

CARLOS ALBERTO GARCÍA BUSTAMANTE, OMAR MASERA CERUTTI

ESTADO DEL ARTE DE LA BIOENERGÍA EN MÉXICO

Red Temática de Bioenergía (RTB) del Conacyt



RED TEMÁTICA DE
BIOENERGÍA



CARLOS ALBERTO GARCÍA BUSTAMANTE, OMAR MASERA CERUTTI

ESTADO DEL ARTE DE LA BIOENERGÍA EN MÉXICO

Red Temática de Bioenergía (RTB) del Conacyt



RED TEMÁTICA DE
BIOENERGÍA



Estado del arte de la bioenergía en México

Publicación de la Red Temática de Bioenergía (RTB) del Conacyt.

© 2016, Carlos Alberto García Bustamante

© 2016, Omar Masera Cerutti

© 2016, Imagia Comunicación S. de RL. de CV.

Por características tipográficas y diseño editorial.

Facundo 1304, Col. Unidad Modelo, Guadalajara, Jal. CP. 44420

contacto@imagiacomunicación.com

Quedan rigurosamente prohibidas, sin la autorización de los titulares del "Copyright", bajo las sanciones establecidas en las Leyes, la reproducción parcial o total de esta obra por cualquier medio o procedimiento, comprendidos la reprografía y el tratamiento informático y la distribución de ejemplares de ella mediante cualquier alquiler o préstamos públicos.

ISBN: 978-607-8389-11-7

Impreso en México / *Printed in Mexico*

ÍNDICE

Prefacio	5
Lista de autores	6
Resumen ejecutivo	7
Introducción	9
La bioenergía en la transición energética	10
Hacia una estrategia nacional para la promoción de la bioenergía	12
Referencias	13
Recursos biomásicos	15
Definición y alcances	15
Situación internacional	15
Importancia actual y potencial para México	16
Biomasa forestal	16
Biomasa de residuos agrícolas	17
Perspectivas de uso de los recursos biomásicos por sector	20
Desafíos y barreras a superar	21
Prioridades de investigación y desarrollo	21
Referencias	22
Biocombustibles sólidos	23
Definición y alcances	23
Situación internacional	23
Importancia actual y potencial para México	24
Roles en la transición energética	26
Desafíos y barreras a superar	29
Prioridades de investigación, desarrollo y transferencia de tecnología	31
Bases para un programa nacional de investigación, desarrollo y transferencia de tecnología en biocombustibles forestales	32
Referencias	33
Biocombustibles líquidos	34
Definiciones y alcances	34
Bioetanol	34
Biodiésel	36
Bioturbosina	38
Biorrefinerías	39
Situación internacional	40
Importancia actual y potencial en México	46
Desafíos y barreras a superar en México	48
Prioridades de investigación, desarrollo y transferencia de tecnología	51
Referencias	52
Biocombustibles gaseosos	55
Definición y alcances	55
Biogás	55

Biohidrógeno.	56
Situación internacional.	56
Biogás.	56
Biohidrógeno.	57
Importancia actual y potencial situación para México	58
Biogás.	58
Biohidrógeno.	58
Roles en la transición energética	59
Biogás.	59
Biohidrógeno.	59
Desafíos y barreras a superar	60
Biogás.	60
Biohidrógeno.	60
Prioridades de investigación y desarrollo	61
Biogás.	61
Biohidrógeno.	61
Bases para un programa nacional de investigación y desarrollo	61
Referencias.	62
Sustentabilidad y políticas públicas de la bioenergía	64
Introducción	64
Análisis de sustentabilidad de los sistemas bioenergéticos.	64
Impactos ambientales de la bioenergía	65
Impactos socioeconómicos de la bioenergía	68
Iniciativas para la certificación de la sustentabilidad de la bioenergía.	69
Iniciativas de certificación internacionales	69
Iniciativas de certificación en México.	71
Escenarios de bioenergía	73
Políticas públicas en materia de bioenergía	75
Prioridades de investigación y desarrollo en sustentabilidad y políticas	77
Referencias.	78
Anexo A. Procesos de producción de biocombustibles líquidos	81
Bioetanol	81
Biodiésel.	84
Bioturbosina	91
Biorrefinerías	92
Cartera de proyectos estratégicos	94
Referencias	96
Anexo B. Impactos a la sustentabilidad de la bioenergía	99
Emisiones de gases de efecto invernadero (GEI)	99
Impactos en la calidad del aire.	100
Impactos sobre la disponibilidad de agua	101
Impactos económicos	102
Referencias	103

PREFACIO

Con este libro sobre el estado del arte de la bioenergía en México, la Red Temática de Bioenergía (RTB) del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt), y la Red Mexicana de Bioenergía (REMBIO), buscan dar un panorama sintético y actualizado de la situación de la bioenergía en México y su inserción en el contexto mundial.

