo de microorganismo y de biomasa lignocelulósica, la concentración de inóculo y la forma de prepararlo, la temperatura y el tiempo de incubación, la humedad, la aireación, el pH, el tamaño de partícula, la suplementación del medio de cultivo y el proceso de descontaminación de la biomasa. La optimización de estos factores y la selección de las cepas más efectivas son determinantes para la reducción de los tiempos de cultivo y de las pérdidas de azúcares, aspectos clave para la viabilidad económica del proceso (Kuijk *et al.*, 2015).

El tipo de microorganismo condiciona las enzimas que se generan, que son las responsables de la degradación de la biomasa. La ingeniería genética o el uso de consorcios de hongos pueden mejorar la eficiencia y la rapidez de la degradación de la biomasa. También la composición de las materias primas afecta notablemente a los pretratamientos biológicos, dependiendo de la especie, la variedad, las condiciones de cultivo y el momento de maduración (Sindhu *et al.* 2016). En cuanto al inóculo, el tiempo requerido para la colonización del sustrato viene influenciado por el tipo y la cantidad de inóculo. Hay diferentes formas de preparar el inóculo para los pretratamientos con hongos en estado sólido, como el crecimiento del micelio en medio líquido o agar, en grano de cereal, o desde otro sustrato precolonizado con hongos, técnica que se emplea generalmente para aquellos hongos que no producen esporas, como es el caso de la mayoría de los hongos basidiomicetos de pobredumbre blanca. Es necesario un nivel mínimo de inóculo para una efectiva colonización de la biomasa y posterior deslignificación, aunque un aumento posterior en el nivel de inóculo ya sólo tiene un efecto muy limitado (Wan y Li, 2012).

La optimización de las condiciones de cultivo, como la temperatura y el pH dependerá a su vez del tipo de microorganismo y de biomasa. El propio metabolismo

de los hongos genera calor, que puede inhibir el crecimiento, por lo que el desarrollo de biorreactores apropiados para el cultivo en estado sólido que minimicen la generación de calor, es uno de los principales retos para el escalado de este tipo de procesos. También el pH es un parámetro difícil de controlar en medio sólido. La producción de enzimas ligninolíticas está influenciada por el pH inicial del medio. La mayoría de los hongos de poredumbre blanca crecen bien en rangos de pH de entre 4.0 y 5.0 y disminuyen la acidez del sustrato durante su crecimiento. Los cambios de pH también afectan a la estructura tridimensional de las lacasas, que pueden ver reducida su actividad. En cuanto al tiempo de cultivo, generalmente se requieren periodos de entre varias semanas o meses para obtener un alto grado de deslignificación. También debe ser optimizado para lograr un compromiso entre el incremento de la eficiencia de la sacarificación enzimática y el control del consumo de polisacáridos durante el pretratamiento biológico (Sindhu *et al.*, 2016).

La humedad inicial óptima para asegurar un adecuado crecimiento del hongo sin que se vea afectada la deslignificación suele estar comprendida entre 70 y 80%. La disponibilidad de oxígeno también es un factor importante ya que, como se ha explicado, los principales mecanismos de deslignificación son de carácter oxidativo, aunque se debe tener en cuenta que un nivel elevado de oxígeno puede favorecer la velocidad de deslignificación pero no incrementar la selectividad. También el tamaño de partícula debe ser optimizado, ya que un tamaño grande puede dificultar la penetración del hongo a través de la biomasa, así como la difusión del aire, del agua y de los metabolitos, mientras que si es demasiado pequeño se puede ver dificultado el transporte de gases entre las partículas. Por otra parte, la suplementación con agentes inductores, como el Mn^{2+} o el H_2O_2 puede mejorar la efectividad del proceso biológico, y también la adición de nutrientes facilita la colonización por los hongos de las partes más inaccesibles de la biomasa. Por último, para una aplicación a escala industrial, se debe tener en cuenta que la descontaminación de la biomasa es uno de los mayores costes asociados para los pretratamientos biológicos. El uso de compuestos químicos poco costosos, como sulfitos de sodio puede ser una alternativa a los tratamientos en autoclave o por vapor (Wan y Li, 2012).

Los pretratamientos biológicos se han aplicado a distintos tipos de materias primas lignocelulósicas (Sindhu *et al.*, 2016), también en combinación con otros tipos de pretratamientos físicos o químicos, mejorando la efectividad de éstos en condiciones más suaves (Shirkavand *et al.* 2016). Las principales ventajas de los pretratamientos biológicos radican en su menor impacto ambiental y coste económico, debido al menor consumo energético y generación de residuos. Además, la escasa generación de compuestos inhibidores para la fermentación supone también un ahorro en procesos de

detoxificación. Sus principales inconvenientes son la necesidad de largos tiempos de proceso y las posibles pérdidas de azúcares. Estos aspectos pueden ser mejorados con el uso de consorcios microbianos apropiados y con la optimización de los parámetros de operación. También se requiere mayor investigación para hacer factible el escalado del proceso, como en la necesaria descontaminación de la biomasa y en el diseño del reactor, que son aspectos importantes de cara a la aplicabilidad industrial.

Bibliografía

- Allen, S.G., L.C. Kam, A.J. Zemann y M.J. Antal (1996). “Fractionation of sugar cane with hot, compressed, liquid water”, *Industrial and Engineering Chemistry Research*, núm. 35, pp. 2705–2715.
- Alvira, P., E. Tomás-Pejó, M. Ballesteros y M.J. Negro (2010). “Pretreatment technologies for an efficient bioethanol production process based on enzymatic hydrolysis: A review”, *Bioresource Technology*, núm. 101, pp. 4851–4861.
- Asgher, M., Z. Ahmad, H. Muhammad y N. Iqbal (2013). “Alkali and enzymatic delignification of sugarcane bagasse to expose cellulose polymers for saccharification and bio-ethanol production”, *Industrial Crops and Products*, núm. 44, pp. 488–495.
- Barry, G., Q. Yuhui, y J. Jody (2008). “Fungal Decay of Wood: Soft Rot–Brown Rot–White Rot”, *American Chemical Society Symposium Series*, núm. 982, pp. 9:31.
- Binod, P., K. Satyanagalakshmi, R. Sindhu, K. Usha Janu, R.K. Sukumaran y A. Pandey (2012). “Short duration microwave assisted pretreatment enhances the enzymatic saccharification and fermentable sugar yield from sugarcane bagasse”, *Renewable Energy*, núm. 37, pp. 109–116.
- Carvalho, F., G. Garrote, J.C. Parajó, H. Pereira y F.M. Gírio (2005). “Kinetic modeling of brewery’s spent grain autohydrolysis”, *Biotechnology Progress*, núm. 21, pp. 233–243.
- Castro, E., I.U. Nieves, M.T. Mullinnix, W.J. Sagues, R. W. Hoffman, M.T. Fernández-Sandoval, Z. Tian, D.L. Rockwood, B. Tamang y L.O. Ingram (2014). “Optimization of dilute-phosphoric-acid steam pretreatment of *Eucalyptus benthamii* for biofuel production”, *Applied Energy*, núm. 125, pp. 76–83.
- Castro, E., M.J. Díaz, C. Cara, E. Ruiz, I. Romero y M. Moya (2011). “Dilute acid pretreatment of rapeseed straw for fermentable sugar generation”, *Bioresource Technology*, núm. 102, pp. 1270–1276.
- Chiaromonti, D., M. Prussi, S. Ferrero, L. Oriani, P. Ottonello, P. Torre y F. Cherchi (2012). “Review of pretreatment processes for lignocellulosic ethanol production, and development of an innovative method”, *Biomass and Bioenergy*, núm. 46, pp. 25–35.

- Chum, H.L., D.K. Johnson, S.K. Black y R.P. Overend (1990). "Pretreatment-Catalyst effects and the combined severity parameter", *Applied Biochemistry and Biotechnology*, núms. 24-25, pp. 1-14.
- Cullis, I.F., J.N. Saddler y S.D. Mansfield (2004). "Effect of initial moisture content and chip size on the bioconversion efficiency of softwood lignocellulosics", *Biotechnology and Bioengineering*, núm. 85, pp. 413-421.
- Díaz, M.J., W.J.J. Huijgen, R.R. van der Laan, J.H. Reith, C. Cara y E. Castro (2011). "Organosolv pretreatment of olive tree biomass for fermentable sugars", *Holzforschung*, núm. 65, pp. 177-183.
- Duff, S.J.B. y W.D. Murray (1996). "Bioconversion of forest products industry waste cellulose to fuel ethanol: a review", *Bioresource Technology*, núm. 55, pp. 1-33.
- Esteghlalian, A., A.G. Hashimoto, J.J. Fenske y M.H. Penner (1997). "Modeling and optimization of the dilute-sulfuric-acid pretreatment of corn stover, poplar and switchgrass", *Bioresource Technology*, núm. 59, pp. 129-136.
- Galbe, M. y G. Zacchi (2012). "Pretreatment: The key to efficient utilization of lignocellulosic materials", *Biomass and Bioenergy*, núm. 46, pp. 70-78.
- García, A., M. González-Alriols, R. Llano-Ponte y J. Labidi (2011). "Ultrasound-assisted fractionation of the lignocellulosic material", *Bioresource Technology*, núm. 102, pp. 6326-6330.
- Garrote, G., J.M. Cruz, H. Domínguez y J.C. Parajó (2003). "Valorisation of waste fractions from autohydrolysis of selected lignocellulosic materials", *Journal of Chemistry Technology and Biotechnology*, núm. 78, pp. 392-398.
- Gaspar, M., G. Kalman y K. Reczey (2007). "Corn fiber as a raw material for hemicellulose and ethanol production", *Process Biochemistry*, núm. 42, pp. 1135-1139.
- Gong, C.S., N.J. Cao, J. Du y G.T. Tsao (1999). "Ethanol production from renewable resources", *Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology*, núm. 65, pp. 207-241.
- Gould, J.M. (1984). "Alkaline peroxide delignification of agricultural residues to enhance enzymatic saccharification", *Biotechnology and Bioengineering*, núm. 26, pp. 46-52.
- Gupta, R. e Y.Y. Lee (2010). "Investigation of biomass degradation mechanism in pretreatment of switchgrass by aqueous ammonia and sodium hydroxide", *Bioresource Technology*, núm. 101, pp. 8185-8191.
- Hamed, S.A.M. (2013). "In-vitro studies on wood degradation in soil by soft- rot fungi: *Aspergillus niger* and *Penicillium chrysogenum*", *International Biodeterioration & Biodegradation*, núm. 78, pp. 98-102.
- Heitz, M., E. Capek-Menard, P.G. Koeberle, E. Gagne, E. Chornet, R.P. Overend, J.D. Taylor y E. Yu (1991). "Fractionation of *Populus tremuloides* at the pilot plant scale: optimization of steam pretreatment conditions using the STAKE II technology", *Bioresource Technology*, núm. 35, pp. 23-32.

- Jönsson, L.J. y C. Martín (2016). "Pretreatment of lignocellulose: Formation of inhibitory by-products and strategies for minimizing their effects", *Bioresource Technology*, núm. 199, pp. 103-112.
- Jönsson, L.J., B. Alriksson, N.O. Nilvebrant (2013). "Bioconversion of lignocellulose: inhibitors and detoxification", *Biotechnology for Biofuels*, 6:16.
- Kamireddy, S.R., J. Li, M. Tucker, J. Degenstein e Y. Ji (2013). "Effects and mechanism of metal chloride salts on pretreatment and enzymatic digestibility of corn stover", *Industrial Engineering and Chemical Research*, núm. 52, pp. 1775-1782.
- Kang, K.E., D.H. Park y G.T. Jeong (2013). "Effects of inorganic salts on pretreatment of *Miscanthus* straw", *Bioresource Technology*, núm. 132, pp. 160-165.
- Kataria, R. y S. Ghosh (2011). "Saccharification of Kans grass using enzyme mixture from *Trichoderma reesei* for bioethanol production", *Bioresource Technology*, núm. 102, pp. 9970-9975.
- Kim, J.S., Y.Y. Lee y T.H. Kim (2016). "A review on alkaline pretreatment technology for bioconversion of lignocellulosic biomass", *Bioresource Technology*, núm. 199, pp. 42-48.
- Kim, T.H., F. Taylor y K.B. Hicks (2008). "Bioethanol production from barley hull using SAA (soaking in aqueous ammonia) pretreatment", *Bioresource Technology*, núm. 99, pp. 5694-5702.
- Kostas, E. T., D. Beneroso y J.P. Robinson (2017). "The application of microwave heating in bioenergy: A review on the microwave pre-treatment and upgrading technologies for biomass", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, núm. 77, pp. 12-27.
- Kuijk, S.J.A., A.S.M. Sonnenberg, J.J.P. Baars, W.H. Hendriks y J.W. Cone (2015). "Fungal treated lignocellulosic biomass as ruminant feed ingredient: a review", *Biotechnology Advances*, núm. 33, pp. 191-202.
- Laser, M., D. Schulman, S. Allen, J. Lichwa, M. Antal y L. Lynd (2002). "A comparison of liquid hot water and steam pretreatments of sugar cane bagasse for bioconversion to ethanol", *Bioresource Technology*, núm. 81, pp. 33-44.
- Lee, S.H., T.V. Doherty, R.J. Linhardt y J.S. Dordick (2009). "Ionic liquid-mediated selective extraction of lignin from wood leading to enhanced enzymatic cellulose hydrolysis", *Biotechnology and Bioengineering*, núm. 102, pp. 1368-1376.
- Li, Q., Y. He, M. Xia, G. Jun, X. Xu, J. Yang y L. Li (2009). "Improving enzymatic hydrolysis of wheat straw using ionic liquid 1-ethyl-3-methyl imidazolium diethyl phosphate pretreatment", *Bioresource Technology*, núm. 100, pp. 3570-3575.
- Liu, C. y C. Wyman (2005). "Partial flow of compressed-hot water through corn stover to enhance hemicellulose sugar recovery and enzymatic digestibility of cellulose", *Bioresource Technology*, núm. 96, pp. 1978-1985.
- Lloyd, T.A. y C. Wyman (2005). "Combined sugar yields for dilute sulfuric acid pretreatment of corn stover followed by enzymatic hydrolysis of the remaining solids", *Bioresource Technology*, núm. 96, pp. 1967-1977.

- López-Linares, J.C., C. Cara, M. Moya, E. Ruiz, E. Castro e I. Romero (2013a). “Fermentable sugar production from rapeseed straw by dilute phosphoric acid pretreatment”, *Industrial Crops and Products*, núm. 50, pp. 525–531.
- López-Linares, J.C., I. Romero, M. Moya, C. Cara, E. Ruiz y E. Castro (2013b). “Pretreatment of olive tree biomass with FeCl₃ prior enzymatic hydrolysis”, *Bioresource Technology*, núm. 128, pp. 180–187.
- Lunelli, F.C., P. Sfalcin, M. Souza, E. Zimmermann, V. Dal Prá, E.L. Foletto, S.L. Jahn, R.C. Kuhn y M.A. Mazutti (2014). “Ultrasound-assisted enzymatic hydrolysis of sugarcane bagasse for the production of fermentable sugars”, *Biosystems Engineering*, núm. 124, pp. 24–28.
- Martínez-Patiño, J.C., I. Romero, E. Ruiz, C. Cara, J. Romero-García y E. Castro (2017). “Design and optimization of sulfuric acid pretreatment of extracted olive tree biomass using response surface methodology”, *Bioresources*, núm. 12, pp. 1779–1797.
- Martínez-Patiño, J.C., J.M. Romero-García, E. Ruiz, J. Oliva, C. Álvarez, I. Romero, M. Negro y E. Castro (2015). “High solids loading pretreatment of olive tree pruning with dilute phosphoric acid for bioethanol production by *Escherichia coli*”, *Energy & Fuels*, núm. 29, pp. 1735–1742.
- Mathew, A.K., K. Chaney, M. Crook y A. Humphries (2011). “Alkaline pre-treatment of oilseed rape straw for bioethanol production: Evaluation of glucose yield and pre-treatment energy consumption”, *Bioresource Technology*, núm. 102, pp. 6547–6553.
- McIntosh, S. y T. Vancov (2010). “Enhanced enzyme saccharification of Sorghum bicolor straw using dilute alkali pretreatment”, *Bioresource Technology*, núm. 101, pp. 6718–6727.
- Miao, Z., T. Grift, A. Hansen y K. Ting (2011). “Energy requirement for comminution of biomass in relation to particle physical properties”, *Industrial Crops and Products*, núm. 33, pp. 504–513.
- Moniruzzaman, M. (1996). “Effect of steam explosion on the physicochemical properties and enzymatic saccharification of rice straw”, *Applied Biochemistry and Biotechnology*, núm. 59, pp. 283–297.
- Mosier, N., R. Hendrickson, N. Ho, M. Sedlak y M. Ladisch (2005). “Optimization of pH controlled liquid hot water pretreatment of corn stover”, *Bioresource Technology*, núm. 96, pp. 1986–1993.
- Nabarlatz, D., A. Ebringerová y D. Montané (2007). “Autohydrolysis of agricultural by-products for the production of xylo-oligosaccharides”, *Carbohydrate Polymers*, núm. 69, pp. 20–28.
- Nguyen, Q., M. Tucker, F. Keller, D. Beaty, K. Connors y F. Eddy (1999). “Dilute acid hydrolysis of softwood”, *Applied Biochemistry and Biotechnology*, núms. 77–79, pp. 133–142.
- Nigam, P.S., N. Gupta y A. Anthwal (2009). “Pre-treatment of agro-industrial residues”, en Nigam P.S. y A. Pandey (eds.), *Biotechnology for Agro-Industrial Residues Utilisation*. Springer Science+Business Media B.V. [DOI 10.1007/978-1-4020-9942-72].

- Nikolić, S., L. Mojović, M. Rakin, D. Pejin y J. Pejin (2010). "Ultrasound-assisted production of bioethanol by simultaneous saccharification and fermentation of corn meal", *Food Chemistry*, núm. 122, pp. 216-222.
- Overend, R.P., E. Chornet y J. Gascoigne (1987). "Fractionation of lignocellulosics by steam-aqueous pretreatments", *Philosophical Transactions of the Royal Society*, A 321, pp. 523-536.
- Papatheofanous, M.G., E. Billa, D. Koullas, B. Monties y E. Koukios (1995). "Two-stage acid catalyzed fractionation of lignocellulosic biomass in aqueous ethanol systems at low temperatures", *Bioresource Technology*, núm. 54, pp. 305-310.
- Ray, M.J., D. Leak, P. Spanu y R. Murphy (2010). "Brown rot fungal early stage decay mechanism as a biological pretreatment for softwood biomass in biofuel production", *Biomass and Bioenergy*, núm. 34, pp. 1257-1262.
- Romero, I., E. Ruiz y E. Castro (2016). "Pretreatment with metal salts", en *Biomass Fractionation Technologies for a Lignocellulosic Feedstock Based Biorefinery*. Ed. Elsevier, pp. 209-227.
- Romero, I., E. Ruiz, E. Castro y M. Moya (2010). "Acid hydrolysis of olive tree biomass", *Chemical Engineering Research & Design*, núm. 88, pp. 633-640.
- Ruiz, E., I. Romero, M. Moya, C. Cara, J. Vidal y E. Castro (2013). "Dilute sulfuric acid pretreatment of sunflower stalks for sugar production", *Bioresource Technology*, núm. 140, pp. 292-298.
- Sabarez, H., C. Oliver, R. Mawson, G. Dumsday, T. Singh, N. Bitto, C. McSweeney y M. Augustin (2014). "Synergism between ultrasonic pretreatment and white rot fungal enzymes on biodegradation of wheat chaff", *Ultrasonics Sonochemistry*, núm. 21, pp. 2084-2091.
- Sáez, F., M. Ballesteros, I. Ballesteros, P. Manzanares, J. Oliva y M. Negro (2013). "Enzymatic hydrolysis from carbohydrates of barley straw pretreated by ionic liquids", *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, núm. 88, pp. 937-941.
- Salapa, I., C. Katsimpouras, E. Topakas y D. Sidiras (2017). "Organosolv pretreatment of wheat straw for efficient ethanol production using various solvents", *Biomass and Bioenergy*, núm. 100, pp. 10-16.
- Sant'Ana da Silva, A., H. Inoue, T. Endo, S. Yano y E. Bon (2010). "Milling pretreatment of sugarcane bagasse and straw for enzymatic hydrolysis and ethanol fermentation", *Bioresource Technology*, núm. 101, pp. 7402-7409.
- Santos, D., F. Ubiratan, U. Silva, F. Duarte, C. Bizzi, E. Flores y P. Mello (2017). "Ultrasound-assisted Acid Hydrolysis of Cellulose to Chemical Building Blocks: Application to Furfural Synthesis", *Ultrasonics Sonochemistry*, en prensa.
- Shirkavand, E., S. Baroutian, D. Gapes y B. Young (2016). "Combination of fungal and physicochemical processes for lignocellulosic biomass pretreatment. A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, núm. 54, pp. 217-234.
- Sierra, R., C. Granda y M. Holtzapple (2009). "Short-term lime pretreatment of poplar wood", *Biotechnology Progress*, núm. 25, pp. 323-332.

- Sindhu, R., P. Binod y A. Pandey (2016). “Biological pretreatment of lignocellulosic biomass. An overview”, *Bioresource Technology*, núm. 199, pp. 76-82.
- Söderström, J., L. Pilcher, M. Galbe y G. Zacchi (2003). “Two-step steam pre-treatment of softwood by dilute H₂SO₄ impregnation for ethanol production”, *Biomass and Bioenergy*, núm. 24, pp. 475-486.
- Sun, Y. y J. Cheng (2002). “Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: a review”, *Bioresource Technology*, núm. 83, pp. 1-11.
- Taherzadeh, M.J. y K. Karimi (2007). “Acid-based hydrolysis processes for ethanol from lignocellulosic materials: a review”, *Bioresources*, núm. 2, pp. 472-499.
- Taherzadeh, M.J. y K. Karimi (2008). “Pretreatment of Lignocellulosic Wastes to Improve Ethanol and Biogas Production: A Review”, *International Journal of Molecular Science*, núm. 9, pp. 1621-1651.
- Walsum, G.P., S. Allen, M. Spencer, M. Laser, M. Antal y L. Lynd (1996). “Conversion of lignocellulosics pretreated with liquid hot water to ethanol”, *Applied Biochemistry and Biotechnology*, núm. 57/58, pp. 157-169.
- Wan, C. e Y. Li (2012). “Fungal pretreatment of lignocellulosic biomass”, *Biotechnology Advances*, núm. 30, pp. 1447-1457.
- Yang, B. y C. Wyman (2008). “Pretreatment: the key to unlocking low-cost cellulosic ethanol”, *Biofuels, Bioproducts and Biorefinery*, núm. 2, pp. 26-40.
- Zhao, X., K. Cheng y D. Liu (2009). “Organosolv pretreatment of lignocellulosic biomass for enzymatic hydrolysis”, *Applied Microbiology and Biotechnology*, núm. 82, pp. 815-827.

Valorización de residuos lignocelulósicos: materiales, biomoléculas, azúcares fermentables y enzimas

Arturo Figueroa Montero
Gabriel Viguera
Maribel Hernández Guerrero

Introducción

La biomasa lignocelulósica de plantas superiores, plantas acuáticas, pastos y recursos agrícolas es un tipo de materia prima renovable que puede ser utilizada para producir biocombustibles como el etanol. Se obtiene de residuos de actividades agrícolas e industriales, de los cuales una fracción es utilizada para forrajes, composta y obtención de energía térmica (Yang *et al.*, 2013, Lewandowski *et al.*, 2000). La biomasa está formada principalmente por una fracción muy pequeña de extractivos (acuosos y orgánicos), minerales y en mayor proporción por polímeros de xilosa y glucosa; celulosa, hemicelulosa y por compuestos aromáticos; lignina. Estos polímeros se encuentran entrelazados en una matriz que forma una red recalcitrante que brinda protección contra daño físico, químico y microbiológico. En general, la biomasa lignocelulósica puede utilizarse para la producción de bioetanol de primera, segunda o hasta tercera generación. El bioetanol de primera generación se denomina así, ya que se produce a partir de cosechas que pudieran ser utilizadas para el consumo humano o animal. Por ejemplo, la caña de azúcar, melazas, sorgo, maíz, trigo y cebada tienen alto contenido de azúcares, los cuales se pueden fermentar directamente o utilizar después de una hidrólisis enzimática para la producción de bioetanol de primera generación. Por otra parte, el bioetanol de segunda generación es aquel producido por biomasa que no está destinada a consumo humano, que no ha sido cosechada en tierras que pudieran utilizarse para cosechas de consumo

* Agradecemos a la División de Ciencias Naturales e Ingeniería y al Departamento de Procesos y Tecnología de la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Cuajimalpa.

o que incluso puede ser proveniente de residuos de cosechas (cáscaras, tallos, hojas, etcétera). El bioetanol de tercera generación es aquel producido por algas o microalgas (Rastogi y Shrivastava, 2017).

Actualmente los biocombustibles como el bioetanol satisfacen parte de los requerimientos energéticos en Estados Unidos, Brasil, Colombia, Japón y algunos países europeos, con una tendencia al aumento en Alemania, España e Inglaterra (Yang *et al.*, 2013). Después de Estados Unidos, país que produce 47% del bioetanol mundial (Balat y Balat, 2009), Brasil es el segundo productor en el mundo. Mientras que en Estados Unidos se utiliza el maíz para la producción del biocombustible, denominado de primera generación por ser obtenido directamente del almidón del maíz (Balat *et al.*, 2008; Dias de Oliveira *et al.*, 2005), Brasil utiliza los carbohidratos en la caña de azúcar para el mismo propósito (Cavalett *et al.*, 2012; Puppim de Oliveira, 2002). Sin embargo, el uso tanto de maíz como de caña de azúcar ha despertado controversias éticas y ambientales en cuanto a la falta de alimentos y la crisis alimentaria mundial y a la sustentabilidad de los procesos (Howard *et al.*, 2003). De ahí que los residuos lignocelulósicos sean considerados una alternativa para la obtención de biocombustibles y/o moléculas con valor agregado, producidas bajo el concepto de una biorrefinería, con la ventaja de ser una materia prima abundante, relativamente barata y que no interfiere con el abasto de alimentos. A nivel industrial, la biomasa lignocelulósica es considerada un residuo y es quemada en condiciones inadecuadas, lo cual produce gases de efecto invernadero que contribuyen al calentamiento global, además de ser una de las principales fuentes de emisión al aire de dioxinas y furanos, compuestos aromáticos altamente recalcitrantes, los cuales se bioacumulan en tejido adiposo con alto riesgo para la salud (Mousdale, 2008).

Actualmente, se han realizado estudios y adoptado esquemas para la producción de bioetanol de segunda generación a partir de biomasa no alimentaria que incluye residuos forestales y agrícolas (Cook y Devoto, 2011). Además de producir bioetanol, la biomasa lignocelulósica puede utilizarse para obtener otros productos de valor agregado dentro de un esquema de biorrefinería. El concepto de la biorrefinería propone el aprovechamiento de las moléculas de la biomasa lignocelulósica, para generar biocombustibles o materias primas que pueden ser utilizadas para obtener (por *vía* química o biológica) compuestos, tales como alcoholes, aldehídos, ácidos orgánicos, polioles, cetonas, aminoácidos, compuestos aromáticos, polímeros, entre otros (Werpy y Petersen, 2004; FitzPatrick *et al.*, 2010). El desarrollo de biorrefinerías en el mundo ha sido lento debido a los retos que representan los procesos y el área de mercado para los productos (Hellsmark *et al.*, 2017; Goh y Lee, 2010). En la actualidad sólo la empresa Borregaard con sede en Sarpsborg, Noruega,

ha logrado mantenerse durante más de 40 años en el mercado de las biorrefinerías produciendo biocombustibles (etanol de segunda generación) y químicos (celulosa, lignosulfonatos, vainillina, derivados de lignocelulosa) de madera de *Picea* —un género de la familia Pinaceae dentro de los cuales se encuentran árboles como el abeto. Sin embargo, Borregaard ahora enfoca sus investigaciones y pruebas piloto para cubrir la tendencia mundial hacia el uso de residuos lignocelulósicos, los cuales son mucho más baratos que la madera y no representan controversias éticas alimentarias ni ambientales además de contribuir al esquema de economía circular (Liguoria y Faracoa, 2016). Algunos de sus productos en desarrollo son celulosa, hemicelulosa y lignina; además de azúcares fermentables en solución y aceites provenientes de pirólisis (Rodsrud *et al.*, 2012).

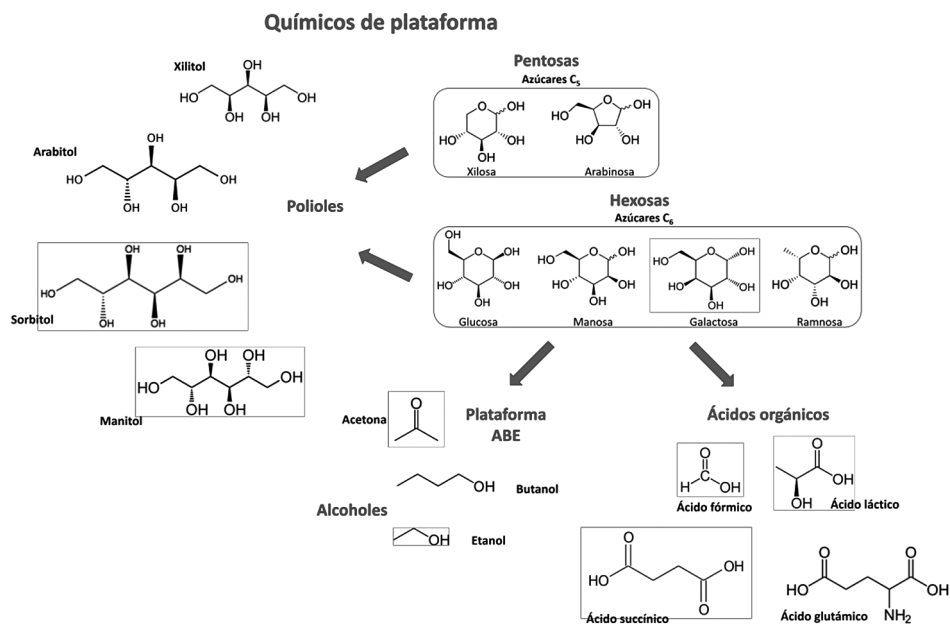
Otro ejemplo de economía circular fue Citrotechno, que operó en Valencia, España, desde el 2010, reutilizando y valorizando residuos de cítricos para la producción de bioetanol (de segunda generación), aceites esenciales y alimento para animales. De manera adicional, se recuperaba agua de los residuos, la cual era utilizada como agua de riego para cultivos de cítricos cerrando con ello el ciclo de producción (Hernández-Guerrero *et al.*, 2012). Sin embargo, la empresa tuvo que cerrar en 2013 ya que, durante los años de operación, la oferta de residuos fue menor a la contemplada originalmente al ser utilizada principalmente como alimento de ganado. El incremento en los costos del gas necesario para producir el bioetanol fue un segundo factor decisivo en el cierre de la empresa (*Expansión*, 2013; Levante-EMV, 2013). Para obtener biocombustibles o moléculas con valor agregado, a partir de los residuos lignocelulósicos, aún falta resolver otros problemas técnicos que permitan liberar los azúcares fermentables y otras moléculas de interés, usando procesos económicamente atractivos. Uno de estos problemas es la inhibición de enzimas. Zhang *et al.* (2017) mencionan que el costo de las enzimas celulolíticas requeridas para producir etanol es de \$0.15-\$0.20 USD por litro de un total de \$0.53 USD, y que se tiene como objetivo disminuir el costo del uso de enzimas a \$3-5 centavos de USD por litro. En su estudio mencionan que una gran parte de las enzimas quedan unidas a la lignina en vez de unirse a la celulosa, por lo cual proponen investigar las interacciones que tienen las celulasas sobre la superficie de la lignocelulosa, a fin de tener un mejor entendimiento de los procesos de inhibición de estas enzimas.

Si bien el panorama en el establecimiento de biorrefinerías y más aún de aquellas basadas en la economía circular presenta aún dificultades, hay grandes avances en investigaciones para aprovechar de mejor manera los residuos lignocelulósicos tanto para la producción de bioetanol, en donde se busca utilizar la celulosa y hemicelulosa

de manera eficiente para aumentar los rendimientos (Klason *et al.*, 2013), así como en la obtención de químicos, materiales y otros productos de valor agregado a partir de los tres polímeros principales de la biomasa lignocelulósica.

Este capítulo presenta algunos de los usos actuales y estudios en desarrollo para la lignocelulosa en general, pero que pudieran aplicarse para la valorización de los residuos lignocelulósicos, a partir de sus principales moléculas; celulosa, lignina y hemicelulosa. Se presentan algunos de sus usos como materiales a nivel industrial, así como también los resultados de investigaciones que sitúan a los polímeros lignocelulósicos como materiales de alto valor agregado, incluso para el área biomédica. Se describen también los posibles usos de azúcares fermentables y otras biomoléculas con las que se obtienen químicos de plataforma (bloques base, Figura 1) para la obtención de otros químicos que podrían llegar a ser sustitutos del petróleo. Finalmente, se describe la obtención de otros productos como lo son varias enzimas incluyendo celulasas, hemicelulasas, ligninasas, galactosidasas, pectinasas, amilasas y fitasas, las cuales son de importancia incluso a nivel industrial.

Figura 1. Químicos de plataforma obtenidos de la biomasa lignocelulósica

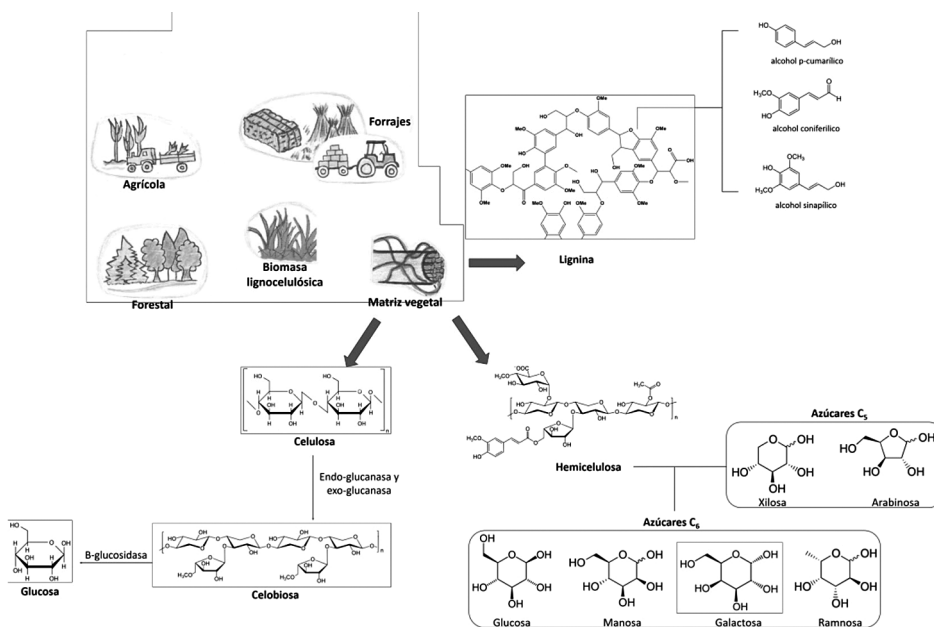


Fuente: elaboración propia.

Materiales y biomoléculas

En general, los tres polímeros del complejo lignocelulósico; celulosa, lignina y hemicelulosa (Figura 2) tienen ya varias aplicaciones a nivel industrial. Sin embargo, podrían utilizarse como materiales con alto valor agregado o como sustitutos del petróleo para la obtención de varios químicos. Aunado a ello, sus propiedades pueden ser moduladas a partir de la funcionalización química o enzimática para tener un amplio rango de aplicaciones. Esta sección presenta algunas generalidades y aplicaciones existentes y de valor agregado en desarrollo de la celulosa, lignina y la hemicelulosa como moléculas principales de los recursos lignocelulósicos. También se describen otras biomoléculas como son los azúcares fermentables obtenidos de la celulosa y hemicelulosa y sus derivados, los cuales son químicos base (de plataforma) para la obtención de otros productos.

Figura 2. Recursos lignocelulósicos y biopolímeros obtenidos a partir de éstos



Fuente: elaboración propia.

Celulosa

Es uno de los polímeros naturales renovables más abundantes, ya que conforma la mayor parte de la biomasa terrestre siendo componente estructural de plantas tanto terrestres (en donde se encuentra en mayor proporción) como acuáticas y macroalgas, aunque también es producida por microorganismos y tunicados (Zhao y Li, 2014). Químicamente, la celulosa es un polisacárido de estructura lineal, polidisperso y sindiotáctico formado por moléculas de β -glucosa unidas por enlaces del tipo β -1,4-O-glucosídicos y que de forma nativa tiene un grado de polimerización en un rango de 500 a 15 000 unidades de glucosa (Yang *et al.*, 2013). En general, existen cuatro tipos de celulosas que van denominadas del tipo I al IV.

De forma nativa, en plantas y algas, o como celulosa bacteriana se encuentra como Celulosa I de naturaleza cristalina (aunque es la menos estable termodinámicamente) siendo una mezcla de alomorfos I α y I β . De esta Celulosa I se derivan los otros tres tipos. La Celulosa II (la más estable), se obtiene principalmente por un tratamiento físico de tensión mecánica seguido de un tratamiento alcalino conocido como mercerización. El tipo III de celulosa se obtiene de los dos tipos previos cuando son tratados con aminas o amonía. Mientras que el último tipo se obtiene del calentamiento de la Celulosa III con glicerol (Gómez-Patiño *et al.*, 2012). De manera supramolecular, la celulosa está definida como un sistema de dos fases; una cristalina y una amorfa (Hearle, 1958). La celulosa contiene en su estructura varios grupos hidroxilo, los que la hacen susceptible de funcionalización. Los grupos hidroxilo de la parte amorfa de la celulosa son los más propicios y accesibles para la modificación química de la celulosa. Dichos grupos son esterificados, eterificados o utilizados en reacciones de entrecruzamiento y copolimerización para obtener derivados de celulosa con propiedades diferentes a la nativa. Sus derivados más comunes incluyen al acetato de celulosa, la oxixelulosa, la celulosa microcristalina, éteres de celulosa, metilcelulosa, hidroxietilcelulosa, la hidroxipropilmetilcelulosa y la carboximetilcelulosa.

Siendo un polímero rígido, con dominios cristalinos e insoluble en varios solventes, la celulosa es una molécula con muchas posibilidades para la obtención de materiales (Hon, 1996). De hecho, la celulosa proveniente de maderas y plantas tiene, desde hace varias décadas, un número amplio de usos industriales. Tal es el caso de su aprovechamiento para la obtención de papel, recubrimientos, empaques y fibras para la industria textil (Cuadro 1). Su aprobación por la Food Drugs Administration (FDA) también le ha dado la posibilidad de ser utilizada en las industrias alimenticia y farmacéutica. Sus usos en estos sectores industriales van desde agentes

Cuadro 1. Algunos tipos de celulosa y sus aplicaciones

TIPO DE CELULOSA	APLICACIONES
Celulosa	Papel, recubrimientos, empaques, fibras, agentes emulsificantes, texturizadores, dispersantes, excipientes, diluyentes, aglutinantes.
Acetato de celulosa	Películas fotográficas, fibras de rayón.
Nitrato de celulosa	Explosivos, aglutinante, tintas, pinturas, recubrimientos, adhesivos.
Oxixelulosa	Cosméticos, farmacéuticos, agente hemostático.
Etilcelulosa	Emulsificante, dispersante.
Celulosa microcristalina	Emulsificante, dispersante y aglutinante para tabletas.
Metilcelulosa	Emulsificante, adhesivo débil, lubricante.
Etilcelulosa	Recubrimiento, aglutinante, liberación de fármacos.
Hidroxietilcelulosa	Agente espesante en cosméticos, textiles y papel.
Hidroxipropilmetilcelulosa	Liberación de fármacos.
Carboximetilcelulosa	Emulsificante, detergentes, pinturas.
Nanocelulosa	Cultivo de células, acarreador de fármacos, implantes, regeneración de tejido.

Fuente: elaboración propia.

emulsificantes, texturizadores, dispersantes, excipientes, diluyentes y aglutinantes entre otros (Lavanya *et al.*, 2011).

Entre los derivados de celulosa se encuentra el acetato de celulosa que se utiliza en la producción de películas fotográficas y en la producción de fibras de rayón por extrusión en acetona (Smith, 1940). La nitrocelulosa se usa para producir explosivos cuando tiene un alto contenido de nitratos. Otros usos incluyen aglutinante para tintas, pinturas, recubrimientos y adhesivos (Polymer Database, 2015).

La oxixelulosa es usada en la industria cosmética y farmacéutica (para tabletas, micropartículas, geles, suspensiones). Además, es un polímero biocompatible y bioabsorbible utilizado como agente hemostático (Martina *et al.*, 2009). Por su parte, la celulosa microcristalina tiene usos como emulsificante, dispersante y en la industria farmacéutica como aglutinante para tabletas (Thoorens *et al.*, 2014). Los éteres de celulosa incluyen a la metilcelulosa, un emulsificante y adhesivo débil que se utiliza también en solución como lubricante y lágrimas artificiales y la etilcelulosa, la cual es ampliamente utilizada como recubrimiento o aglutinante hidrofóbico de formas farmacéuticas sólidas para controlar la liberación de fármacos. A diferencia de la celulosa, la hidroxietilcelulosa y la hidroxipropilmetilcelulosa son materiales hidrofílicos y, por tanto, solubles en agua; el primer polímero se utiliza como agente

espesante en la industria cosmética, textil y del papel, mientras que el segundo, se utiliza en la industria farmacéutica por su capacidad para formar hidrogeles y controlar la liberación de fármacos (Baumgartner *et al.*, 2002). La carboximetilcelulosa se utiliza como modificador de viscosidad y emulsificante en la industria alimenticia, para detergentes y en pinturas base agua.

Como se mencionó, en el área de materiales, la celulosa y algunos de sus derivados cuentan ya con varias aplicaciones industriales. Sin embargo, con el avance en las investigaciones la nanocelulosa ha cobrado mucha importancia por lo que se sitúa como uno de los polímeros más prometedores para aplicaciones en materiales de alto valor agregado.

La nanocelulosa es un recurso renovable con buena biocompatibilidad (de baja toxicidad), biodegradabilidad y buenas propiedades mecánicas (Abitbol *et al.*, 2016; Lin y Dufresne, 2014). Sus dimensiones en la escala nano, alineación y orientación de cadenas, alto grado de cristalinidad, propiedades reológicas y de barrera, además de tener gran reactividad química entre otras propiedades, hacen de la nanocelulosa un material con muchas posibles aplicaciones; su clasificación general incluye a los nanocristales, también denominados celulosa nanocristalina (diámetro de 5 a 30 nm y longitud de 100 nm a varios micrómetros); la celulosa nanofibrilar (de 10 a 100 nm de espesor) y la celulosa bacteriana, también llamada celulosa microbiana (Kim *et al.*, 2015), aunque esta última no es objeto de este estudio por no tratarse de una fuente vegetal.

La nanocelulosa se obtiene por métodos químicos, mecánicos, biológicos o incluso sus combinaciones. El objetivo de estos métodos es remover las partes amorfas del polímero para obtener nanopartículas cristalinas. Además, una vez obtenida, la nanocelulosa puede ser funcionalizada *vía* química o enzimática para obtener las propiedades deseadas para alguna aplicación en específico (Espino-Pérez *et al.*, 2014; Afrin y Karim, 2017).