Esperamos que sus contenidos contribuyan a brindar una visión de conjunto del desarrollo de la bioenergía en México, así como a discutir sus perspectivas futuras, sus potencialidades y sus retos.

Consideramos que la bioenergía es fundamental en la transición energética de México y que, desarrollada de manera sustentable, tendrá un rol importante en sus estrategias de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, así como en la reducción de la pobreza, la generación de ingresos en el campo y el desarrollo rural.

Agradecemos el apoyo otorgado por la Dirección de Redes de Investigación del Conacyt, que ha permitido editar este libro y realizar, entre otras actividades, la II Reunión Anual de la Red Temática de Bioenergía y la XI Reunión Nacional de la Red Mexicana de Bioenergía.

De igual forma, agradecemos la revisión general del documento a Francisco Mora Ardila.

Los coordinadores

Carlos Alberto García Bustamante
Omar Masera Cerutti

LISTA DE AUTORES

ENRIQUE ALARCÓN GUTIÉRREZ

Instituto de Biotecnología y Ecología Aplicada, Universidad Veracruzana

FELIPE ALATRISTE MONDRAGÓN

División de Ciencias Ambientales, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica A.C.

LORENA AMAYA DELGADO

Biotecnología Industrial, CIATEJ A.C.

LUIS FELIPE BARAHONA PÉREZ

Unidad de Energía Renovable, Centro de Investigaciones Científicas de Yucatán

GERMÁN BUITRÓN MÉNDEZ

Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México

JULIÁN CARRILLO REYES

Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México

JUAN CARLOS CHAVARRÍA HERNÁNDEZ

Unidad de Energía Renovable, Centro de Investigaciones Científicas de Yucatán

ROBERTO CONTRERAS

Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica

GABRIELA ALEJANDRA CUEVAS CASTILLO

Facultad de Ingeniería Química, Universidad Autónoma de Yucatán

CARLOS A. GARCÍA

Escuela Nacional de Estudios Superiores Unidad Morelia, Universidad Nacional Autónoma de México

ADRIÁN GHILARDI

Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México

NORMA LETICIA GUTIÉRREZ ORTEGA

División de Ingenierías, Universidad de Guanajuato

OMAR MASERA CERUTTI

Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad, Universidad Nacional Autónoma de México

LUIS ENRIQUE MENDOZA PUGA

División de Ciencias Naturales y Exactas, Universidad de Guanajuato

ESTHELA RAMOS RAMÍREZ

División de Ciencias Naturales y Exactas, Universidad de Guanajuato

ELÍAS RAZO FLORES

División de Ciencias Ambientales, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica A.C.

ENRIQUE RIEGELHAUPT

Red Mexicana de Bioenergía A.C.

JULIO CÉSAR SACRAMENTO RIVERO

Facultad de Ingeniería Química, Universidad Autónoma de Yucatán

GEORGINA SANDOVAL

Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco

ALMA HORTENSIA SERAFÍN MUÑOZ

División de Ingenierías, Universidad de Guanajuato

RAÚL TAURO

Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad y Posgrado en Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México

RESUMEN EJECUTIVO

Este libro resume la situación actual de la bioenergía en México y la coloca en un contexto global. Su finalidad principal es ofrecer un panorama general del desarrollo alcanzado por la bioenergía en México, e identificar sus retos, prioridades y necesidades a atender de manera inmediata en materia de investigación y desarrollo tecnológico, así como de políticas públicas y de normatividad.

Se enfoca en los recursos biomásicos disponibles con fines energéticos; las tecnologías probadas y posibles para su transformación en biocombustibles sólidos, líquidos y gaseosos que pueden utilizarse para la generación de calor, electricidad y combustibles para el transporte; la sustentabilidad de su producción y uso; los posibles escenarios futuros de su desarrollo en gran escala, los marcos regulatorios, así como las políticas públicas existentes y necesarias para su promoción.

La bioenergía tiene un potencial energético muy importante en México, que alcanza dos terceras partes del consumo de energía final del país. Asimismo, muchas de sus aplicaciones están asociadas a tecnologías maduras y, en muchos casos, rentables. Sin embargo, determinar con precisión el nivel de difusión futuro que podría tener la bioenergía en la matriz energética de México y evaluar sus impactos en el campo ambiental, económico y social, no es una tarea fácil, por varios motivos:

Por un lado, existe incertidumbre sobre la disponibilidad actual y futura de biomasa apta para uso energético: sus límites y condiciones físicas, tecnológicas, económicas y sociales son dinámicos, están fuertemente interrelacionados con otros sectores económicos, y en última instancia dependen de decisiones político-normativas.