Algunas de sus aplicaciones de alto valor agregado son el cultivo de células gracias a sus propiedades mecánicas y de biocompatibilidad y a que bajo ciertas condiciones la nanocelulosa puede generar hidrogeles y aerogeles (matrices 3D), lo que permite que se utilice como material para el cultivo de células ya que favorece su adhesión y proliferación (Liu, 2016). En la actualidad se ha logrado cultivar células de insectos, ratones, células madre, embriones humanos y células humanas en nanocelulosa. Otras aplicaciones incluyen acarreador de fármacos, implantes para reparación y regeneración de tejido, entre otras. Se ha estudiado también la bioimpresión con biotintas a base de nanocelulosa, la cual ayuda a modificar las propiedades reológicas aumentando la viscosidad y cambiando el flujo newtoniano de otros materiales

e hidrogeles como el alginato o sulfato de alginato que se han utilizado para cultivo de células (Müller *et al.*, 2017).

Lignina

Junto con la celulosa, la lignina es uno de los biopolímeros más abundantes en el planeta. La lignina está conformada por polímeros fenilpropanoides tridimensionales, considerablemente resistentes a la degradación microbiana en comparación con los polisacáridos y otros biopolímeros naturales. Es un conjunto de moléculas aromáticas denominadas monolignoles dentro de los cuales se encuentran el guaiacilo (G), siringilo (S), y *p*-hidroxifenilo (H). Dichos monolignoles tienen la característica de ser recalcitrantes brindando así protección a la materia vegetal. La lignina de las gimnospermas (pino, abeto, ciprés, enebro, entre otros) está principalmente compuesta de unidades de guayacilo con cantidades menores de *p*-hidroxifenilo. Por otra parte, las angiospermas están compuestas tanto de unidades de guayacilo como de siringilo. Las maderas suaves contienen cantidades significativas de *p*-hidroxifenilo, pero en los pastos se encuentran en mayor cantidad (Boerjan *et al.*, 2003). Además de fungir como protección, la lignina también desempeña un papel activo en el transporte de agua y otros metabolitos en las plantas (Whetten y Sederoff, 1995). La lignina ha sido utilizada para obtener químicos y moléculas simples (monómeros y aromáticos) (Octave y Thomas, 2009; McCready y Williams, 2007; Pan *et al.*, 2006).

La lignina, al no ser utilizada directamente para la producción de papel (ya que su presencia y oxidación es la responsable de la pérdida de blancura en éste) ni de bioetanol, es utilizada generalmente como un comburente que se quema en la industria para obtener energía para usarse en otras partes del proceso. Sin embargo, la compleja estructura química de la molécula la hace bastante interesante, ya que podría funcionar como un sustituto del petróleo y como químico de plataforma, permitiendo producir compuestos aromáticos.

Los compuestos aromáticos derivados de la lignina son el fenol, el cual es utilizado en la producción de plásticos, vainillina (actualmente sólo 20% se produce a partir de la lignina), benceno, tolueno y xileno. Otros derivados de la lignina incluyen al ácido cinámico, catecol, mezclas complejas de quininas (Zakzeski *et al.*, 2010).

Industrialmente, la lignina también se ha utilizado como aglutinante, dispersante, agente secuestrante, como emulsificante para asfalto, como tinte y pigmento, como supresor de polvos en carreteras e incluso para secuestrar metales (Pure Lignin Environmental Technology, 2011). También es utilizada como dispersante para

cementos (Petersen y Grundersen, 2004). Debido a que puede crearse una unión muy fuerte entre las moléculas de lignina y otras moléculas es una buena opción como aglutinante y adhesivo fuerte. Para dichos fines, es combinada en ocasiones con formaldehído de fenol o de urea (Borregaard Lignotech, 2011; Lora *et al.*, 2002). La lignina tiene aplicación como estabilizador y en agricultura como modificador de tensión en suelos para mejorar el mojado. Otros usos incluyen fertilizante, herbicida y aglutinante de pellets.

Como material de alto valor agregado, junto con la quitina, la lignina se ha utilizado para inmovilizar enzimas lipasas de *Aspergillus niger* (Zdarta *et al.*, 2015); actúa también como estabilizante para la fotodegradación y la termo-oxidación de materiales; a partir de ésta se pueden obtener materiales compósitos cuando es mezclada con otros polímeros como polietileno, poliestireno, polipropileno o caucho natural (Hodásová *et al.*, 2015). Se han obtenido también materiales termoplásticos que pudieran tener usos como plásticos, espumas, elastómeros o precursores de fibras a partir de la copolimerización o plastificación de la lignina (Wang, 2016). Las posibles aplicaciones de materiales de lignina en el área biomédica van desde andamios (Salami, 2017), y gracias a sus propiedades de biocompatibilidad, baja toxicidad, biodegradabilidad y susceptibilidad a degradación enzimática se ha visto potencial aplicación de la lignina como hidrogel para la liberación de fármacos (Thakur, 2015). Quizá una de las aplicaciones más interesantes podría llegar a ser el uso de nanopartículas de lignina con capacidad de antiproliferación de células cancerígenas para la liberación de fármacos (Figueiredo, 2017).

Hemicelulosa

La hemicelulosa constituye casi un tercio de la pared celular de la materia vegetal. En ocasiones es referida como un conjunto de polisacáridos diferentes a la celulosa, los cuales cuentan con una cadena principal unida por enlaces β -1,4 glucosídicos (Pauly *et al.*, 2013). La hemicelulosa tiene una estructura amorfa compuesta por heteropolímeros que incluyen xilano, galactomanano, glucoroxilano, arabino xilano, glucomanano y xiloglucano (Watanabe y Tokuda, 2009; Shallom y Shoham, 2003).

Cabe mencionar que la hemicelulosa es el polímero menos valorado en la cadena de producción de las biorrefinerías, ya que la obtención de altos rendimientos de bioetanol a partir de hemicelulosa y su producto de hidrólisis (xilosa) se dificulta en presencia de la glucosa proveniente de la celulosa. Se han llevado a cabo algunas investigaciones de posibles estrategias para mejorar la productividad. Dentro de estas

estrategias se encuentran el uso de levaduras para fermentar la fracción de xilosa, el uso de xilosa isomerasa junto con levaduras y la fermentación secuencial y co-cultivo (Chandrakant y Bisaria, 1998; Gírio *et al.*, 2010).

Otra de las razones por las cuales la hemicelulosa es subvalorada en la planeación y operación de las biorrefinerías es debido a que durante los pretratamientos, puede degradarse a ácidos débiles o furanos, siendo éstos un impedimento para la fermentación y bajando los rendimientos que se pudieran obtener sin los compuestos tóxicos e inhibidores (Gírio *et al.*, 2010; Klasson *et al.*, 2013).

Sin embargo, tiene algunas aplicaciones. Por ejemplo, los xiloglucanos y galactomananos de la hemicelulosa forman hidrocoloides, que son fuente de fibra y que también se han utilizado para aislar lectina (Sousa *et al.*, 2010). Algunos galactomananos se utilizan como gomas sin purificar, de las cuales la goma guar es una de las más importantes, para estabilizar emulsiones, en farmacéutica, en aplicaciones biomédicas y en la industria cosmética (Leung's Encyclopedia, 2010; Mudgil *et al.*, 2014). Se han preparado también hidrogeles basados en hemicelulosa y ácido acrílico, los cuales mostraron la capacidad de liberación de dos fármacos modelo; ácido acetilsalicílico y teofilina, la cual fue controlada por pH en condiciones fisiológicas similares a las del colon mientras que los fármacos no se liberaron en condiciones de pH similares a las del estómago (Sun, 2013). Debido a sus propiedades hidrofílicas, la hemicelulosa es menos utilizada para aplicaciones en materiales hidrofóbicos. Sin embargo, a partir de derivatización química o en mezcla con otros polímeros puede llegar a cambiarse su naturaleza hidrofílica expandiendo así las posibles aplicaciones (Farhat, 2016). Una aplicación con potencial para la industria de papel y recubrimientos es la hemicelulosa con lignina residual derivada de su pretratamiento cuando es entrecruzada con circonio, dando como resultado un gel para recubrimientos y con propiedades adhesivas que mejoró la resistencia al agua, el brillo y la suavidad de hojas de papel (Farhat, 2017).

Producción de químicos por fermentación

Se pueden obtener diversas moléculas a partir de la despolimerización de los materiales lignocelulósicos cuyo principal componente es la celulosa, la cual está compuesta exclusivamente de unidades de anhidroglucosa ligadas por enlaces tipo β -1.4-glicosídico. Por lo tanto, la glucosa es el principal azúcar (producto) obtenido de la despolimerización de la celulosa. Por su parte, la hemicelulosa es, después de la celulosa, el segundo polímero más abundante que compone a la biomasa

lignocelulósica. A partir de despolimerización de la hemicelulosa se obtienen azúcares de cinco carbonos (pentosas o C5) (Figura 1), tales como la xilosa y arabinosa, así como azúcares de seis carbonos (hexosas o C6) (Figura 1), tales como glucosa, manosa, galactosa, y ramnosa (Werpy *et al.*, 2004; Holladay *et al.*, 2007; Isikgor y Becer, 2015). Los azúcares C5 y C6 se consideran la principal materia prima de una biorrefinería, se usan principalmente para producir biocombustibles a partir de procesos de fermentación alcohólica, que llevan a cabo las levaduras, donde el producto final es el etanol y, en menor proporción, el butanol. Además de su principal uso como biocombustible, el etanol es considerado un químico de plataforma importante, debido a su alto volumen de producción esperado. Por otra parte, el etanol y butanol son precursores que pueden ser usados para producir olefinas por deshidratación y obtener etileno y butileno respectivamente (Isikgor y Becer, 2015).

La xilosa y arabinosa también pueden ser usadas para producir xilitol y arabitol, los cuales tienen potenciales usos en la industria de los alimentos, farmacéutica y química (Chandel *et al.*, 2010; Canilha *et al.*, 2006). Se han estudiado las condiciones óptimas para la producción de xilitol a partir de xilosa (Carvalho *et al.*, 2005; Mussatto y Roberto, 2008). El xilitol y arabitol han sido usados como endulzantes de bebidas, chicles y caramelos que no contienen azúcar, por lo cual ha sido recomendado para diabéticos, también pueden ser monómeros para la producción de polímeros e intermediarios (Rafiqul *et al.*, 2017; Lugani *et al.*, 2017).

Por otra parte, la producción de 2,3-butanodiol se ha reportado a partir de hemicelulosa con varios microorganismos como *Bacillus polymyxa*, *Klebsiella pneumoniae* e incluso en cocultivo con *Klebsiella pneumoniae* y *Trichoderma Harzianum* (Garg y Jain, 1995; Yu *et al.*, 1985).

La acetona es otro producto que puede ser obtenido por fermentación y también se considera un químico de plataforma importante, el cual es usado para producir monómeros derivados. El proceso de fermentación de acetona, butanol y etanol (ABE) (Figura 1) ha sido ampliamente estudiado en la comunidad científica e industrial. Sus productos derivados tales como el etileno, etilenglicol, butadieno propeno y cloruro de vinilo, tienen grandes aplicaciones en la química de los polímeros (Ezeji *et al.*, 2007).

Durante el pretratamiento de los materiales lignocelulósicos también se producen compuestos furfúricos, tales como el furfural y el hidroximetilfurfural (HMF), este último puede usarse para producir ácido levulínico. El HMF y su derivado el ácido 2,5-furano carboxílico (FCDA), se han considerado como una categoría aparte de bloques base, porque sus derivados son productos químicos prometedores para aplicaciones en la producción de polímeros. Por su parte el glicerol también tiene

su propia categoría de bloque base y a partir de esta molécula se puede producir manitol, etilenglicol, propanol, ácido acrílico, entre otros compuestos de interés químico y biológico. En conjunto la xilosa, arabitol y el furfural, son químicos de plataforma que pueden ser usados para la síntesis de furanos, tales como el tetrahidrofurano (THF), metil tetrahidrofurano, hidroxifuranos, ácido furanoico, entre otros, los cuales tienen aplicación en la producción de lacas, disolvente de resinas, estabilizantes y productos farmacéuticos (Werpy *et al.*, 2004; Holladay *et al.*, 2007; Isikgor y Becer, 2015).

Los ácidos orgánicos (Figura 1) son una plataforma de químicos derivados de azúcares que incluyen a los ácidos succínico, fumárico, málico, glutámico, cítrico, aspártico, levulínico, glutárico, itacónico, entre otros, y de los cuales se pueden obtener aminoácidos (L-Glutámico, L-Lisina, L-Treonina, L-Triptófano), ácidos carboxílicos y ésteres con potenciales aplicaciones en la industria de los alimentos. El ácido láctico es el ácido carboxílico más abundante en la naturaleza, y también es un químico de plataforma del cual se puede obtener acetaldehído, propilenglicol, lactatos y polímeros (Bozell y Petersen, 2010; Isikgor y Becer, 2015; Li y Xing, 2017).

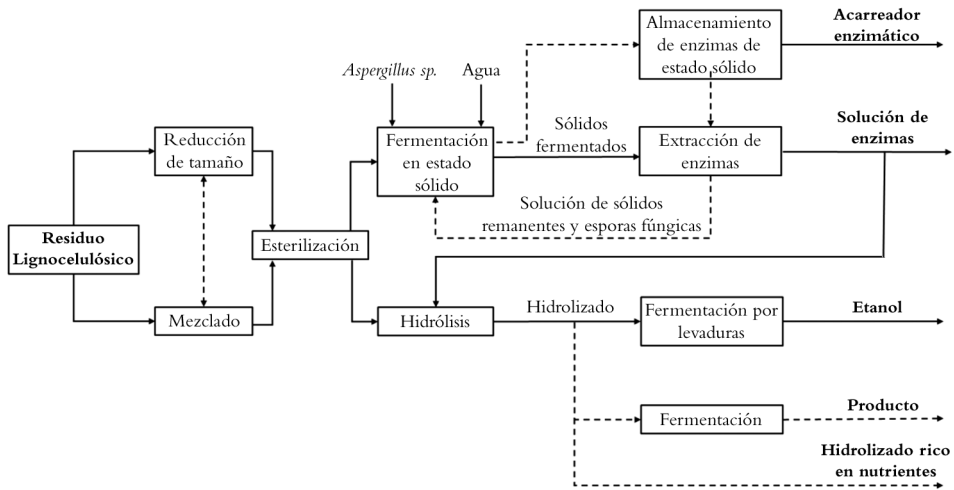
Producción de enzimas a partir de residuos lignocelulósicos

Los recientes estudios en procesos de fermentación en estado sólido (FES) han explorado una variedad de sustratos desde residuos agroindustriales hasta desperdicios de industrias tales como los de las papas fritas, los de elaboración de cerveza, industrias de procesamiento de granos, papel y madera (Tengerdy y Szakacz, 1998). Los desechos de aserrín y las virutas de madera tienen un gran potencial para la producción de celulasas y hemicelulasas. Sustratos como el bagazo de caña de azúcar, salvado de trigo, salvado de arroz, salvado de maíz, paja de trigo, paja de arroz, cáscara de arroz, cáscara de soya, hampa de sagú, recortes de la cosecha de la vid, aserrín, mazorcas de maíz, pulpa de coco, desechos de: plátano, de té, de yuca, de molienda de palma; pulpa de álamo, de remolacha azucarera, pulpa dulce de sorgo, orujo de manzana, harina de cacahuete, torta de colza, aceite de coco, torta de aceite de mostaza, harina de mandioca, harina de trigo, arroz al vapor, sauce pretratado con vapor y almidón, se han estudiado para aplicaciones de FES. En la Figura 3 se muestra una propuesta de bioproceso de FES para la producción de enzimas, bioetanol y otros productos con potencial de valor agregado.

Aunque se ha realizado mucho trabajo en sistemas de FES para la producción de enzimas de importancia industrial tal como proteasas, celulasas, ligninasas, xilanasas,

pectinasas, amilasas y glucoamilasas, también se han realizado estudios en procesos de FES para la producción de fitasas, esterasa ácida fenólica, aril-alcohol oxidasa, oligosacárido oxidasa, tanin acil hidrolasa y α -L arabinofuranosidasa (Tengerdy, 1998). A continuación, se hace referencia a enzimas importantes producidas por FES en residuos lignocelulósicos.

Figura 3. Propuesta de bioproceso para la producción de enzimas, bioetanol y otros productos de potencial valor agregado



Las líneas punteadas indican pasos opcionales en el proceso.

Fuente: adaptada de Melikoglu *et al.* (2013).

Celulasas y hemicelulasas

Las celulasas representan un grupo de enzimas capaces de romper la celulosa y forman parte de las endoglucanasas (1.4- α -D-glucano glucano hidrolasas), exoglucanasas o celobiohidrolasas (1.4- α -D glucan celobiohidrolasas y β - glucosidasa o celobiasas (α -D glucósido glucohidrolasas). Las celulasas tienen varias aplicaciones que van desde la extracción y/o clarificación de jugos de frutas y vegetales hasta el horneado de pan, elaboración de cerveza, desgaste de mezclilla y destintado de pulpa reciclada y papel.

Hay una gran cantidad de microorganismos capaces de degradar la celulosa. *Trichoderma reesei* es el hongo mesofílico más estudiado, ya han sido identificadas cinco endoglucanasas, dos celobiohidrolasas y una α -glucosidasa desde este microorganismo. Los otros organismos estudiados son *Aspergillus niger*, *Melanocarpus sp.*, *Scytalidium thermophilium* y *Thermoascus aurantiacus* (Kang *et al.*, 2004). Los estudios de producción en *Melanocarpus sp.* y *Scytalidium thermophilium* sugirieron que el perfil de expresión del complejo de celulasa en el hongo termófilo *Melanocarpus sp.* MTCC 3922 es regulado independientemente mientras que en *Scytalidium thermophilium* MTCC 4520 es co-regulado (Kaur *et al.*, 2006). Los desechos de cultivos agrícolas ricos en celulosa como paja de trigo, paja de arroz, mazorca de maíz, rastrojo de maíz, salvado de trigo, etcétera, son utilizados para la producción de celulasa.

De manera similar, la FES es ampliamente utilizada para la producción de hemicelulasas. Debido a la estructura heterogénea de los xilanos, los sistemas de enzimas degradadoras de xilano incluyen varias enzimas. Las más conocidas de éstas son las endo- α -1,4-xilanasas, las cuales atacan la cadena principal del xilanos, y las α -xilosidasas que hidrolizan los xilo-oligosacáridos a D-xilosa (Haltrich *et al.*, 1996). Las xilanasas tienen varias aplicaciones incluyendo la producción de oligosacáridos, la panadería, la recuperación de almidón a partir de harinas de trigo y ayuda en la extracción y clarificación de jugos de fruta. Las hemicelulasas también encuentran aplicación en la industria de alimento para ganado mejorando la digestibilidad y en la industria del papel y de la pulpa papelera en el biopulpeo ayudando a reducir el consumo de cloro para desarrollar un proceso más ecológico (Biely, 2003).

La producción de xilanasas es reportada recientemente para muchos sistemas fúngicos tales como *Thermomyces lanuginosus*, *Thermoascus aurantiacus*, *Aspergillus awamori*, *A. niger*, *A. oryzae*, *Penicillium canescens*, *Ceriporiopsis subvermispora*, *Melanocarpus albomyces*, *P. thermophila* J18 y *Trichoderma reesei* (Bakri *et al.*, 2003; Haltrich *et al.*, 1996; Park *et al.*, 2002). Los sustratos utilizados principalmente para la producción de xilanasas incluyen salvado de trigo, mazorcas de maíz, bagazo de caña de azúcar, pulpa de bagazo, licor de sulfito usado, paja de arroz, paja de trigo, harina de sorgo y pulpa de eucalipto (Fadel, 2001). Sin embargo, los materiales lignocelulósicos, especialmente el salvado de trigo, han tenido más éxito en la producción, atribuyéndose actividades enzimáticas (xilanasas) más altas debido a la naturaleza de su hemicelulosa, degradabilidad favorable y a la presencia de algunos nutrientes en la fuente de carbono (Sonia *et al.*, 2005). Además, se ha reportado que la paja de trigo es ideal para la producción de xilanasas en cultivos de *T. aurantiacus* y *Penicillium canescens* (Kalogeris *et al.*, 1999; Bakri *et al.*, 2003).

Ligninasas

Las ligninasas tienen aplicaciones en la deslignificación de materiales lignocelulósicos, que pueden usarse como materia prima para la producción de biocombustibles, pasta de papel y alimentos para animales. Éstas también se pueden usar en el blanqueo de la pulpa, la desintoxicación de aguas residuales de la fábrica de papel, la degradación de contaminantes o la conversión de la lignina en productos químicos valiosos (Szendefy *et al.*, 2006).

Las ligninasas comprenden un grupo de enzimas representadas por lignina peroxidasa (LiP, EC-1.11.1.7), manganeso peroxidasa (MnP, EC-1.11.1.13) y lacasa (EC-1.10.3.2). LiP y MnP son glicoproteínas que contienen grupo hemo que requieren peróxido de hidrógeno como oxidante. LiP oxida las estructuras de lignina no fenólicas mediante la remoción de un electrón y la generación de cationes, mientras que MnP oxida Mn^{2+} a Mn^{3+} , que luego oxida los compuestos fenólicos a radicales fenoxi. Esto conduce a la descomposición de la subestructura de lignina. Las lacasas son fenol oxidasas multicobre, que reducen el oxígeno a agua y simultáneamente catalizan la oxidación de contaminantes aromáticos como anilinas y fenoles. Se han desarrollado varios métodos que la utilizan, lacasa inmovilizada y el sistema de lacasa/mediador para el tratamiento de los efluentes textiles. Esta enzima decolora algunos colorantes azoicos sin división directa del enlace azo mediante un mecanismo de radicales libres altamente inespecífico, evitando así la formación de aminas aromáticas tóxicas. Recientemente se estudiaron las lacasas producidas a partir de diversos organismos como el hongo de pudrición blanca *Daedalea quercina*, *Stereum hirsutum* y *Peniophora* sp. y *Streptomyces cyaneus* para la decoloración de colorantes sintéticos (Baldrian, 2004) y el biopulpeo de virutas de madera blanda en FES (Wolfaardt *et al.*, 2004).

Galactosidasas y pectinasas

Es considerable el interés en producir α -galactosidasa (EC-3.2.1.22), β -galactosidasa (EC-3.2.1.23) y poligalacturoanasa (PG, EC-3.2.1.15) en procesos de FES. Estas enzimas tienen aplicación en las industrias farmacéutica y alimentaria. α -Galactosidasa (α -D-galactopiranosido galactohidrolasa EC 3.2.1.22) encuentra aplicaciones en industrias que van desde la producción de azúcar de remolacha hasta la hidrólisis de rafinosa y estaquiosa presente en soja, caupí y otros cultivos de leguminosas. La presencia de estos oligosacáridos es la causa de la diarrea y las flatulencias causadas

por el consumo de productos de soya y el pretratamiento con α -galactosidasa puede ayudar a mejorar sus aplicaciones en las industrias de alimentos y alimento de animales. *Aspergillus oryzae* se ha usado principalmente como fuente de α -galactosidasa. Aunque recientemente se han estudiado actinomicetos para la producción de α -galactosidasa, pero la ventaja relativa de *Aspergillus oryzae* como cepa GRAS (“generally recognized as safe”, designación para aditivos alimentarios seguros) hace que su enzima sea aceptable para aplicaciones de alimentos y en alimentos de animales.

Aunque, la producción de β -galactosidasa se ha estudiado con diversos organismos tales como *Trichoderma reesei*, *Aspergillus niger*, *Bifidobacteria*, *Lactobacillus acidophilus*, *Kluyveromyces fragilis*, *Kluyveromyces lactis* y *Kluyveromyces marxianus*; sólo *Trichoderma reesei* y *Aspergillus niger* se han estudiado en producción por FES empleando residuos agroindustriales. Los diversos sustratos utilizados para la fermentación incluyen arabinosilano, salvado de trigo y lactosa, etcétera, y se desea una mayor explotación utilizando FES.

Las pectinasas, un complejo de enzimas que degradan las pectinas, consisten principalmente en pectinmetilesterasas, endo y exo-poligalacturonasas, pectin liasas y provocan la desesterificación, la ruptura de la cadena y la ruptura del enlace glucósido; son ampliamente utilizadas por las industrias de frutas, vino y vegetales para diversas funciones tales como maceración, extracción, licuefacción, clarificación y valorización. *Aspergillus niger*, *A. carbonarius*, *A. Sojae* y *Rhizopus* sp. son los hongos más frecuentemente utilizados para la producción de pectinasa a nivel comercial (Patil *et al.*, 2006a; 2006b). Una variedad de sustratos tales como harina de soja y trigo, pulpa de remolacha azucarera, cabeza de girasol desgranada, orujo de naranja, pulpa de limón y bagazos de naranja y de caña de azúcar se han estudiado solos y en combinación para la producción de pectinasas (Patil, 2006c).

Amilasas

Las amilasas se pueden clasificar en general en dos clases principales de α -amilasa y glucoamilasa. La α -amilasa (endo-1,4- α -D-glucan glucohidrolasa, EC- 3.2.1.1) rompe aleatoriamente los enlaces 1,4- α -D-glucosídicos entre unidades de glucosa adyacentes en la cadena de amilosa lineal, y la glucoamilasa o amiloglucosidasa (exo-1,4- α -D-glucano glucanohidrolasa, EC-3.2.1.3) hidroliza unidades sencillas de glucosa de los extremos no reductores de la amilosa y la amilopectina en etapas. Las glucoamilasas son capaces de hidrolizar tanto los enlaces α -1,4 y α -1,6. Las enzimas tienen aplicaciones en las industrias de procesamiento de almidón, alimentos,

fermentación, textiles, detergentes y papel. Las amilasas se utilizan en la industria de la panificación para mejorar la calidad de la masa, en la industria de fermentación para la producción de glucosa para aplicaciones fermentativas, en productos farmacéuticos para la preparación de jarabes de glucosa y en la industria de alimentos para actuar como auxiliar digestivo. El *Aspergillus oryzae* ha sido el organismo preferido por α -amilasas fúngicas para aplicaciones alimentarias y farmacéuticas, mientras que tanto *Aspergillus* como *Rhizopus* sp. se han utilizado para la producción de glucoamilasa (Anto *et al.*, 2006). Los estudios recientes sugieren que las tortas de aceite como la torta de aceite de coco y la harina de soja, también se puede usar de manera eficiente en mezclados como sustrato en la fermentación para la producción de amilasa (Ramachandran *et al.*, 2004a; 2004b). Otros sustratos más caros como grano de cerveza, cascarilla de arroz, hojuelas de arroz, almidón de mandioca, bagazo de caña de azúcar, bagazo de naranja, melaza, salvado de arroz, harina de maíz, cereal de mijo, hojuelas de trigo, salvado de cebada, maíz triturado, mazorcas de maíz y aplastado de trigo también se han estudiado en FES (Silva *et al.*, 1989). Sin embargo, en la mayoría de los estudios se ha encontrado que el salvado de trigo es el mejor sustrato para la producción de amilasa en FES.

La producción de glucoamilasa fúngica ya se ha reportado utilizando fuentes de nutrientes baratos como el salvado de trigo, los residuos de té y la torta de aceite de coco (Ellaiah *et al.*, 2002). Sin embargo, recientemente se estudió el empleo de residuos de procesamiento de arroz (residuos gruesos, medianos y finos) junto con polvo de arroz para la producción de glucoamilasa. Los diversos aislados estudiados incluyen *Aspergillus* sp. HA-2, *Aspergillus niger*, *Scytalidium thermophilum*, *Aspergillus awamori*, *Rhizopus oligosporus* y *Thermomucor indicae-seudaticae*. Se reportó el hongo termófilo *Thermomucor indicae-seudaticae* para la producción de una glucoamilasa neutral y termoestable con una actividad óptima a 40 °C y pH = 7, cuando se cultiva en salvado de trigo humedecido con una solución salina en proporción 1:2.5 (p/v) complementado con 2% de torta de semilla de aceite de algodón (Kumar y Satyanarayana, 2004).

Fitasas

Las fitasas (myo-inositol hexakisfosfato fosfohidrolase, EC 3.1.3.8) catalizan la liberación de fosfato del fitato (myo-inositol hexakisfosfato). Varios granos de cereales, leguminosas y semillas oleaginosas, etcétera, tienen su fósforo almacenado en forma de fitato. El fósforo de fitato no es fácilmente accesible para animales monogástricos debido a la baja actividad de fitasa inherente y pasa al estiércol o heces. Las áreas

con alta densidad de ganado vacuno y porcino sufren de contaminación del agua subterránea debido al alto contenido de fósforo del fitato en el estiércol. La contaminación de los cuerpos de agua debido al alto contenido de fosfatos en el estiércol ha planteado serios problemas de floraciones de agua y crecimiento de productores de toxinas. Las fitasas tienen un valor significativo para controlar eficazmente la contaminación por fosfatos. Aunque la fitasa puede ser producida a partir de una multitud de fuentes que incluyen plantas, animales y microorganismos. Las fuentes microbianas, sin embargo, son prometedoras para sus explotaciones comerciales. Las cepas de *Aspergillus* sp., principalmente *A. ficuum* y *A. niger*, se han empleado con mayor frecuencia para fines industriales (Chantasartrasamee *et al.*, 2005; Krishna y Nokes, 2001). Además de éstos, *Rhizopus oligosporus*, *Rhizopus oryzae*, *Mucor racemosus* y *Aspergillus ficuum* también se han estudiado para la producción de fitasa (Bogar *et al.*, 2003; Sabu *et al.*, 2002). Dada la conveniencia de que la fitasa termoestable sobreviva al proceso de granulación de alimentos para animales, ahora se ha iniciado la búsqueda de fitasa termotolerante y ya se han hecho intentos para utilizar la ingeniería genética para manipular la fitasa a fin de que sea termoestable. El enfoque tradicional de hongos termófilos como *Sporotrichum thermophile* también se ha evaluado para la producción de fitasa termoestable. Estudios recientes sugieren que los residuos agroindustriales como las tortas de aceite de sésamo, de aceite de coco, de aceite de cacahuete y de aceite de soja son adecuados como sustrato único (Roopeh *et al.*, 2006) y en combinación para la producción de fitasa en condiciones de FES (Ramachandran *et al.*, 2005).

Conclusiones

La biomasa lignocelulósica de residuos derivados de actividades agrícolas e industriales es un recurso renovable invaluable, no sólo para la producción de biocombustibles sino para la obtención de productos de valor agregado. La obtención de bioetanol (de todas las generaciones) representa todavía algunos retos; sin embargo, hay avances en considerar a los residuos lignocelulósicos como materia prima dentro del esquema de biorrefinería y economía circular para la obtención de bioetanol de segunda generación y otros productos de valor agregado. Lo anterior implicaría eliminar controversias éticas alimentarias surgidas con la producción de bioetanol de primera generación. Si bien los principales polímeros de la lignocelulosa, celulosa, lignina y hemicelulosa, ya tienen varios usos en la actualidad, también se han desarrollado muchos estudios en donde se les utiliza como precursores de biomoléculas

para la producción química o biológica de otros químicos base que podrían sustituir a derivados del petróleo, para la obtención de materiales con alto valor agregado y con aplicaciones biomédicas, así como para la obtención de enzimas para síntesis, para las industrias del papel, alimentos, farmacéutica y que incluso tienen importancia ambiental.

Bibliografía

- Abitbol, T., A. Rivkin, Y. Cao, Y. Nevo, E. Abraham, T. Ben-Shalom, S. Lapidot y O. Shoseyov (2016). “Nanocellulose, a tiny fiber with huge applications”, *Current Opinion in Biotechnology*, núm. 39, pp. 76–88.
- Afrin, S. y Z. Karim (2017). “Isolation and Surface Modification of Nanocellulose: Necessity of Enzymes over Chemicals”, *Chembioeng Reviews*, núm. 4, pp. 289–303.
- Anto, H., U. Trivedi y K. Patel (2006). “Glucoamylase production by solid-state fermentation using rice flake manufacturing waste products as substrate”, *Bioresource Technology*, núm. 97, pp. 1161–1166.
- Bakri, Y., P. Jacques y P. Thonart (2003). “Xylanase production by *Penicillium canescens* 10–10c in solid-state fermentation”, *Applied Biochemistry and Biotechnology*, núm. 108, pp. 737–748.
- Balat M. y H. Balat (2009). “Recent trends in global production and utilization of bio-ethanol fuel”, *Applied Energy*, 86:(11), pp. 2273–2282.
- Balat M., H. Balat y C. Öz (2008). “Progress in bioethanol processing”, *Progress in Energy and Combustion Science*, 34:(5), pp. 551–573.
- Baldrian, P. (2004). “Purification and characterization of laccase from the white-rot fungus *Daedalea quercina* and decolorization of synthetic dyes by the enzyme”, *Applied Microbiology and Biotechnology*, 63:(5), pp. 560–563.
- Baumgartner, S., J. Kristl y N. Peppas (2002). “Network structure of cellulose ethers used in pharmaceutical applications during swelling and at equilibrium”, *Pharmaceutical Research*, 19:(8), pp. 1084–1090.
- Biely, P. (2003). “Diversity of microbial endo-B-1, 4-xylanases”, en S.D. Mansfield y J.N. Saddler (eds.), *Applications of Enzymes to Lignocellulosics*. Washington, D.C.: ACS Symposium Series 855, American Chemical Society, pp. 361–380.
- Bogar, B., G. Szakacs, A. Pandey, A. Sabu, J. Linden y R. Tengerdy (2003). “Production of phytase by *Mucor racemosus* in solid-state fermentation”, *Biotechnology Progress*, núm. 19, pp. 312–319.
- Borregaard Lignotech, Dye Dispersion Product Reference Guide, 2011.
- Bozell, J.J. y G. Petersen (2010). “Technology development for the production of biobased products from biorefinery carbohydrates—the US Department of Energy’s ‘Top 10’ revisited”, *Green Chemistry*, 12:(4), pp. 539–554.

- Canilha, L., W. Carvalho, J. Batista y A. Silva (2006). “Xylitol bioproduction from wheat straw: Hemicellulose hydrolysis and hydrolyzate fermentation”, *Journal of the Science of Food and Agriculture*, núm. 86, pp. 1371–1376.
- Carvalho, F., L. Duarte, S. Lopes, J. Parajó, H. Pereira y F. Gírio (2005). “Evaluation of the detoxification of brewery’s spent grain hydrolysate for xylitol production by *Debaryomyces hansenii* CCM1 941”, *Process Biochemistry*, núm 40, pp. 1215–1223.
- Cavalett O., T. Junqueira, M. Dias, C. Jesús, P. Mantelatto, M. Cunha, H. Franco, T. Cardoso, R. Maciel, C. Rossell y A. Bonomi (2012). “Environmental and economic assessment of sugarcane first generation biorefineries in Brazil”, *Clean Technologies and Environmental Policy*, 14:(3), pp. 399–410.
- Chandel A.K., O. Singh y L. Venkateswar Rao (2010). “Biotechnological Applications of Hemicellulosic Derived Sugars: State-of-the-Art”, en Singh O. y Harvey S. (eds.), *Sustainable Biotechnology*. Dordrecht: Springer.
- Chandrakant, P. y V. Bisaria (1998). “Simultaneous bioconversion of cellulose and hemicellulose to ethanol”, *Critical Reviews in Biotechnology*, 18:(4), pp. 295–331.
- Chantarasrasamee, K., D. Na Ayuthaya, S. Intarareugsorn y S. Dharmsthititi (2005). “Phytase activity from *Aspergillus oryzae* AK9 cultivated on solid-state soybean meal medium”, *Process Biochemistry*, núm. 40, pp. 2285–2289.
- Cook C. y A. Devoto (2011). “Fuel from plant cell walls: Recent developments in second generation bioethanol research”, *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 91:(10), pp. 1729–1732.
- Dias de Oliveira M.E., B. Vaughan y E. Rykiel Jr. (2005). “Ethanol as fuel: Energy, carbon dioxide balances, and ecological footprint”, *Bioscience*, 55(7), pp. 593–602.
- Ellaiah, P., K. Adinarayana, Y. Bhavani, P. Padmaja y B. Srinivasulu (2002). “Optimization of process parameters for glucoamylase production under solid-state fermentation by a newly isolated *Aspergillus* species”, *Process Biochemistry*, 38(4), pp. 615–620.
- Espino-Pérez E., S. Domenek, N. Belgacem, C. Sillard y J. Bras (2014). “Green process for chemical functionalization of nanocellulose with carboxylic acids”, *Biomacromolecules*, 15(12), pp. 4551–4560.
- Ezeji, T., N. Qureshi y H. Blaschek (2007). “Production of acetone-butanol-ethanol (ABE) in a continuous flow bioreactor using degermed corn and *Clostridium beijerinckii*”, *Process Biochemistry*, 42(1), 34–39.
- Expansión (2013). “El fabricante de ‘zumosoil’ se queda sin gasolina de las naranjas”, 16 de mayo de 2013.
- Farhat, W., R. Venditti, M. Hubbe, M. Taha, F. Becquart y A. Ayoub (2017/2016). “A review of Water-Resistant Hemicellulose-Based materials: Processing and applications”, *ChemSuschem*, 10(2), 305–323.

- Farhat, W., R. Venditti, Q. Ashley, M. Taha, N. Mignard, F. Becquart y A. Ayoub (2017). “Hemicellulose extraction and characterization for applications in paper coatings and adhesives”, *Industrial Crops and Products*, núm. 107, pp. 370-377.
- Figueiredo, P., K. Lintinen, A. Kiriazis, V. Hynninen, Z. Liu, T. Bauleth-Ramos y H. Santos (2017). “In vitro evaluation of biodegradable lignin- based nanoparticles for drug delivery and enhanced antiproliferation effect in cancer cells”, *Biomaterials*, núm. 121, pp. 97-108.
- FitzPatrick, M., P. Champagne, M. Cunningham y R. Whitney (2010). “A biorefinery processing perspective: treatment of lignocellulosic materials for the production of value-added products”, *Bioresource Technology*, 101(23), pp. 8915-8922.
- Garg, S.K. y A. Jain (1995). “Fermentative production of 2,3-butanediol: A review”, *Bioresource Technology*, 51(2-3), pp. 103-109.
- Girio F.M., C. Fonseca, F. Carvalheiro, L. Duarte, S. Marques y R. Bogel-Lukasik (2010). “Hemicelluloses for fuel ethanol: A review”, *Bioresource Technology*, 101(13), pp. 4775-4800.
- Goh C.S. y K. Lee (2010). “A visionary and conceptual macroalgae-based third-generation bioethanol (TGB) biorefinery in sabah, malaysia as an underlay for renewable and sustainable development”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(2), pp. 842-848.
- Gómez-Patiño B., R. López-Simeon, S. Espinosa Domínguez, M. Hernández-Guerrero, D. Arrieta-Baez, H. Beltrán Conde, J. Campos-Terán y D. Reyes Duarte (2012). “Aprovechamiento de residuos agroindustriales: composición, modificación enzimática y evaluación de sus potenciales aplicaciones” en Francisco J. Plou y Georgina Sandoval (eds.), *Obtención enzimática de ingredientes funcionales, compuestos bioactivos y nutracéuticos a partir de recursos naturales iberoamericanos*. Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas, pp. 77-108.
- Fadel, M. (2001). “High-level xylanase production from sorghum flour by a newly isolate of *Trichoderma harzianum* cultivated under solid-state fermentation”, *Annals of Microbiology*, 51(1), pp. 61-78.
- Haltrich, D., B. Nidetzky, K. Kulbe, W. Steiner y S. Zupancic (1996). “Production of fungal xylanases”, *Bioresource Technology*, núm. 58, pp. 137-161.
- Hearle, J.W.S. (1958). “A fringed fibril theory of structure of crystalline polymers”, *Journal of Polymer Science*, núm. 28, pp. 432-435.
- Hellmark H. y P. Söderholm (2017). “Innovation policies for advanced biorefinery development: Key considerations and lessons from Sweden”, *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 11(1), pp. 28-40.
- Hernández-Guerrero, M., D. Camacho, R. Quintero y Ramírez (2012). “Valor agregado a residuos cítricos UAM-C (DPT) para Daprona Mexico”, UAM-Cuajimalpa, reporte técnico.
- Hodasová, L., M. Jablonsky, S. Andrea y A. Haz (2015). “Lignin, potential products and their market value”, *Wood Research*, núm. 60, pp. 973-986.

- Holladay, J.E., J. White, J. Bozell y D. Johnson (2007). *Top value-added chemicals from biomass- Volume II-Results of screening for potential candidates from biorefinery lignin* (No. PNNL-16983). Estados Unidos: Pacific Northwest National Laboratory (PNNL), Richland, WA.
- Howard, R.L., E. Abotsi, E. Van Rensburg y S. Howard (2003). "Lignocellulose biotechnology: issues of bioconversion and enzyme production", *African Journal of Biotechnology*, 2(12), pp. 602-619.
- Hon, D.N.S. (1996). *Chemical modification of lignocellulosic material*. Nueva York: Marcel Dekker, pp. 197-227.
- Isikgor, F.H. y C.R. Becer (2015). "Lignocellulosic biomass: a sustainable platform for the production of bio-based chemicals and polymers", *Polymer Chemistry*, 6(25), pp. 4497-4559.
- Kalogeris, E., G. Fountoukides, D. Kekos y B. Macris (1999). "Design of a solid-state bioreactor for thermophilic microorganisms", *Bioresource Technology*, núm. 67, pp. 313-315.
- Kang, S.W., Y. Park, J. Lee, S. Hong y S. Kim (2004). "Production of cellulases and hemicellulases by *Aspergillus niger* KK2 from lignocellulosic biomass", *Bioresource Technology*, núm. 91, pp. 153-156.
- Kaur, J., B. Chadha y H. Saini (2006). "Regulation of cellulase production in two thermophilic fungi *Melanocarpus* sp. MTCC 3922 and *Scytalidium thermophilum* MTCC4520", *Enzyme and Microbial Technology*, núm. 38, pp. 931-936.
- Khan, Ikhlas A. y Ehab A. Abourashed (2010). *Leung's Encyclopedia of Common Natural Ingredients: Used in Food, Drugs and Cosmetics*. Nueva Jersey: Wiley.
- Kim, J., B. Shim, H. Kim, Y. Lee, S. Min D. Jang, Z. Abas y J. Kim (2015). "Review of nanocellulose for sustainable future materials", *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 2(2), pp. 197-213.
- Klasson K.T., B. Dien y R. Hector (2013). "Simultaneous detoxification, saccharification, and ethanol fermentation of weak-acid hydrolyzates", *Industrial Crops and Products*, núm. 49, pp. 292-298.
- Krishna, C. y S. Nokes (2001). "Influence of inoculum size on phytase production and growth in solid-state fermentation by *Aspergillus niger*", *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 44(4), pp. 1031-1036.
- Kumar, S. y T. Satyanarayana (2004). "Statistical optimization of a thermostable and neutral glucoamylase production by a thermophilic mold *Thermomucor indicae-seudaticae* in solid state fermentation", *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 20(8), pp. 95-902.
- Lavanya, D., P. Kulkarni, M. Dixit, P. Raavi y L. Krishna (2011). "Sources of cellulose and their applications- A review", *International Journal of Drug Formulation and Research*, núm. 2, pp. 19-38.
- Lewandowski, I., J. Clifton-Brown, J. Scurlock y W. Huisman (2000). "Miscanthus: European experience with a novel energy crop", *Biomass and Bioenergy*, 19(4), pp. 209-227.
- Levante-EMV (2013). "La planta de residuos de cítricos entra en concurso tras invertir 20 millones", 17 de mayo de 2013.