Por otro lado, la bioenergía debe competir en un mercado abierto contra energías fósiles, que todavía son abundantes y baratas porque no internalizan sus costos ambientales —a diferencia de lo que se exige de las energías renovables, y esta es otra condición política—.

Y, por último, aunque ya hay un alto grado de maduración en las tecnologías de primera generación, las tecnologías avanzadas de segunda y tercera generación han tenido dificultades para alcanzar todas sus expectativas. Se esperaban rápidos saltos cualitativos en términos de eficiencia, costos y reducción de emisiones; sin embargo, los avances han sido en realidad lentos y estas tecnologías todavía no son maduras comercialmente.

Del análisis se desprende una serie de recomendaciones concretas en términos prácticos y de prioridades de investigación y desarrollo tecnológico. En particular:

- Es urgente mejorar el conocimiento sobre los recursos de biomasa; precisar sus potenciales de producción y uso energético, tomando en cuenta otros potenciales usos de estos recursos; evaluar objetivamente sus costos económicos, ambientales y sociales, y compararlos con los de otras opciones energéticas.
- México tiene muchas y variadas posibilidades para desarrollar bioenergía, pero para lograrlo se requiere aplicar en el corto plazo un conjunto favorable de medidas regulatorias, económicas y políticas con efectos inmediatos y con una visión de mediano y largo plazos.
- En el caso de las tecnologías de primera generación, la mayor parte de las barreras son económicas, pero para poder utilizar las de segunda y tercera generación falta todavía completar un proceso de demostración, adecuación y validación tecnológica y económica.

En cuanto a prioridades para investigación, desarrollo y transferencia de tecnología en el área de la bioenergía se identificaron:

- Cuantificar mejor los potenciales de bioenergía utilizables para aplicaciones y usos finales específicos en diferentes sectores de la economía nacional, y su capacidad efectiva para reducir emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), generar empleo y valor agregado, y reducir las importaciones de energéticos fósiles.
- Comprobar y validar las tecnologías de producción de materias primas para biocombustibles líquidos con cultivos dedicados no alimenticios en tierras degradadas o baldías.
- Desarrollar análisis tecnoeconómicos y de ciclo de vida de propuestas de biorrefinerías integradas que permitan obtener biocombustibles, energía, químicos y productos de alto valor agregado.
- Desarrollar procesos robustos, estables y con elevado rendimiento de biohidrógeno y biogás.
- Identificar y superar barreras para la adopción de tecnologías eficientes de uso de bioenergéticos en aplicaciones domésticas, comerciales e industriales, particularmente en el área de biocombustibles sólidos.
- Desarrollar metodologías, datos e indicadores que permitan la definición y evaluación de la sostenibilidad de sistemas de producción de biocombustibles, con énfasis en los impactos sociales.
- Investigar los fundamentos, diseños, costos y beneficios obtenidos por las políticas de promoción de bioenergéticos.

INTRODUCCIÓN

Carlos A. García, Enrique Riegelhaupt y Omar Masera

Actualmente, los combustibles fósiles son la principal fuente de energía primaria a nivel mundial. La fuerte dependencia global de esta fuente de energía tiene efectos adversos en el ambiente y en los seres humanos, y disminuye la seguridad energética; genera altas emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y otras emisiones contaminantes por la combustión de gas natural, carbón y derivados del petróleo, además de accidentes y derrames de petróleo durante su extracción, transporte o refinación, entre otros problemas. Buena parte de los conflictos bélicos de los últimos decenios obedecieron a conflictos por el acceso a los hidrocarburos, por regular su precio, o por la apropiación de las rentas petroleras.