- Li, Q. y J. Xing (2017). “Production of 1, 4-Diacids (Succinic, Fumaric, and Malic) from Biomass”, en *Production of Platform Chemicals from Sustainable Resources*. Singapore: Springer, pp. 231–262.
- Liguora, R. y V. Faraco (2016). “Biological processes for advancing lignocellulosic waste biorefinery by advocating circular economy”, *Bioresource Technology*, núm. 215, pp. 13–20.
- Lin N. y A. Dufresne (2014). “Nanocellulose in biomedicine: Current status and future prospect”, *European Polymer Journal*, núm. 59, pp. 302–325.
- Liu, J., F. Cheng, H. Grénman, S. Spoljaric, J. Seppälä, J. Eriksson, S. Willför y C. Xu (2016). “Development of nanocellulose scaffolds with tunable structures to support 3D cell culture”, *Carbohydrate Polymers*, núm. 148, pp. 259–271.
- Lora, J.H. y W. Glasser (2002). “Recent Industrial Applications of Lignin: A Sustainable Alternative to Nonrenewable Materials”, *Journal of Polymers and the Environment*, núm. 10, pp. 39–48.
- Lugani, Y., S. Oberoi y B. Sooch (2017). “Xylitol: A sugar substitute for patients of diabetes mellitus”, *World Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences*, 6(4), pp. 741–749.
- Martina, B., K. Kateřina, R. Miloslava, G. Jan y M. Ruta (2009). “Oxycellulose: Significant characteristics in relation to its pharmaceutical and medical applications”, *Advances in Polymer Technology*, núm. 28, pp. 199–208.
- McCready N.S. y R. Williams (2007). “The Utilization of Agriculturally Derived Lignin as an Antioxidant in Asphalt Binder”, Proceedings of the 2007 Mid-Continent Transportation Research Symposium, Ames, Iowa.
- Melikoglu, M., C. Lin y C. Webb (2013). “Kinetic studies on the multi-enzyme solution produced via solid state fermentation of waste bread by *Aspergillus awamori*”, *Biochemical Engineering Journal*, núm. 80, pp. 76–82.
- Mousdale, D.M. (2008). *Biofuels: biotechnology, chemistry, and sustainable development*. Estados Unidos: CRC Press.
- Mudgil, D., S. Barak y B. Khatkar (2014). “Guar gum: Processing, properties and food applications—A review”, *Journal of Food Science and Technology*, 51(3), pp. 409–418.
- Müller M., E. Öztürk, Ø. Arlov, P. Gatenholm y M. Zenobi-Wong (2017). “Alginate Sulfate–Nanocellulose bioinks for cartilage bioprinting applications”, *Annals of Biomedical Engineering*, 45(1), pp. 210–223.
- Mussatto, S. e I. Roberto (2008). “Establishment of the optimum initial xylose concentration and nutritional supplementation of brewer’s spent grain hydrolysate for xylitol production by *Candida guilliermondii*”, *Process Biochemistry*, núm. 43, pp. 540–546.
- Octave S. y D. Thomas (2009). “Biorefinery: Toward an Industrial Metabolism”, *Biochimie*, núm. 91, pp. 659–664.
- Pan X., J. Kadla, K. Ehara, N. Gilkes y J. Saddler (2006). “Organosolv Ethanol Lignin from Hybrid Poplar as a Radical Scavenger: Relationship between Lignin Structure, Extraction

- Conditions, and Antioxidant Activity”, *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, núm. 54, pp. 5806-5813.
- Park, Y.S., S. Kang, J. Lee, S. Hong y S. Kim (2002). “Xylanase production in solid-state fermentation by *Aspergillus niger* mutant using statistical experimental designs”, *Applied Microbiology Biotechnology*, núm. 58, pp. 761-766.
- Patil, S.R. y A. Dayanand (2006a). “Production of pectinase from deseeded sunflower head by *Aspergillus niger* in submerged and solid-state conditions”, *Bioresource Technology*, 97(16), pp. 2054-2058.
- Patil, S.R. y A. Dayanand (2006b). “Optimization of process for the production of fungal pectinases from deseeded sunflower head in submerged and solid-state conditions”, *Bioresource Technology*, 97(18), pp. 2340-2344.
- Patil, S.R. y A. Dayanand (2006c). “Exploration of regional agrowastes for the production of pectinase by *Aspergillus niger*”, *Food Technology and Biotechnology*, 44(2), pp. 289-292.
- Pauly M., S. Gille, L. Liu, N. Mansoori, A. de Souza, A. Schultink y G. Xiong (2013). “Hemicellulose biosynthesis”, *Planta*, 238(4), pp. 627-642.
- Petersen, B.G. y N. Grundersen (2004). “Effect of Lignosulphonate Plasticizer on Rheological Properties of Ordinary Portland Cement with Fly Ashes”, *Annual Transactions of the Nordic Rheology Society*, núm. 12, pp. 39-46.
- Polymer Database (2015). Cellulose and Its Derivatives (Cellulose Esters and Ethers).
- Puppim de Oliveira, J.A. (2002). “The policymaking process for creating competitive assets for the use of biomass energy: The Brazilian alcohol programme”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 6(1), pp. 129-140.
- Pure Lignin Environmental Technology, Product Catalogue, 2011.
- Rafiqul, I.S.M., A. Sakinah y A. Zularisam (2017). “Hydrolysis of Lignocellulosic Biomass for Recovering Hemicellulose: State of the Art”, en *Waste Biomass Management. A Holistic Approach*. Cham: Springer, pp. 73-106.
- Ramachandran, S., A. Patel, K. Nampoothiri, S. Chandran, G. Szakacs, C. Soccol y A. Pandey (2004a). “Alpha amylase from a fungal culture grown on oil cakes and its properties”, *Brazilian Archives of Biology & Technology*, núm. 47, pp. 309-317.
- Ramachandran, S., A. Patel, K. Nampoothiri, F. Francis, V. Nagy, G. Szakacs y A. Pandey (2004b). “Coconut oil cake - a potential raw material for the production of alpha-amylase”, *Bioresource Technology*, núm. 93, pp. 169-174.
- Ramachandran, S., K. Roopesh, K. Nampoothiri, G. Szakacs y A. Pandey (2005). “Mixed substrate fermentation for the production of phytase by *Rhizopus* spp. using oilcakes as substrates”, *Process Biochemistry*, núm. 40, pp. 1749-1754.
- Rastogi, M. y S. Shrivastava (2017). “Recent advances in second generation bioethanol production: An insight to pretreatment, saccharification and fermentation processes”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, núm. 80, pp. 330-340.

- Rodsrud G., M. Lersch y A. Sjode (2012). "History and future of world's most advanced bio-refinery in operation", *Biomass and Bioenergy*, 46:46.
- Roopesh, K., S. Ramachandran, K. Nampoothiri, G. Szakacs y A. Pandey (2006). "Comparison of phytase production on wheat bran and oilcakes in solid-state fermentation by *Mucor racemosus*", *Bioresource Technology*, núm. 97, pp. 506-511.
- Sabu, A., S. Sarita, A. Pandey, G. Szakacs, B. Bogar y C. Soccol (2002). "Coconut oil cake as a substrate for the production of phytase by *Rhizopus oligosporus*", *Applied Biochemistry & Biotechnology*, núms. 102/103, pp. 251-260.
- Salami, M., M. Naeimi, S. Saber-Samandari, A. Khandan, M. Rafienia y F. Kaveian (2017). "Electrospun Polycaprolactone/lignin-based nanocomposite as a novel tissue scaffold for biomedical applications", (original article) *Journal of Medical Signals and Sensors*, 7(4), pp. 228-238.
- Shallom, D. e Y. Shoham (2003). "Microbial hemicellulases", *Current Opinion in Microbiology*, 6(3), pp. 219-228.
- Silva, E. y S. Yang (1998). "Production of amylases from rice by solid state fermentation in a gas-solid spouted-bed bioreactor", *Biotechnology Progress*, núm. 14, pp. 580-587.
- Sonia, K.G., B. Chadha e I. Saini (2005). "Sorghum straw for xylanase hyper-production by *Thermomyces lanuginosus* (D2W3) under solid-state fermentation", *Bioresource Technology*, núm. 96, pp. 1561-1569.
- Smith, H.D. (1940). "Cellulose Acetate Rayons Types, Properties, and Uses", *Industrial & Engineering Chemistry*, 32(12), pp. 1555-1559.
- Sousa, F.D., G. Martínez-Ávila, A. Monteiro-Moreira, C. Aguilar y R. Moreira (2010). "Biotechnological Perspectives of Plant Hemicelluloses", *Acta Química Mexicana*, 2:4.
- Sun, X., H. Wang, Z. Jing y R. Mohanathas (2013). "Hemicellulose-based pH-sensitive and biodegradable hydrogel for controlled drug delivery", *Carbohydrate Polymers*, 92(2), pp. 1357-1366.
- Szendefy, J., G. Szakacs y L. Christopher (2006). "Potential of solid-state fermentation enzymes of *Aspergillus oryzae* in biobleaching of paper pulp", *Enzyme & Microbial Technology*, núm. 39, pp. 1354-1360.
- Thakur, V.K. y M. Thakur (2015). "Recent advances in green hydrogels from lignin: A review", *International Journal of Biological Macromolecules*, núm. 72, pp. 834-847.
- Tengerdy, R.P. y G. Szakacs (1998). "Perspectives in agrobiotechnology", *Journal of Biotechnology*, núm. 66, pp. 91-99.
- Tengerdy, R.P. (1998). "Solid substrate fermentation for enzyme production", en A. Pandey (ed.), *Advances in Biotechnology*. New Delhi: Educational Publishers & Distributors, pp. 13-16.
- Thoorens, G., F. Krier, B. Leclercq, C. Brian y B. Evrard (2014). "Microcrystalline cellulose, a direct compression binder in a quality by design environment. A review", *International Journal of Pharmaceutics*, 473(1-2), pp. 64-72.

- Wang, C., S. Kelley y R. Venditti (2016). "Lignin-based thermoplastic materials", *ChemSusChem*, núm. 9, pp. 770-783.
- Watanabe, H. y G. Tokuda (2010). "Cellulolytic Systems in Insects", *Annual Review of Entomology*, vol. 55, pp. 609-632. Palo Alto: Annual Reviews.
- Werpy, T., G. Petersen, A. Aden, J. Bozell, J. Holladay, J. White y S. Jones (2004). *Top Value Added Chemicals from Biomass: Results of Screening for Potential Candidates from Sugars and Synthesis Gas*. Washington DC: Department of Energy, vol. 1 (No. DOE/GO-102004-1992).
- Whetten R. y R. Sederoff (1995). "Lignin Biosynthesis", *Plant Cell*, núm. 7, pp. 1001-1013.
- Wolfaardt, F., J. Taljaard, A. Jacobs, J. Male y C. Rabie (2004). "Assessment of woodinhabiting basidiomycetes for biokraft pulping of softwood chips", *Bioresource Technology*, núm. 95, pp. 25-30.
- Yadav, S.K. (2017). "Technological advances and applications of hydrolytic enzymes for valorization of lignocellulosic biomass", *Bioresource technology*, 245(Pt B), pp. 1727-1739.
- Yang, S.T., H. El-Ensashy y N. Thongchul (eds.) (2013). *Bioprocessing technologies in biorefinery for sustainable production of fuels, chemicals, and polymers*. Estados Unidos: John Wiley & Sons.
- Yu, E.k., L. Deschatelets, G. Louis-Seize y J. Saddler (1985). "Butanediol production from cellulose and hemicellulose by *Klebsiella pneumoniae* grown in sequential coculture with *Trichoderma Harzianum*", *Applied Environmental Microbiology*, 50(4), pp.924-929.
- Zakzeski, J., P. Bruijninx, A. Jongerius y B. Weckhuysen (2010). "The catalytic valorization of lignin for the production of renewable chemicals", *Chemical Reviews*, 110(6), pp. 3552-3599.
- Zdarta, J., Ł. Klapiszewski, M. Wysocki, M. Norman, A. Kołodziejczak-Radzimska, D. Moszyński y T. Jesionowski (2015). "Chitin-lignin material as Results a novel matrix for enzyme immobilization", *Marine Drugs*, 13(4), pp. 2424-2446.
- Zhang, L., A. dos Santos, E. Ximenes y M. Ladisch (2017). "Proteins at heterogeneous (lignocellulose) interfaces", *Current Opinion in Chemical Engineering*, núm. 18, pp. 45-54.
- Zhao Y. y J. Li (2014). "Excellent chemical and material cellulose from tunicates: diversity in cellulose production yield and chemical and morphological structures from different tunicate species", *Cellulose*, núm. 21, pp. 3427-3441.

Retos al desarrollo de biorrefinerías en México*

*Marcela Amaro Rosales
Diana Patricia Rivera Delgado*

Introducción

El cambio climático¹ es un fenómeno presente en la historia de la humanidad, pero en las últimas décadas ha comenzado a ser un problema internacional que ocupa el interés de la mayoría de la población. Comúnmente se solía pensar que los humanos no podían incidir en éste. Sin embargo, dadas las condiciones climáticas actuales y los desastres medio ambientales de los últimos años,² que pueden ser resultado del mismo cambio climático, se observó que la actividad humana tiene más injerencia de la que se había contemplado.

El cambio climático y las problemáticas socioambientales relacionadas están presentes de manera prioritaria desde el Protocolo de Kioto, el cual se adopta en 1997 y entra en vigor en 2005, además de diversas agendas de organismos internacionales como la Organización de las Naciones Unidas (ONU) y de muchos países

* El presente artículo es resultado del proyecto “Procesos sociales en la producción de la ciencia, tecnología y la innovación biotecnológica en México” (PAPIIT IA300818). Agradecemos el apoyo para su realización. La información aquí contenida está basada en entrevistas realizadas durante 2016 y 2017 con el ingeniero José María Ramos a quien agradecemos su colaboración y comentarios.

¹ Cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante periodos comparables (IPCC, 2007).

² Como temperaturas extremas (tanto mínimas como máximas), así como sus efectos en la flora, fauna y fenómenos meteorológicos. Ejemplo de ello son los fenómenos meteorológicos como los huracanes Patricia, Katrina, Paulina, Mitch, Stan, Félix y Manuel que son sólo algunas de las expresiones que han tenido lugar como resultado de los cambios climáticos.

que han participado en la conformación del Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). Dicho organismo propone escenarios y realiza evaluaciones sobre las condiciones climáticas, así como acciones a escala internacional relacionadas con el agua, la agricultura, la energía, entre otros. Ejemplo de dichas propuestas es la modificación de las fechas de siembra y plantación, reubicación de cultivos, promoción de la recogida de agua de lluvia, utilización de fuentes de energía renovable y cuidado de los suelos, para evitar en la medida de lo posible, más catástrofes relacionadas con el clima.

De acuerdo con el Informe de Cambio Climático 2007 del IPCC:

El calentamiento del sistema climático es inequívoco, como evidencian ya los aumentos observados del promedio mundial de la temperatura del aire y del océano, el deshielo generalizado de nieves y hielos, y el aumento del promedio mundial del nivel del mar. Observaciones efectuadas en todos los continentes y en la mayoría de los océanos evidencian que numerosos sistemas naturales están siendo afectados por cambios del clima regional, particularmente por un aumento de la temperatura.

Las causas del cambio climático tienen un componente natural y otro antropogénico, el cual refiere a todos aquellos efectos producidos por las actividades humanas en el clima, entre éstos se encuentran el proceso de industrialización, la deforestación como resultado de la rápida urbanización y la reconversión de tierras agrícolas para actividades ganaderas; aunque, en general, cualquier actividad humana tiene efectos en el medio ambiente.³ Sobre las causas naturales del cambio climático poco o nada puede hacerse, pero las causas antropogénicas pueden mitigarse, sobre todo con un esfuerzo enfocado a la disminución de los gases de efecto invernadero (GEI) y con la puesta en marcha de prácticas de desarrollo sustentable.

Uno de los factores de mayor impacto en el cambio climático es el uso de combustibles fósiles (petróleo, carbón, gas natural y gas licuado) ya que, si bien existen diversas fuentes energéticas renovables como la hidráulica, eólica, solar, geotérmica, mareomotriz, undimotriz, eólica y biomasa, el desarrollo tecnológico e industrial se ha concentrado en el uso de los combustibles fósiles. De acuerdo con datos de BP (2015), el consumo mundial total de energía en 2015 se distribuyó de la siguiente manera: el petróleo representa 32.9%, seguido del carbón con 29.2%, gas natural con 23.8%, hidroeléctrica 6.8%, nuclear 4.4% y renovables 2.8 por ciento.

³ Acciones que van desde el uso de productos como los aerosoles, hasta el transporte, así como las actividades industriales, tienen un efecto directo en el medio ambiente.

Como puede observarse, los combustibles fósiles dominan el consumo a escala mundial, sin embargo, es de todos conocido que este paradigma enfrenta graves problemas dada la caída del precio mundial del petróleo debido al auge del gas *shale* de Estados Unidos, lo que ha significado para este país lograr la autosuficiencia energética y dejar de ser el primer consumidor mundial de petróleo.

La extracción de petróleo presenta retos importantes porque, si bien en los últimos años se han descubierto yacimientos potenciales con importantes reservas en Estados Unidos, Malasia, Egipto, Angola, Canadá y México, su obtención depende de la técnica llamada *fracking*.⁴ Sin embargo, su uso genera controversia mundial por los efectos ambientales negativos que implica, tales como contaminación de aguas subterráneas y superficiales.

En México, la industria petrolera es un motor fundamental del desarrollo económico nacional; es necesario pensar en escenarios diversos que permitan al país disminuir su dependencia al recurso fósil y den pie a una transición energética que se traduzca en la diversificación industrial de la matriz energética y el cuidado del medio ambiente. En este sentido, algunos países de la Unión Europea y Estados Unidos han buscado sustitución de los combustibles fósiles por los biocombustibles; a pesar de que existe gran controversia sobre el impacto económico, productivo y medio ambiental que dichos combustibles puedan tener.

Sin dejar esto de lado, en este trabajo se parte de la hipótesis de que el desarrollo de biocombustibles y de biorrefinerías es una opción para México ya que podría contribuir a la diversificación de la matriz energética y así sentar bases para la transición energética propuesta institucionalmente en el país, reduciendo la dependencia a los combustibles fósiles y modernizando las fuentes energéticas que sean sustentables.

La pregunta de investigación refiere a ¿cuáles son los diversos retos que enfrenta el desarrollo de biorrefinerías en México? Por lo tanto, el objetivo de este artículo es mostrar el panorama tanto institucional como tecnológico en el que se desarrollan empresas que buscan participar en la producción de biocombustibles y analizar las principales barreras a la creación y desarrollo de biorrefinerías en México.

⁴ La fracturación hidráulica o *fracking* es una técnica que permite extraer el llamado gas de esquisto, un tipo de hidrocarburo no convencional que se encuentra literalmente atrapado en capas de roca, a gran profundidad. Luego de perforar hasta alcanzar la roca de esquisto, se inyectan a alta presión grandes cantidades de agua con aditivos químicos y arena para fracturar la roca y liberar el gas, metano. Cuando el gas comienza a fluir de regreso lo hace con parte del fluido inyectado a alta presión. Está técnica es utilizada para extraer tanto gas shail, como petróleo.

En la primera sección se definen los tipos de biorrefinerías. En la segunda se abordan las capacidades científicas, tecnológicas y el contexto institucional en las que se desenvuelve la problemática relacionada con las biorrefinerías en México, y en la tercera, se describe el caso de *Visel Biofuels*, un ejemplo nacional de biorrefinería.

Definición de tipos de biorrefinerías

Existen cuatro generaciones de biocombustibles y su clasificación depende del origen de la biomasa.⁵ Los de primera generación se obtienen a partir de cultivos alimenticios (caña de azúcar, maíz y soya); los de segunda se obtienen de residuos agrícolas o forestales, aceites vegetales o grasas animales; los de tercera generación son vegetales no alimenticios de crecimiento rápido y con alto contenido energético como las algas, pasto varilla o perenne así como maderas, acerrín, lignina y demás subproductos de la industria de la tala (Centro Mario Molina, 2016). La última generación relaciona materia prima genéticamente modificada (con grandes capturas de carbono) con microorganismos sintetizados genómicamente (Gómez, 2015).

La biomasa es el insumo fundamental para la producción de bioproductos y éstos se pueden llevar a cabo en las llamadas biorrefinerías, que integran procesos y tecnologías para producir sustancias químicas, biocombustibles, bioenergía y diversos productos (Centro Mario Molina, 2016). La característica fundamental es que busca aprovechar todos los componentes de la biomasa, bajo la modalidad de producción en cascada, de manera que la generación de residuos se minimice y puedan integrarse a diversas industrias para que los desechos de una sean usados por otra con la finalidad de lograr procesos productivos sustentables.

En las biorrefinerías pueden usarse las siguientes materias primas:

- Agrícola: cultivos energéticos y residuos agrícolas.
- Forestal: madera, cultivos energéticos y residuos de la industria de la madera.
- Industrial: subproductos y/o residuos de los procesos industriales.
- Doméstico: residuos orgánicos.
- Acuicultura: algas.

⁵ La biomasa es aquella materia orgánica de origen vegetal o animal, incluyendo los residuos y desechos orgánicos, susceptible de ser aprovechada energéticamente.

Los productos que se pueden generar se dividen en dos tipos (Bioenarea, ND):

- a) Productos energéticos compuestos por biocombustibles gaseosos que incluyen biogás, gas de síntesis, hidrógeno y biometano. Biocombustibles sólidos como pelets, lignina y carbón vegetal y biocombustibles líquidos: bioetanol, biodiésel y bioaceites.
- b) Productos químicos de base biológica como productos aromáticos, aminoácidos, xilitol, polialcoholes, ácidos y fenoles. Polímeros y resinas fenólicas y furánicas. Biomateriales como las fibras de celulosa, papel y madera, productos para la alimentación animal y humana y fertilizantes.

Hay dos tipos de biorrefinerías: las primeras producen energía y después buscan valorizar los residuos, y las segundas buscan producir cierto tipo de productos y utilizan los residuos o subproductos de la producción de energía. De éstos, también se pueden ubicar cuatro tipos de biorrefinerías de acuerdo con el tipo de biomasa que utilizan (Sagarpa, 2009):

1. Material lignocelulósico que proviene de los procesos termoquímicos y bioquímicos, sobre todo del sector forestal.
2. Cereal proveniente de las plantas de etanol que usan maíz, cebada o trigo.
3. Semillas oleaginosas del uso de materias primas como la canola, girasol y soya, de donde se obtiene como subproducto la glicerina, la cual puede usarse en el sector farmacéutico, químico, cosmético etcétera. Cabe mencionar que aquí también se puede considerar el uso de la *Jatropha* y la palma africana.
4. Material verde como pasto, alfalfa, trébol y cereales en fase temprana, yuca, papa, betabel y caña de azúcar.

Como puede observarse, hay una importante diversidad de biorrefinerías de acuerdo con el tipo de proceso o el tipo de resultado. Ello no excluye que existan modalidades que son una combinación de éstas, pero en términos generales se puede considerar que las mencionadas son las más importantes.

De acuerdo con el doctor Quintero (2017), a escala mundial se hacen grandes esfuerzos para avanzar en el tema de bioenergéticos. Existen 10 biorrefinerías a nivel mundial, nueve producen bioetanol y una bioplásticos. Pero cabe mencionar que, Estados Unidos, la Unión Europea, Canadá y Japón cuentan con estrategias nacionales para desarrollar industria basada en biomasa. Además, se han identificado proyectos

específicos para la implementación de biorrefinerías en Canadá, Brasil, Islandia, Reino Unido, España, Suecia, Francia, Alemania, Austria y Holanda (Sacramento *et al.*, 2010). Cada país ha planteado esquemas diversos, en algunos casos, son iniciativas privadas y en otros público-privadas y con diversas finalidades.

En México no se cuenta con ninguna planta que produzca biocombustibles. A pesar de esto, en diversos centros de investigación nacional se llevan a cabo varios proyectos de investigación que se encuentran en etapa experimental. Conocer las características del tipo de biorrefinerías permite definir el tipo de recursos y las capacidades científicas y tecnológicas que se necesitan para impulsar la formación y consolidación de las biorrefinerías en México; pero esto sólo es una parte del proceso, ya que es necesario definir la tecnología más viable para ello y en esto aún no hay punto de acuerdo.

Existen posiciones a favor del uso del bagazo de caña, en primer lugar, seguido por los desechos del agave y del maíz y, por otro lado, existen quienes argumentan que deberían desarrollarse enzimas (celulasas). Sin embargo, el país aún no cuenta con la tecnología industrial necesaria para la producción a gran escala (Quintero, 2017). Aunado a esto, el marco institucional energético mexicano no tiene como tema prioritario el desarrollo de biorrefinerías, ya que debido a la gran diversidad de recursos naturales con los que cuenta el país se ha apostado por otro tipo de energías renovables. Sin embargo, la energía derivada de la biomasa representa un potencial internacional, por lo que es necesario conocer el contexto mexicano para así determinar sus capacidades científicas y tecnológicas, así como también el marco institucional, para potencializar su desarrollo. En la siguiente sección abordaremos estos temas a fin de conocer el panorama para las biorrefinerías en México.

Capacidades científicas, tecnológicas y contexto institucional

El desarrollo de un sector tecnológico o de procesos innovadores requiere de insumos, en términos genéricos éstos se pueden denominar capacidades científicas y tecnológicas (Lall, 1992). En este trabajo se parte del hecho de que, para analizar y entender el desarrollo de las biorrefinerías, es necesario considerar al conocimiento como insumo fundamental, dado que su desarrollo depende en gran medida de los avances científicos. Pero además de insumos, se necesita un contexto institucional que establezca las reglas para los agentes participantes. Esto significa que haya regulaciones, instrumentos, políticas públicas y un entramado institucional que delimite o promueva su desarrollo. Así, en la investigación se retoman ambos aspectos

para analizar los principales retos que enfrentan la creación y desarrollo de biorrefinerías en el país.

a) Capacidades científicas

El concepto “capacidades científicas” da cuenta del conjunto de recursos y aptitudes desarrolladas por todos aquellos agentes involucrados con la ciencia, además de los resultados obtenidos (Amaro y Morales, 2016).

Existen diversos niveles de desarrollo de las capacidades científicas: en primer lugar, a nivel micro se localiza a los individuos y, por tanto, las habilidades de aprendizaje, investigación y transmisión del conocimiento por medio de distintos canales, ya sea físicos (libros, artículos, etcétera) u orales (conferencias e impartición de cátedra). En el siguiente nivel y a partir del anterior, se localizan las capacidades meso o intermedias que implican el desarrollo organizacional reflejado en el establecimiento de grupos de investigación en universidades, redes de colaboración y centros de investigación, además de la formación de recursos humanos especializados y los resultados de las colaboraciones como artículos y patentes (Amaro y Morales, 2016).

En general, el concepto de capacidades científicas evoca su uso en torno a un tipo particular de actores y a un tipo de conocimiento. En el nivel micro se considera a científicos, investigadores y estudiantes como los agentes que desarrollan este tipo de capacidades, donde el conocimiento científico es el objetivo primordial.

Para tener un panorama de las capacidades científicas, se retoman datos sobre posgrados que cuenten con alguna línea de investigación en biorrefinerías o áreas afines, investigadores del Sistema Nacional de Investigadores (SNI) relacionados con la temática y recursos humanos en general.

Actualmente el país cuenta con 42 programas de posgrado, inscritos en el Programa Nacional de Posgrados de Calidad, entre cuyas temáticas principales se encuentran los biocombustibles y de manera tangencial las biorrefinerías. La Ciudad de México oferta casi 30% de programas relacionados con el tema, seguida por Nuevo León, Chiapas y Yucatán.

Los posgrados tienen como objetivo la formación de recursos humanos de alto nivel en diversas áreas necesarias para el desarrollo de biorrefinerías, tales como: tecnología de las energías renovables, ingeniería en energía, administración, uso eficiente y fuentes de energía renovable, por mencionar algunos. Estas líneas de investigación son vitales para comprender y desarrollar la tecnología necesaria para

la construcción y uso de las biorrefinerías. En el Cuadro 1 se pueden observar las principales líneas de investigación de los programas de doctorado y maestría respectivamente.

De los 42 programas, tres tienen una orientación profesionalizante; dos son de reciente creación, y uno se encuentra en un nivel consolidado. De los 39 posgrados restantes, seis cuentan con un nivel de competencia internacional, 16 son programas consolidados, seis están en desarrollo y el resto son de reciente creación. La orientación y el nivel de los programas de posgrado resultan relevantes ya que se puede sugerir que las capacidades científicas y tecnológicas se consolidan a partir de la formación de recursos humanos altamente capacitados (Amaro *et al.*, 2011).

Cuadro 1. Principales líneas de investigación de programas de posgrado relacionados con energía renovable, nivel doctorado

LGAC PROGRAMAS DOCTORALES A NIVEL NACIONAL	LGAC PROGRAMAS DE MAESTRÍA A NIVEL NACIONAL
Desarrollo de materiales y dispositivos para aplicaciones a energía renovables	Tecnología de las energías renovables
Ingeniería ambiental y energías renovables	Fuentes renovables con control inteligente
Energías renovables	Potencia y energías renovables
Catálisis y energías renovables	Administración, uso renovable eficiente y fuentes de energía
Desarrollo de materiales para aplicaciones energéticas renovables	Energías alternas renovables
Ingeniería en energía	Integración de sistemas de generación y distribución de energías renovables
Bioingeniería	Energías renovables
Biotecnología, bioingeniería y contaminación ambiental	Desarrollo de materiales para aplicaciones energéticas renovables
Bioingeniería	Fuentes renovables
Biofísica y bioingeniería	Energías renovables y sustentabilidad
Bioingeniería y control de procesos	Ingeniería en energía
Bioingeniería	Biotecnología, bioingeniería y contaminación ambiental
Bioprocesos para la producción de biocombustibles	Bioingeniería
Biocombustibles y desarrollo sustentable	Biofísica y bioingeniería
Biotecnología industrial	Biopolímeros y bioingeniería Bioingeniería Biocombustibles Bioprocesos para la producción de biocombustibles Biocombustibles y desarrollo sustentable Biotecnología industrial

Fuente: elaboración con base en datos de Conacyt (2017).

Como se puede observar, a nivel doctorado dominan las líneas de investigación en energías renovables con distintas especificidades y la bioingeniería. Mientras que a nivel maestría hay una mayor diversidad en materia de sustentabilidad

Por otro lado, contar con especialistas del tema, que sean miembros del SNI, puede ayudar a comprender la complejidad relacionada con las biorrefinerías y los biocombustibles. Así como también se pueden promover políticas públicas informadas, ya que se puede consultar a los expertos nacionales en la temática.

En este sentido, el país cuenta con 84 investigadores en el tema, miembros del SNI, 67% son nivel 1, 6% nivel 2, 4% nivel 3 y el 24% restante son candidatos. De este universo académico sólo 0.3% investiga temas relacionados con la energía renovable, lo que es relevante ya que habla de un cambio en el que se busca sentar las bases para las futuras generaciones de investigadores. En la Gráfica 1 se muestran los investigadores relacionados con el área por institución.

Como se puede observar, existe una concentración del capital humano especializado en el centro del país, sin embargo, la distribución del resto de investigadores a lo largo de otras instituciones ubicadas en diversos estados da una visión optimista hacia la generación de capacidades científicas y tecnológicas.

Asimismo, se cuenta con redes temáticas financiadas por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología. Una de éstas es “Sustentabilidad energética, medioambiente y sociedad”, tiene como principal objetivo el análisis del sistema energético mexicano. Sus miembros buscan analizar las implicaciones de las políticas públicas y generar prospectivas del sistema energético mexicano hacia un desarrollo sustentable (Red Sumas, 2016). Se compone por investigadores, estudiantes y miembros externos, nacionales y extranjeros.

La segunda red es la “Red Mexicana de Bioenergía, A.C.”, cuyo objetivo es el desarrollo de conocimiento relacionado con la bioenergía. Esta red da asesoría especializada para gestión de proyectos y estudios de factibilidad para el sector privado, también participa en la discusión y evaluación de las políticas públicas relacionadas con la temática energética.

b) Capacidades tecnológicas

El concepto de “capacidades tecnológicas” generalmente utiliza a nivel micro para analizar la manera en que las empresas desarrollan, transfieren, imitan, adaptan y asimilan conocimiento tecnológico. Dicho concepto describe las habilidades más amplias que se requieren para iniciar un proceso de mejoras conducentes a un sendero

Gráfica 1. Investigadores relacionados con la temática de energía renovable y biocombustibles por institución



Fuente: elaboración con base en datos de Conacyt (2017).

de crecimiento y desarrollo sostenido. La definición de capacidades tecnológicas implica conocimientos y habilidades para adquirir, usar, absorber, adaptar, mejorar y generar nuevas tecnologías (Bell y Pavitt, 1995; Lall, 1992). Partiendo de esta definición, se entiende que las capacidades tecnológicas incluyen las capacidades de innovación y las capacidades de absorción (Lugones *et al.*, 2007).

El desarrollo de las capacidades tecnológicas es el resultado de inversiones realizadas por las empresas en respuesta a estímulos externos e internos, y en interacción con otros agentes económicos tanto privados como públicos, locales y extranjeros (Lall, 1992). Esto implica que en la construcción de capacidades tecnológicas hay factores específicos de la empresa y otros propios de un país dado (régimen de incentivos, estructura institucional y dotación de recursos—inversión física, capital humano y esfuerzo tecnológico).

Por lo tanto, el desarrollo de las capacidades es el resultado de la interacción compleja de la estructura de incentivos con los recursos humanos disponibles, los esfuerzos tecnológicos realizados y la incidencia de factores institucionales diversos. En función de ello, las capacidades tecnológicas aparecen en distintos niveles (Lugones *et al.*, 2007). Así, es posible identificar la acumulación de capacidades tecnológicas en el nivel microeconómico (en las firmas), pero también en el nivel nacional (macroeconómico) y sectorial (mesoeconómico).

En este trabajo se retoman como capacidades tecnológicas la infraestructura disponible a partir de los centros de investigación públicos, ya que tienen un perfil más marcado hacia la transferencia tecnológica a empresas, además se identificaron proyectos que han participado en las convocatorias Conacyt de fondos tecnológicos, esto permite tener un panorama del tipo de agentes y proyectos que se llevan a cabo en el país.

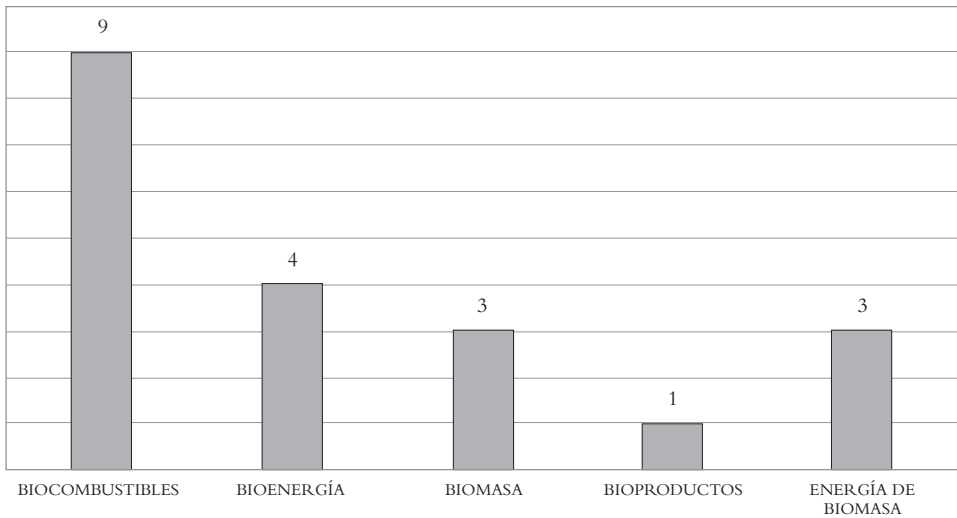
Como se puede observar en la Gráfica 2, en el periodo de 2013 a 2015 se cofinanciaron varios proyectos a partir de incentivos que ofrece el Estado a empresas que buscan desarrollar tecnología, en ese periodo se beneficiaron 20 proyectos que van desde la utilización de biomasa de residuos agropecuarios para generar energía, hasta el desarrollo tecnológico de sistemas de aprovechamiento y generación de biocombustibles.

Los proyectos se financiaron por medio de distintos instrumentos económicos que ofrece el Conacyt a empresas innovadoras. En la Gráfica 3 se puede observar la distribución de proyectos por tipo de modalidad de apoyo, para el mismo periodo.

Como se observa en la Gráfica 3, la modalidad PEI-Proinnova genera 80% de financiamiento a proyectos relacionados con los biocombustibles. Es relevante que se apoye la generación de este tipo de proyectos ya que México es un país a

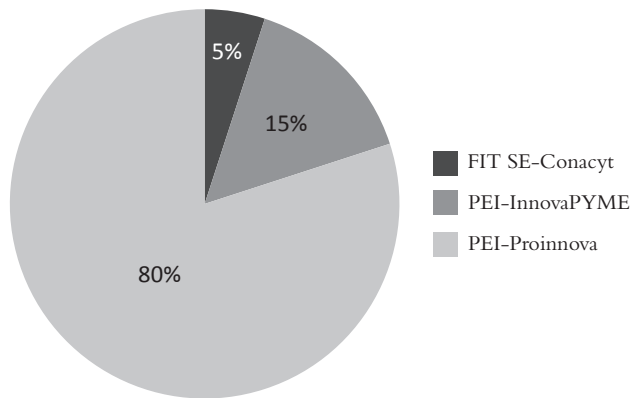
la vanguardia con respecto a las energías renovables, tal como lo estableció en la COP 16, demostrando lo avanzado de su agenda política con respecto a la temática. Estos proyectos han apostado a nuevas formas de obtención de energía, con el fin de continuar con el desarrollo económico y considerando el futuro climático del país.

Gráfica 2. Distribución de proyectos por tema, 2013-2015



Fuente: elaboración con base en datos del Conacyt (2016).

Gráfica 3. Distribución de proyectos por modalidad de financiamiento



Fuente: Elaboración con base en datos de Conacyt (2016).

En los últimos años, las universidades y centros de investigación han desarrollado proyectos de investigación que buscan la generación de capacidades y el desarrollo tecnológico en temas asociados con los bioenergéticos. Éstos son financiados principalmente por el Fondo de Sustentabilidad Energética, de la Secretaría de Energía y por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.

El Centro Mexicano de Innovación en Bioenergía (Cemie-Bio) está conformado por cinco *clústeres* (que pueden ser empresas, centros de investigación, laboratorios, interrelacionadas por un mismo sector industrial y/o tecnológico, que colaboran o establecen vinculaciones estratégicamente para obtener beneficios comunes), cada uno enfocado a alguna área de biocombustibles: biocombustibles sólidos, bioalcoholes, biodiésel, biogás y bioturbosina.

Los clústeres tienen un líder de proyecto diferente, y están conformados por grupos académicos y de investigación a nivel nacional, así como por empresas del sector y, en algunos casos, también por universidades de otros países.

El Clúster de Bioalcoholes (CB) es un proyecto de investigación aplicada, enfocado en el desarrollo de capacidades científicas y tecnológicas en biocombustibles lignocelulósicos para el sector autotransporte. Este proyecto busca vincular el sector productivo con otros grupos de investigación. El CB tiene como objetivo consolidar y transferir a corto plazo tecnologías hacia el sector industrial para la producción de bioetanol lignocelulósico segunda generación, a fin de que sea usado en el sector del autotransporte.

El líder de este proyecto es el Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, Unidad Guadalajara. Trabaja en coordinación con 11 grupos de investigadores mexicanos, así como con grupos de investigación adscritos al Departamento de Ingeniería de la Universidad de Oxford, Inglaterra; al Laboratorio de Investigación en Sistemas Biológicos del Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, Francia; al Centro de Biotecnología de la Universidad de Concepción, Chile; y al Laboratorio Europeo de Radiación Síncrotrón de Grenoble, Francia.

En el Cuadro 2 se mencionan otros proyectos relacionados con el desarrollo tecnológico de biorrefinerías, así como su objetivo y las materias primas que utiliza.

c) Marco institucional

La construcción de un marco institucional es fundamental para el impulso tecnológico. Éste brinda una estructura de leyes, programas, regulaciones, herramientas y

Cuadro 2. Proyectos relacionados con el desarrollo tecnológico de biorrefinerías

NOMBRE DEL PROYECTO	ESTADO	INSTITUCIÓN	MATERIA PRIMA	PRODUCTO	VINCULACIÓN	CONTEXTO INSTITUCIONAL Y FINANCIAMIENTO
Primera biorrefinería de México	Sinaloa	Universidad Autónoma de Sinaloa (UAS) Facultad de Ciencias Químico Biológicas	1. Piñón o <i>jarrophia</i> , para la obtención de biocombustible, bioetanol y bioturbinosa 2. Cáscaras de camarón	Biodiésel para el desarrollo de campos pesqueros, se busca el desarrollo de productos que satisfagan la demanda comercial	1. Academia e inversionistas 2. Universidad de Harvard	1. Secretaría de Energía 2. Banco Mundial
Biorrefinería y su investigación	Saltillo, Coahuila	Universidad Autónoma de Coahuila, Facultad de Ciencias Químicas- Departamento de Investigación en Alimentos	Biorrefinería de segunda generación a partir de residuos agroindustriales. De tercera generación a partir de microalgas	1. Investigación y desarrollo para la producción de bioetanol de tercera generación 2. Biorreactor columna para producción de biocombustible	1. Vinculación con otras instituciones para conformación del Clúster Bioalcohol es como parte del Centro Mexicano de Innovación en Bioenergía	1. Cemte Bioenergía 2. Secretaría de Energía

Cuadro 2. Proyectos relacionados con el desarrollo tecnológico de biorrefinerías

NOMBRE DEL PROYECTO	ESTADO	INSTITUCIÓN	MATERIA PRIMA	PRODUCTO	VINCULACIÓN	CONTEXTO INSTITUCIONAL Y FINANCIAMIENTO
Biorrefinería para la producción de biogás, biodiésel e hidrógeno a partir de microalgas y aguas residuales domésticas	Xalapa, Veracruz	1. Instituto de Ecología	Aguas residuales	1. Biomasa con alto valor agregado para la generación de biocombustibles 2. Metabolitos secundarios con aplicación en farmacéutica, acuicultura, complementos nutricionales o cosmetología	Universidades nacionales e internacionales: Universidad Nacional Autónoma de México, Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa, Universidad Autónoma de Nuevo León, Universidad de Almería, España Universidad de Florencia, Italia	Financiamiento por parte de las universidades
Aprovechamiento integral en un concepto de Sustentabilidad energética de subproductos de la cadena agave-requila Biorrefinería región occidente	Guadalajara, Jalisco	Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y diseño del Estado de Jalisco	1. Materiales agroindustriales	Producción de Bioenergía y productos de alto valor agregado	Cinvestav-Guadalajara, Centro de Investigación y Docencia Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo A.C.	1. Fondo Sustentabilidad Energética

Fuente: elaboración propia.

políticas que determinan las acciones permitidas y deseables frente a las que no lo son. En lo que respecta a México, desde 2005 se aprobó la iniciativa de Ley sobre el Aprovechamiento de Fuentes Renovables de Energía, en 2008 la Ley de Promoción y Desarrollo de Bioenergéticos (LPDB) en la que la prioridad estratégica es la producción de biocombustibles a base de cultivos de caña de azúcar, sorgo dulce y remolacha para la producción de etanol, y la jatrofa, higuerilla y palma de aceite para producir biodiésel (Sener, 2006, citado en Sacramento *et al.*, 2010). La LPDB establece como objetivo promover y desarrollar los bioenergéticos con el fin de coadyuvar a la diversificación energética y el desarrollo sustentable como condiciones que permiten garantizar el apoyo al campo mexicano e instituye las bases que promuevan la producción de insumos para bioenergéticos, con base en criterios de sustentabilidad y considerando un mayor impulso en zonas de alta y muy alta marginalidad, a partir de las actividades agropecuarias, forestales, algas, procesos biotecnológicos y enzimáticos del campo mexicano, sin poner en riesgo la seguridad alimentaria del país.

Además, se creó el Programa Especial para el Aprovechamiento de las Energías Renovables y Financiamiento para la Transición Energética (LAERFTE) y la Comisión Intersecretarial para el Desarrollo de los Bioenergéticos. Como se observa, en el país se han generado algunos instrumentos de política pública que tienen como objetivo potencializar el uso de energías renovables, entre los más recientes y sumados a los anteriores, se encuentran:

1. La Ley de Transición Energética (LTE). Algunos de sus principales objetivos son: i) reducir la dependencia a los combustibles fósiles para la generación de energía eléctrica; ii) el aprovechamiento sustentable de la energía en todos los procesos y actividades para su explotación; y iii) promover un conjunto de actividades, tales como investigación y desarrollo, diseño, fabricación y producción de tecnologías que promuevan el uso de energías renovables (Segob, 2015).
2. Fondo de Sustentabilidad Energética de la Secretaría de Energía (Sener). Tiene como objetivo facilitar el desarrollo del sector energético nacional a partir de cuatro líneas de acción; eficiencia energética, fuentes renovables, uso de tecnologías limpias y diversificación de fuentes primarias de energía (Sener, 2014).
3. Centros Mexicanos de Innovación en Energía (Cemie). Son un instrumento que busca impulsar las energías renovables y limpias a partir del fortalecimiento y vinculación de las capacidades científicas y tecnológicas del país. Los Cemie están integrados por instituciones de educación superior,

centros de investigación públicos y privados, así como empresas privadas y públicas integrantes de la industria eléctrica (INEEL, 2015).

4. De 2009 a 2012 se contó con el Programa de Producción Sustentable de Insumos para Bioenergéticos y de Desarrollo Científico y Tecnológico.

A pesar de que existen leyes y programas públicos que tratan de fomentar a las biorrefinerías en México, no existe una estrategia nacional integrada, con metas y objetivos claros. En este sentido, en el país se ha generado una serie de instrumentos institucionales que tienen como objetivo fomentar el desarrollo y uso de las fuentes de energía renovable, sin embargo, esta serie de lineamientos y leyes, entre otros, no mencionan cómo se van a operacionalizar, se habla en términos generales. Por ello, vale la pena retomar el análisis de fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas hecho por Sacramento *et al.* (2010) (Cuadro 3) ya que consideramos que las condiciones ahí analizadas no han cambiado de manera radical.

Cuadro 3. Fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas para las biorrefinerías en México

DEBILIDADES	FORTALEZAS
<p>No hay una estrategia nacional para el desarrollo de las biorrefinerías, existen, pero no son útiles. La inversión y el gasto federal en ciencia y tecnología ha ido disminuyendo. Pobre vinculación academia-industria. Pocas industrias nacionales que lideren el desarrollo de grandes infraestructuras productivas. Corrupción.</p>	<p>Alto porcentaje del gasto en I+D se ejerce por instituciones de educación superior. Producción científica de calidad. Experiencia en los criterios de sostenibilidad. Generación de algunos proyectos con inversión pública y privada. Marco regulatorio. Disponibilidad de biomasa. Capacidad instalada.</p>
AMENAZAS	OPORTUNIDADES
<p>Posible atraso y dependencia de Estados Unidos. Volubilidad de las directivas, estrategias y fondos. Posible opinión pública negativa por falta de información y campañas de desprestigio. Sobreuso de subsidios nacionales e internacionales.</p>	<p>Se puede aprender de la experiencia de otros países. Capacidad instalada en ingenios azucareros. Infraestructura para investigación aplicada. Avance de la tecnología en biomasa y aumento de los precios del petróleo.</p>

Fuente: modificado de Sacramento *et al.* (2010).

El caso de Víselsbiofuels

En este apartado se presenta el caso de la empresa VíselsBiofuels, su importancia radica en ser la iniciativa más visible en el país para establecer una biorrefinería. Cabe mencionar que, en México, los mayores avances en el tema están a cargo de centros

públicos de investigación o universidades, mientras que en la iniciativa privada, guiados por un enfoque de negocio, aún no se cuenta con registros de emprendimientos. Una de las principales limitaciones para el desarrollo de este tipo de proyectos por parte de los privados es la falta de capital semilla y/o financiamiento accesible para el desarrollo de emprendimientos científicos innovadores, y por lo mismo, la carencia, en la mayoría de los casos, de áreas dedicadas a la investigación que fortalezcan las capacidades científicas y tecnológicas de su capital humano.

Es importante mencionar lo anterior en este trabajo porque previamente en esta investigación se habla de una serie de condiciones que apuntan a la posibilidad de desarrollar biorrefinerías en México, dado que existen capacidades científicas y tecnológicas para ello. Sin embargo, para que se conviertan en negocios, es necesario un contexto institucional favorable, o por lo menos claro, que permita tener certidumbre sobre las posibles inversiones para su instalación.

VíselBiofuels nació como una iniciativa del ingeniero José María Ramos, quien laboró por cinco años en una de las empresas petroleras más importantes a nivel mundial, la Petrolera Nacional Saudi (Saudi Aramco) en Arabia Saudita, específicamente como ingeniero de procesos en plantas de conversión catalítica enfocado en las diversas refinerías del país.

Su experiencia y conocimiento sobre la producción de energía a partir de fuentes fósiles, hace que en 2015 surja la idea —en conjunto con otro ingeniero petrolero mexicano que también laboraba en la empresa— de regresar a México y producir biodiésel, aprovechando la reciente reforma energética en México. Después de seis meses de análisis se dieron cuenta de que era un emprendimiento con un alto grado de incertidumbre, ya que a pesar de que existían pocos productores en el país, no contaban con una ventaja competitiva (tecnológica o de negocios) para destacar sobre la competencia.

Asimismo, obtener la materia prima (aceite de cocina usado) representaba un problema ya que aún no existe un insumo barato ni cantidades suficientes para los niveles requeridos por los biodieseleros ya establecidos. La alta demanda de la materia prima y su oferta estática reducía los márgenes de utilidad de los productores actuales, forzándolos a enfocar su modelo de negocios en la recolección del aceite. Aunado a eso, enfrentaban el tema de la comercialización ya que el mercado aún estaba en una etapa temprana de desarrollo.

Dicha información parecía eliminar por completo la idea de emprender en ese nicho, sin embargo, en el proceso de análisis notaron que en la producción de biodiésel se genera un subproducto o desecho: glicerina de origen biológico con potencial de comercialización, por lo que se dieron cuenta de que existía un área de

oportunidad a partir de la compra a los productores de biodiésel de la glicerina, a la cual no se le estaba dando un uso alternativo y se consideraba un desperdicio. Cabe resaltar que la glicerina que produce el proceso del biodiésel está contaminada por varios productos del proceso del biodiésel. Cualquier entidad que quisiera aprovechar y aislar la glicerina a una pureza relativamente alta, requeriría someterla a un proceso de purificación, opción que los productores actuales de biodiésel no contemplaban, lo cual explica porqué la glicerina cruda es (o era) un desecho.

El área de oportunidad detectada implicó ubicar y contactar a los productores de biodiésel en México para entender sus necesidades y validar que en efecto ellos estarían interesados en vender su glicerina a un comprador constante. Entrar en contacto con los productores de biodiésel en México significó un reto fuerte ya que no existe en el país un directorio, grupo, entidad o forma directa de contactarlos, esto generó que la búsqueda se tornara artesanal y lenta. Al mismo tiempo, el ingeniero Ramos se encargó de establecer contactos con la Universidad de las Américas, en Puebla, de donde es egresado, para plantear una posible colaboración en un proyecto que investigara sobre la purificación de la glicerina. Así, de manera informal estableció relación con su ex director de tesis para dialogar y determinar la posibilidad de tener alumnos interesados en el tema, de la misma forma buscó la posibilidad de establecer un convenio formal con el Centro de Innovación Aplicada en Tecnologías Competitivas (Ciatec) o el Centro de Tecnología Avanzada (Ciateq) para realizar un proyecto de investigación.

Basados en el seguimiento del estudio de caso, se pueden estructurar varias etapas que señalan la manera en la que se ha desarrollado el emprendimiento. Una primera etapa consiste en la exploración de las oportunidades de negocio y de las opciones para realizar la investigación. Como se observa, hasta dicho momento el proceso estuvo permeado por un alto grado de incertidumbre, puesto que realizaron dos estudios de mercado que indicaron que no era un negocio rentable sólo producir la bioglicerina, ya que es un producto que compite por costos y el hecho de que sea de origen biológico no determina aún una diferencia radical para posicionarse de mejor manera en el mercado. En esta fase también se ubica la búsqueda de recursos científicos que les permitiera llegar a un prototipo susceptible de ser escalado en el futuro a costos competitivos para poder transformarla en diversos productos.

Gracias a los estudios de mercado se pudo determinar que la industria farmacéutica era una posible opción, dada la pureza del producto; sin embargo, convertirse en proveedor de dicha industria requería de inversiones que no estaban a su alcance. Todo esto llevó al ingeniero Ramos a concentrar sus esfuerzos en el tema de la glicerina, su purificación y comercialización para arrancar el proyecto de la

biorrefinería ya que ésta permite la posibilidad de generar productos derivados de la glicerina (además de comercializarla como un *commodity*) y entonces se abren distintas oportunidades de negocio y de comercialización.

Según la propia experiencia del ingeniero Ramos, debido a que no existen proyectos de integración exitosos o “biorrefinerías” que además de producir biodiésel aprovechen, purifiquen y den valor agregado a sus productos secundarios, la gran mayoría de productores de biocombustibles luchan para mantener un modelo de negocios rentable. Esto los estimula a buscar esquemas de negocios complementarios, por ejemplo, la realización de estudios ambientales o la venta de otros productos. A pesar de esto, las perspectivas del sector son positivas, ya que tanto los productores de biodiésel, como el ingeniero Ramos, coinciden en que es un área con muchas posibilidades de expansión a futuro, que los hace mantenerse en el negocio, a pesar de la baja rentabilidad que representa en estos momentos.

Hasta ahora, es importante destacar dos cosas: la primera es el problema de la disponibilidad de materias primas para desarrollar productos derivados y no sólo biodiésel, aunque la producción de este último enfrenta los mismos problemas. De acuerdo con diversas entrevistas realizadas, se observa que este es un punto central, dado que el país cuenta con capacidades científicas importantes para instalar biorrefinerías, pero no se cuenta con la oferta necesaria para cubrir las necesidades del mercado, ya que como se mencionó en la primera parte de este capítulo, se ha limitado la producción de biodiésel con cultivos alimentarios para no provocar problemas de desabasto.

En lo que respecta a la producción a partir de microalgas, tampoco se ha logrado el volumen necesario para hacerlo rentable. Por lo que en el caso de ViselBiofuels, la opción es usar el desperdicio de aceite de consumo humano, a partir de la producción de biodiésel. Además de los esfuerzos de integración de procesos por empresas como ViselBiofuels, se requiere de más emprendimientos que detonen proyectos que precisamente puedan ocupar el hueco, en la cadena productiva surtiendo aceites vegetales vírgenes y de bajo precio, que son de mejor calidad que el aceite de cocina usado, porque se procesan a menor costo y obtienen mejores productos.

Gran parte de los aceites comestibles que existen en el mercado mexicano son de semillas de Canola (*rapeseed*) importada de Canadá. A menos que el campo mexicano detone proyectos escalables con *jatropha*, palma y demás cultivos oleaginosos, el escalamiento y futuro del biodiésel en México siempre tendrá una barrera.

Después de esta primera fase que se ha denominado de “exploración”, comenzó la etapa identificada como de “búsqueda de inversión”, porque se focaliza en la exploración de recursos financieros para desarrollar el prototipo. Este proceso ha sido

soportado por la red de amigos y familiares del ingeniero Ramos, quien además ha participado en una serie de eventos privados nacionales e internacionales de capital ángel o semilla para poder acceder a más recursos, pero reconoce que esto no ha sido suficiente y el verdadero mecanismo de financiamiento han sido sus redes sociales, amigos y familiares.

Después de varias pláticas y negociaciones tanto con la Universidad de las Américas, Puebla, como con el Ciatec, el ingeniero Ramos decidió que su mejor opción para llevar a cabo el proceso de desarrollo de la tecnología a nivel de investigación básica (prueba de concepto) era con el Ciatec, el cual cuenta con un equipo completo de investigación en el tema, infraestructura adecuada, experiencia en lo que VísélBiofuels requería, además de tener mecanismos muy claros para establecer la vinculación.

Cabe destacar que esto sólo es una parte de la investigación y el desarrollo, porque aún estaba pendiente el escalamiento, el cual tiene implicaciones muy diversas, pues si bien a nivel laboratorio una tecnología puede funcionar, no es del todo seguro que ésta sea perfectamente escalable o que responda de la misma manera, además es necesario mencionar que no sólo se requiere el desarrollo de la tecnología y la escalabilidad, sino también el diseño puesta en marcha de la planta piloto (la segunda etapa del proceso de escalamiento).

En esta etapa el acceso a recursos ha sido fundamentalmente a partir de las redes sociales del propio ingeniero Ramos, quien estableció un mecanismo de venta de acciones de la empresa basado en una primera aproximación del valor de la empresa, considerando que a medida que la empresa genere derechos de propiedad intelectual, se revalorizarán las acciones.

Además de las distintas acciones para “levantar” capital, VísélBiofuels está en un proceso de incubación en el que cada semana atiende una asesoría formal con un asesor de la incubadora en términos financieros, para establecer un esquema a futuro que le permita acceder no solamente a recursos de su red social, sino a inversionistas formales.

De acuerdo con las diversas proyecciones de mercado que realizaron, consideran que no tienen la capacidad para ser proveedores de empresas grandes como las productoras de cosméticos o las farmacéuticas, ya que la falta de disponibilidad de materia prima es una limitante, pero aspiran a llegar a empresas medianas donde en un primer momento puedan convertirse en proveedores de glicerina y en una etapa posterior, una vez que se tenga establecida la biorrefinería, ofrecer productos finales.

El responsable de VísélBiofuels está consciente de que, aunque obtenga una ventaja competitiva con su tecnología de purificación de glicerina, tendrá que seguir

innovando no sólo para acoplar e integrar su concepto de biorrefinería, sino para mantenerse delante de la competencia. Por ello, la compañía ha adoptado una política de Integración de Procesos o “Forward Integration”, en la que buscará, en los años siguientes, continuar invirtiendo en investigación y desarrollo (I+D) para no sólo vender glicerina como un *comodity*, sino convertirlo en materiales de mayor valor en el mercado y llegar a comercializar:

- Bioplásticos
- Resinas
- Químicos de especialidad

Entre las muchas alternativas y productos –144 documentadas, que se pueden obtener de la glicerina–, se tiene especial interés en películas de plásticos degradables (bioplásticos) con las que empresas mexicanas experimentan, fabricando dichos bioplásticos a partir de desechos agrícolas y glicerina. Asimismo, existe gran interés en producir el polímero super absorbente para pañales (SAP por sus siglas en inglés), material responsable por absorber líquidos (absorbe entre 500–1 000 veces su peso en agua) que es importado y que pudiera fabricarse de manera local usando la glicerina como materia prima.

Sin embargo, la limitante fundamental es la obtención de la materia prima, dado que actualmente han localizado sólo alrededor de 15 productores de biodiésel en el país, que podrían convertirse potencialmente en proveedores para VísélBiofuels mediante la compra de sus desperdicios. Aunque esto no es del todo seguro ya que los residuos que éstos generan usualmente son vendidos con diversos usos, es justamente este factor el que los ha obligado a replantear el modelo de negocios pensando en que una vez que tengan la tecnología ésta puede instalarse en un punto donde se puedan recolectar los desperdicios o materia prima para la producción de glicerina y más allá de crecer en el mismo lugar, establecer pequeñas biorrefinerías que les permitan disminuir costos de recolección y transporte y así acceder a más materia prima.

Finalmente, y dado que la glicerina es un producto que en el mercado compete por costos, el ingeniero Ramos apuesta ahora a desarrollar una tecnología que sea más barata y de mejor calidad que las existentes en el mercado, y con menores implicaciones medioambientales relacionadas con el uso de energía. El tipo de negocio que plantea el ingeniero Ramos es una biorrefinería sencilla (expresado en sus propias palabras), dado que se refinaría un producto biológico para convertirlo en insumo de otros productos. Este es el primer objetivo, aunque sin duda espera escalarlo y avanzar hacia la diversificación en el mediano plazo. El reto que se

planteó para 2018, fue instalar la planta piloto y comenzar el proceso productivo, lo que constituiría la tercera fase.

El emprendimiento descrito ha transitado por diversas etapas y dificultades, sin duda, la más importante, la proveeduría de la materia prima, pero destacan varias cosas. La primera es que existen capacidades científicas y tecnológicas de alto nivel para llevar a cabo este proyecto, pero a pesar de la existencia de un contexto institucional, éste no ha influido en nada en las decisiones del emprendimiento, por lo que se sugiere que su impacto en las decisiones tomadas por la empresas no ha estado influenciada por la existencia de este marco, ya que las acciones han sido implementadas sin considerar siquiera su existencia. La segunda es la falta de financiamiento, no existen mecanismos suficientes para establecer, por medio de inversionistas privados, bases sólidas para un emprendimiento de este tipo. Si bien el ingeniero Ramos destaca que en el futuro espera participar en los fondos públicos, por ahora se ha concentrado en sus redes cercanas para capitalizar y así tener la base mínima requerida para someter un proyecto, sobre todo en el nivel de planta piloto.

Conclusiones

Se presentó un análisis basado en capacidades científicas, tecnológicas y en el marco institucional para el desarrollo de biorrefinerías en México. A partir de ello, y de los argumentos de los organismos internacionales, la puesta en marcha de biorrefinerías podría ser un mecanismo que coadyuve en el combate al cambio climático, brindando energía limpia y sustentable, aunque esto es un punto de debate entre los especialistas. Sin embargo, hoy se presentan barreras que dificultan el desarrollo y alcance de su potencial económico e innovador. En el caso de México se cuenta con potencial en la producción de biocombustibles, dado que las capacidades se encuentran en un estado de construcción por varios frentes, derivados de la búsqueda por la transición energética.

Por un lado, se apuesta a la generación de capacidades tecnológicas guiadas por la formación de capital humano especializado, en temáticas relacionadas con las energías limpias. Por otro, se inició con la complementación del marco institucional, ya que en los últimos años se generaron leyes y programas gubernamentales que tienen como objetivo estimular la transición de los agentes del sistema energético mexicano hacia el uso y desarrollo de energías renovables por medio de la tecnología, cuando todo el esquema económico y de producción están pensados para el uso de recursos fósiles no renovables.

Si bien el mercado para las biorrefinerías se encuentra en una etapa temprana de desarrollo, en particular para el caso de México se tiene el potencial para crear valor agregado a partir del desarrollo tecnológico y el uso de incentivos generados para el impulso a las nuevas empresas que opten por esta área, tal como el caso Vís-elBiofuels. Aun cuando todavía existen una cantidad de barreras importantes que sortear, la existencia de este tipo de empresas es alentadora.

Los principales retos para la instalación de biorrefinerías en México son:

- Estimular un marco institucional que incentive el uso y desarrollo de biocombustibles y la generación de tecnologías asociadas.
- Reducción de la incertidumbre relacionada con los productos derivados de la biorrefinería.
- Creación y fortalecimiento de mercados, así como también regulación en el precio de los insumos.
- Generación de incentivos financieros que promuevan y respalden los desarrollos de los empresarios de la bioenergía.

El estudio aquí presentado muestra que el establecimiento de una biorrefinería es un proceso complejo que requiere de inversiones considerables, y dado que el país no cuenta con esquemas de financiamiento para los negocios basados en alta tecnología, los emprendedores encuentran como primera opción recurrir a sus redes cercanas, familiares y amistosas para impulsar sus iniciativas. Esto sin duda constituye una barrera muy importante porque, aunque existen mecanismos de financiamiento por medio del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) con programas como los Estímulos a la Innovación (PEI), no son suficientes para asumir los riesgos que se enfrentan.

Si bien se esbozó un marco institucional para fomentar la transición energética, no existen directrices claras para la creación de biorrefinerías en el país, y predomina un ambiente incierto para los posibles emprendimientos. Destaca que los intentos por crear biorrefinerías proliferan en el medio académico, pero no en el privado, en gran medida por el problema que implica el abastecimiento de materias primas baratas, ya que en la actualidad aún no se cuenta con insumos económicamente competitivos que comparativamente con el mercado de los recursos fósiles represente una oportunidad de inversión. En algún sentido todo lo relacionado con los biocombustibles y lo que de ahí se puede generar, como las biorrefinerías, aún es una promesa que depende del abaratamiento de las materias y del desarrollo de un esquema de incentivos que permita realizar inversiones conjuntas entre el Estado y los empresarios interesados.

Bibliografía

- Amaro, M. y M.A. Morales (2016). “Sistema Sectorial de Innovación Biotecnológica en México: análisis y caracterización de sus principales componentes”, *Revista Redes*, núm. 42, Argentina.
- Amaro, M., A. Morales y D. Villavicencio (2011). “Problemas relacionados con los indicadores sobre formación de recursos humanos en ciencia y tecnología en México”, en Villavicencio *et al.* (coords.), *Dinámicas institucionales y políticas de innovación en México*. México: Plaza y Valdés/Concyteg/Conacyt/UAM [ISBN978-607-402-433-3].
- Bell, M. y K. Pavitt (1995). “The development of technological capabilities”, *Trade, Technology and International Competitiveness*, 22(4831), pp. 69-101.
- Bioenarea (ND). *Biorrefinerías. Una oportunidad de negocio para las zonas rurales y las industrias. Guía de actuación en las regiones participantes en el Proyecto BIOREF.*
- BP (2015) Annual Report and Form 20-F 2015 [<https://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/investors/bp-annual-report-and-form-20f-2015.pdf>].
- CARTIF, Diputación de Ávila, CERTH, IFSTA, EestiMaaulikool, INTERREG IVC, EU/UE.
- Centro Mario Molina (2016). *Análisis de la cadena de suministros de los biocombustibles líquidos. Resumen Ejecutivo* [http://centromariomolina.org/wp-content/uploads/2016/05/RE_CadenaSuministrosBiocombustiblesLiquidos.pdf].
- DG Research (2006). *FP7 Theme 2: Food, Agriculture, Fisheries and Biotechnology, 2007 work programme*. Bruselas: IWT-NCP.
- Gómez, G. (2015). “Desarrollo de biorrefinerías en el mundo”, *Revista Ciencia y Desarrollo*, pp. 34-57.
- INEEL (2015). *Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias*. From CemIE [<http://bit.ly/2tjxCeW>].
- IPCC (2007). *Cambio climático 2007: informe de síntesis. Contribución de los grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático* [Equipo de redacción principal: Pachauri, R.K. y Reisinger, A. (directores de la publicación)]. IPCC, Ginebra, Suiza.
- Lall, S. (1992). “Technological capabilities and industrialization”, *World Development*, 20(2), pp. 165-186.
- Lugones, G., P. Tutti y N. Le Clech (2007). *Indicadores de capacidades tecnológicas en América Latina*. México: CEPAL, Serie Estudios y Perspectivas 89.
- OCDE (2009). *The Bioeconomy to 2030: Designing a Policy Agenda*. París: OCDE.
- Quintero, R. (2017). “Retos y oportunidades de la biorrefinería en México”. Entrevista realizada por Carmen Báez. Agencia Informativa Conacyt.
- Red Sumas (2016). *Sustentabilidad Energética, Medioambiente y Sociedad* [<http://www2.ciicap.uaem.mx:8080/rs/index.html>].

- Sacramento-Rivero J.C., G. Romero, E. Cortés-Rodríguez, E. Pech y S. Blanco-Rosete (2010). “Diagnóstico del desarrollo de biorrefinerías en México”, *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, vol. 9, núm. 3, pp. 261–283.
- Sagarpa (2009). Programa de producción sustentable de insumos para bioenergéticos y de desarrollo científico y tecnológico.
- Segob (2015). Ley de Transición Energética, *Diario Oficial de la Federación*, 24 de diciembre [<http://bit.ly/1MyfXSG>].
- Sener (2014). *Fondo sustentabilidad energética* [<http://bit.ly/2sSfCst>].

Los autores

Graciela Carrillo González

Doctora en economía por la Universidad de Barcelona y maestra en economía y política internacional por el CIDE. Profesora-Investigadora en el Departamento de Producción Económica de la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Xochimilco. Miembro del Sistema Nacional de Investigadores nivel 1. Docente en la licenciatura en administración, en la maestría en Sociedades Sustentables y en el posgrado de economía y gestión de la innovación. Líneas de investigación: economía circular, ecología industrial y gestión ambiental.

Luis G. Torres Bustillos

Consultor en ingeniería ambiental. Doctor en ingeniería ambiental por la Facultad de Ingeniería de la UNAM y maestro en biotecnología (UNAM). Ha trabajado en prestigiosos institutos de investigación como el IBio/UNAM, el IMTA-Semarnat, el Instituto de Ingeniería-UNAM, el Instituto Mexicano del Petróleo y en el UPIBI-IPN.

José Ignacio Ponce Sánchez

Doctor y maestro en economía, gestión y políticas de innovación por la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Xochimilco. Entre sus publicaciones se encuentran *El neoextractivismo como modelo de crecimiento en América Latina* e *Identificación del potencial de los países de América latina para transitar hacia una bioeconomía basada en conocimiento*. Líneas de investigación: bioeconomía, vinculación universidad-empresa y extractivismo.

José de Jesús Brambila Paz

Doctor en economía y profesor investigador titular del Colegio de Postgraduados Campus Montecillo. Director adjunto de Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura (FIRA) y socio fundador de Consultores en Bioeconomía y Agronegocios S.A. de C.V.

María Magdalena Rojas Rojas

Doctora en economía por el Colegio de Postgraduados. Profesora investigadora titular del Colegio de Postgraduados Campus Montecillo y miembro del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), México.

Verónica Pérez Cerecedo

Profesora investigadora titular del Colegio de Postgraduados Campus Montecillo y miembro del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), México.

Noé Aguilar Rivera

Participa en los programas educativos del doctorado en ciencias agropecuarias (PNPC), y las maestrías en horticultura tropical (PNPC), manejo y explotación de los agro-sistemas de la caña de azúcar (PNPC), gestión ambiental para la sustentabilidad, así como en la ingeniería en agronomía y la licenciatura en biología. Miembro del Sistema Nacional de Investigadores nivel 2. Líneas de investigación: gestión ambiental en agroindustrias (sostenibilidad y competitividad, agroindustrias, biofabricas y bio-productos, ordenamiento territorial y geomatica, producción de hongos comestibles). Miembro del International Society of Sugar Cane Technologists, desde 2007; la Academia Mexicana de Investigación y Docencia en Ingeniería Química, desde 2000; de la Asociación de Técnicos Azucareros de México, desde 2013 y de la Red Mexicana de Bioenergía, desde 2019.

Ricardo Serna Lagunes

Doctor en ciencias en recursos genéticos y productividad-ganadería, especialidad en fauna silvestre por el Colegio de Posgraduados; maestro en ciencias en agroecosistemas tropicales (Colegio de Postgraduados) y licenciado en ciencias biológicas por la Universidad Veracruzana. Profesor de tiempo completo titular C en el Colegio de Postgraduados; miembro del Cuerpo académico UV-CA-489: Biotecnología, recursos genéticos y sustentabilidad. Líneas de investigación: manejo y conservación de recursos genéticos y biodiversidad en agroecosistemas.

Teresita de Jesús Debernardi Vázquez

Doctora en biotecnología agropecuaria por la Universidad Veracruzana. Profesora de asignatura en la Universidad Politécnica de Huatusco. Entre sus publicaciones más destacadas: Producción competitiva de setas comestibles a partir de biomasa de residuos no convencionales.

Teresa López Arenas

Doctora en ciencias y maestra en ingeniería química por la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa; licenciada en ingeniería química por la Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Miembro del Sistema Nacional de Investigadores nivel 1. Ex colaboradora del Centro de Investigación en Polímeros, realizó estancias posdoctorales en el Departamento de Ingeniería Química y Materiales de la Universidad de Cagliari; en el Programa de Matemáticas Aplicadas y Computación del Instituto Mexicano del Petróleo, así como en el CAPEC-Departamento de Ingeniería Química de la Universidad Técnica de Dinamarca. Es profesora invitada titular en la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Cuajimalpa, en el Departamento de Procesos y Tecnología de la División de Ciencias Naturales e Ingeniería. Líneas de investigación: modelado y simulación de procesos químicos y biológicos y estimación de estados y control no lineal; aplicaciones: reactores de polimerización, biológicos y catalíticos, destilación reactiva, diseño de biorrefinerías.

Omar Anaya Reza

Es ingeniero químico con maestría en ingeniería bioquímica y doctorado en energía y medio ambiente. Miembro del Comité Académico de Elaboración de Reactivos del Examen Intermedio de Licenciatura en Ciencias Básicas de Ingeniería (EXIL-CBI), es experto en simuladores como Excel, Polymath, Origin, Visio, VisSim, Visual Basic, MathCad, Wolfram Mathematica, MoT-ICAS, SuperPro Designer y Aspen. Como investigador ha publicado en revistas indexadas: Computers & Chemical Engineering, Bioprocess and Biosystems Engineering, y la Revista Mexicana de Ingeniería Química, entre otras.

Julio C. Sacramento Rivero

Profesor investigador titular C en la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Autónoma de Yucatán (UADY). Miembro del Sistema Nacional de Investigadores nivel 1. Participa como responsable y colaborador en los proyectos de investigación: Optimización de la productividad de lípidos en el cultivo fotoautotrófico de dos microalgas (UADY); Evaluación de sostenibilidad de la producción de aceite de jatropa

en Yucatán, México (UADY / Universidad Tecnológica de Michigan); Mejoramiento genético de *Jatropha curcas* para generar al menos una variedad con alto rendimiento agronómico, alto contenido de aceite y baja toxicidad para la obtención de biodiesel (CIATEJ Mérida/UADY/LODEMO/CICY). Es colaborador del Centro Mexicano de Innovación en Bioenergía (CEMIEBio).

Freddy S. Navarro Pineda

Ingeniero industrial por la Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá; maestro en ciencias en energías renovables por el Centro de Investigación Científica de Yucatán; doctor en ciencias químicas y bioquímicas por la Universidad Autónoma de Yucatán. Miembro del Sistema Nacional de Investigadores nivel 1. Experiencia docente y de investigación: simulación de procesos, evaluación económica y ambiental de proyectos, análisis de ciclo de vida ambiental, desarrollo sustentable.

Gemma Cervantes

Investigadora y catedrática en ecología industrial en Universidad La Salle, Guanajuato. Doctora en ciencias químicas y química inorgánica por la Universidad de Barcelona. Miembro del Comité de nominaciones de la ISIE- Sociedad Internacional de Ecología Industrial y coordinadora en REMEI-Red Mexicana de Ecología Industrial.

Estephanie de los Ángeles Solís

Ingeniera ambiental por la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco. Sus temas de interés son: ecología industrial, ACV, ciencias de la sostenibilidad, gestión ambiental, diseño, gestión y administración de proyectos. Supervisora ambiental en el proyecto Nuevo Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México, actualmente se desempeña como consultora de medio ambiente y proyectos (project manager) en planes vinculados del Instituto Politécnico Nacional.

Sylvie Turpin Marion

Ingeniero químico y doctora ingeniero por el Instituto Nacional de Ciencias Aplicadas de Tolosa, Francia. Es profesora-investigadora de la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, en el Departamento de Energía (licenciatura en ingeniería ambiental y maestría en ciencias e ingeniería ambiental). Sus líneas de investigación son la gestión integral de los residuos sólidos urbanos y la formación para la sustentabilidad.

Aleida Azamar Alonso

Doctora en economía internacional y desarrollo por la Universidad Complutense de Madrid; maestra en estudios latinoamericanos por la Universidad Autónoma de Madrid. Profesora investigadora de tiempo completo de la Universidad Autónoma Metropolitana. Presidenta de la Sociedad Mesoamericana y del Caribe de Economía Ecológica. Miembro del SNI nivel 1. Líneas de investigación: extractivismo, minería, conflictos socioambientales y sustentabilidad

Daniel Tagle Zamora

Doctor en economía por Universidad Autónoma Metropolitana y profesor de tiempo completo de la Universidad de Guanajuato. Sus líneas de investigación son: economía ecológica, economía política del agua, gestión y políticas ambientales, educación ambiental y gestión de residuos sólidos urbanos. Miembro del Sistema Nacional de Investigadores nivel 1.

Eulogio Castro Galiano

Doctor en ciencias químicas por la Universidad de Granada, máster oficial en energías renovables. Catedrático en la Universidad de Jaén en el Departamento de Ingeniería Química, Ambiental y de los Materiales. Socio fundador de la Sociedad Iberoamericana para el Desarrollo de las Biorrefinerías. Su actividad investigadora, enmarcada en el Grupo Ingeniería Química y Ambiental (TEP233) se centra en tres líneas: aprovechamiento de residuos agrícolas, producción de biocombustibles y otros compuestos; tratamiento de aguas residuales, y tecnología de producción de aceite de oliva.

Inmaculada Romero Pulido

Doctora en ciencias químicas por la Universidad de Jaén (UJA); maestra en energías renovables e ingeniera técnica en química industrial por la Universidad de Granada. Cuenta con grados en ciencias ambientales, ingeniería eléctrica y electrónica industrial, gestión y tratamiento de residuos y suelos. Actualmente es profesora titular de la UJA y coordinadora del área de tecnologías del medio ambiente, y pertenece al Grupo de Investigación en Ingeniería Química y Ambiental (TEP-233). Líneas de Investigación: biorrefinería a partir de residuos lignocelulósicos, eliminación de metales pesados de efluentes líquidos, nuevos materiales cerámicos sostenibles a partir de residuos, tecnología de aceites y grasas: aceite de oliva, y análisis de competitividad en el sector olivícola.

Encarnación Ruiz Ramos

Doctora y licenciada en ciencias químicas por la Universidad de Jaén (UJA), actualmente es profesora del Departamento de Ingeniería Química, Ambiental y de los Materiales e imparte clases en los grados de ciencias ambientales e ingeniería (UJA). Ha participado en proyectos de gran calado en el terreno de la investigación en diferentes universidades de España y otras partes del mundo; pertenece al Grupo de Investigación Ingeniería Química y Ambiental (TEP-233). Líneas de Investigación: biorrefinería a partir de residuos lignocelulósicos, eliminación de metales pesados de efluentes líquidos, nuevos materiales cerámicos sostenibles a partir de residuos, tecnología de aceites y grasas: aceite de oliva, y análisis de competitividad en el sector olivícola.

Arturo Alejandro Figueroa Montero

Ingeniero bioquímico industrial y doctor en biotecnología por la Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa. Tiene tres publicaciones internacionales en revistas indexadas, una patente (una más en proceso), tres capítulos de libro y 13 participaciones en congresos nacionales e internacionales especializados. Es profesor-investigador titular C del Departamento de Procesos y Tecnología de la Universidad Autónoma Metropolitana-Cuajimalpa. Miembro del SNI (Nivel C). Sus líneas de investigación: aprovechamiento y revalorización de residuos agroindustriales; modelamiento de la transferencia de calor y masa en bioprocesos de fermentación en medio sólido; y diseño y control de biorreactores para procesos de fermentación en medio sólido.

Gabriel Viguera Ramírez

Doctor en ingeniería química por la biotecnología en la Universidad Autónoma Metropolitana. Realizó una estancia de investigación en el Laboratorio de Ingeniería Bioquímica de la Universidade Estadual de Campinas en Brasil. Es técnico académico titular E de tiempo completo del Departamento de Procesos y Tecnología en la Universidad Autónoma Metropolitana-Cuajimalpa. Fue colaborador en las trasnacionales Samsung Electronics y Lundbeck, empresa especializada en medicamentos para el sistema nervioso. Sus líneas de investigación: biotecnología ambiental enfocada en los temas de “biodegradación de sustratos gaseosos en biofiltros fúngicos”; recuperación de biomoléculas de alto valor agregado a partir de procesos de tratamiento de contaminantes; y ablandamiento de residuos lignocelulósicos usando hongos filamentosos

Maribel Hernández Guerrero

Doctora en ingeniería química por la Universidad de New South Wales (Sidney, Australia). Realizó un posdoctorado en el Centre For Advanced Macromolecular Design de la Universidad de New South Wales en conjunto con la empresa Carl Zeiss Vision. Es profesora-investigadora titular C del Departamento de Procesos y Tecnología en la Universidad Autónoma Metropolitana-Cuajimalpa en la licenciatura en ingeniería biológica y el posgrado en ciencias naturales e ingeniería. Sus líneas de investigación: pretratamiento, extracción y revalorización de residuos agroindustriales para la obtención de materiales micro y nanoestructurados; formación de membranas porosas con estructura de panal; y modificación de propiedades de la superficie por medio de material polimérico.

Marcela Amaro Rosales

Investigadora de tiempo completo en el Instituto de Investigaciones Sociales de la UNAM. Licenciada en economía (UNAM); maestra en economía y gestión de la innovación, y doctora en ciencias sociales con especialidad en economía y gestión de la innovación por la Universidad Autónoma Metropolitana. Realizó una estancia posdoctoral en el Instituto de Investigaciones Sociales de la UNAM. Miembro de la Red Temática de Investigación Convergencia de Conocimiento para el Beneficio de la Sociedad, auspiciada por Conacyt, así como de la Red Latinoamericana para el Estudio de los Sistemas de Aprendizaje, Innovación y Construcción de Competencias (LALICS). Miembro del Sistema Nacional de Investigadores nivel 1.

Diana Patricia Rivera Delgado

Maestra en economía y gestión de la innovación por la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Xochimilco. Actualmente estudia el doctorado en ciencias sociales con especialización en el área de economía y gestión de la innovación en la misma casa de estudios. Sus principales líneas de investigación son la energía renovable, las políticas de CTI para la transición energética y la eco-innovación.

Biorrefinerías y economía circular, se terminó de imprimir en noviembre de 2019. En su composición se utilizaron tipos de la familia Bembo Std; el tiraje consta de 500 ejemplares impresos sobre papel cultural. Impresión: *mc editores*, Selva 53-204, Insurgentes Cuicuilco, 04530 Ciudad de México, tel. (52)(55) 5665-7163 [mceditores@hotmail.com].

*Sujeto Capital-Sujeto Revolucionario.
Análisis crítico del sistema capitalista*
Roberto Escorcia Romo (coord.)

Tendiendo puentes para una sustentabilidad integral
Aleida Azamar y Jaime Matus Parada (coords.)

Biorrefinerías y economía circular
Graciela Carrillo y Luis Torres Bustillos (coords.)

*Reconfiguraciones socioterritoriales:
entre el despojo capitalista...*
Gisela Espinosa Damián y Alejandra Meza Velarde
(coords.)

*Ecological Economics and Social-Ecological
Movements. Science, policy and challenges to
global processes in a troubled world*
Graciela Carrillo y David Barkin (coords.)

*Plan Nacional de Desarrollo y políticas públicas
2012-2018: evaluación y propuestas para el futuro*
Carlos Rodríguez Wallenius y Jorge Ruiz Moreno
(coords.)

*Nuestro cónsul en Lima: historia secreta de la
pérdida del Congreso de Panamá (1824-1828)*
Germán A. de la Reza

Políticas públicas y medio ambiente
Esthela Sotelo y Angélica Rosas (coords.)

*Tejido rural urbano: actores sociales emergentes
y nuevas formas de resistencia*
Beatriz Canabal y Martha Angélica Olivares
(coords.)

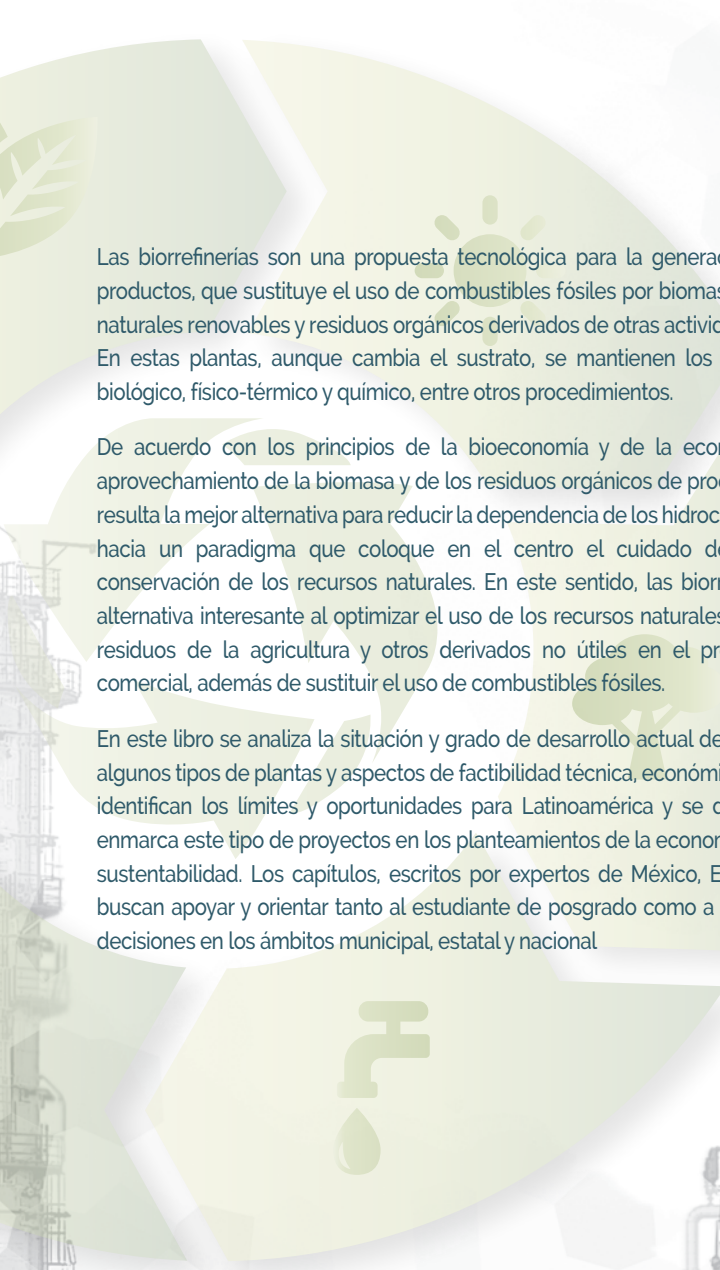
*Megaminería, explotación laboral
y acumulación de ganancia*
Aleida Azamar Alonso

*Sistema mundial, intercambio desigual
y renta de la tierra*
Jaime Osorio

*La reglamentación municipal como instrumento
de gestión*
Gerardo Zamora y Rigoberto Ramirez

Pueblos mágicos. Una visión interdisciplinaria IV
Liliana López Levi y Carmen Valverde (coords.)





Las biorrefinerías son una propuesta tecnológica para la generación de energía y productos, que sustituye el uso de combustibles fósiles por biomasa de los recursos naturales renovables y residuos orgánicos derivados de otras actividades productivas. En estas plantas, aunque cambia el sustrato, se mantienen los procesos de tipo biológico, físico-térmico y químico, entre otros procedimientos.

De acuerdo con los principios de la bioeconomía y de la economía circular, el aprovechamiento de la biomasa y de los residuos orgánicos de procesos productivos resulta la mejor alternativa para reducir la dependencia de los hidrocarburos, y transitar hacia un paradigma que coloque en el centro el cuidado del ambiente y la conservación de los recursos naturales. En este sentido, las biorrefinerías son una alternativa interesante al optimizar el uso de los recursos naturales y aprovechar los residuos de la agricultura y otros derivados no útiles en el proceso productivo comercial, además de sustituir el uso de combustibles fósiles.

En este libro se analiza la situación y grado de desarrollo actual de las biorrefinerías, algunos tipos de plantas y aspectos de factibilidad técnica, económica y ambiental; se identifican los límites y oportunidades para Latinoamérica y se describe cómo se enmarca este tipo de proyectos en los planteamientos de la economía circular y de la sustentabilidad. Los capítulos, escritos por expertos de México, España y Portugal, buscan apoyar y orientar tanto al estudiante de posgrado como a los tomadores de decisiones en los ámbitos municipal, estatal y nacional.