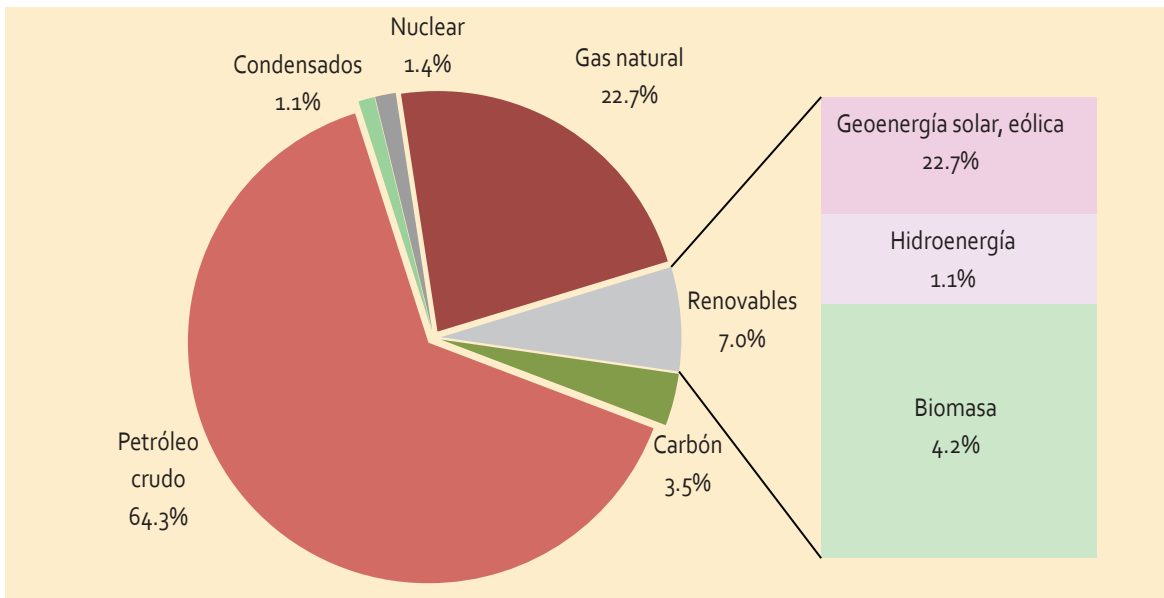
Estos problemas sociopolíticos y ambientales, en particular el problema del cambio climático global, han llegado a tal magnitud que los gobiernos han propuesto como estrategia global la eliminación del uso de los combustibles fósiles a finales del siglo XXI. Esto implica una transición energética radical, donde una parte crucial corresponde a las fuentes renovables de energía y, dentro de ellas, a la bioenergía.

Hoy en día, las fuentes de energía renovable proveen alrededor del 10% de la demanda de energía final, de la cual, la bioenergía es la fuente principal con una oferta de 55.6 EJ/año o el 47% del total de energía renovable (REN21, 2014). El 67% de la bioenergía se utiliza en el sector residencial y en usos tradicionales (cocción de alimentos en zonas rurales y periurbanas empleando leña, residuos agrícolas y estiércol). El 33% se usa con tecnologías modernas (incluyendo 23% para generación de calor) y el 10% remanente se divide entre biocombustibles líquidos y generación eléctrica (REN21, 2014).

México también debe acelerar su transición a las fuentes renovables de energía. Sin embargo, todavía falta un largo camino. Por un lado, México depende en un 91.6% de los combustibles fósiles para satisfacer sus necesidades de energía primaria. El petróleo representa el 64.3% de la demanda total, seguido del gas natural (22.7%) y el carbón (3.5%) (SENER, 2014) (ver Figura 1.1). Por otro, la caída en la producción de petróleo ha provocado que el gobierno mexicano priorice los esfuerzos para restituir las reservas y aumentar la producción de petróleo crudo y gas, por medio de la reforma energética (DOF, 2013). Sin embargo, existen serias dudas de que se logren estas metas, ya que persiste una alta incertidumbre sobre la verdadera dimensión física de las reservas, así como sobre la viabilidad económica y los impactos ambientales de su extracción.

Para lograr transitar a un sistema energético que no dependa de los combustibles fósiles se requieren distintas acciones coordinadas que incluyen cambiar los patrones de los usos finales de la energía (para iluminación, cocción, movilidad, etc.), aumentar la eficiencia energética, cambiar los hábitos de consumo, y utilizar fuentes de energía renovable como la solar, eólica, geotérmica, de los océanos y la bioenergía (Chum et al., 2011; Chu y Majumdar, 2012)

Figura 1.1. Estructura de la producción de energía primaria en México 2013



Fuente: SENER (2014).

LA BIOENERGÍA EN LA TRANSICIÓN ENERGÉTICA

Una de las fuentes de energía renovable considerada clave para transitar de un sistema energético basado en combustibles fósiles a uno basado en fuentes renovables es la bioenergía. Se estima que ésta puede jugar un papel importante en la transición energética mundial ya que a nivel global el potencial de la biomasa es de 135 a 340 EJ/año, lo que equivale a entre el 25 y el 60% del consumo mundial de energía en 2010 (Creutzig et al., 2015; Cornelissen et al., 2012).

La bioenergía es la energía obtenida de la biomasa, que es la materia constitutiva de los seres vivos, sus excretas y sus restos no vivos. Los biocombustibles se obtienen a partir de la biomasa, con mayor o menor grado de procesamiento. Entre estos últimos se distingue a:

- Biocombustibles sólidos (leña, carbón vegetal, residuos agrícolas, residuos forestales, *pellets*, briquetas): pueden quemarse directamente o previa gasificación o pirólisis, para producir calor y electricidad.
- Biocombustibles líquidos (bioetanol, biodiésel y bioturbosina): obtenidos de cultivos energéticos como caña de azúcar y oleaginosas o de aceite vegetal usado, grasas animales y otras fuentes.
- Biocombustibles gaseosos (biogás, biometano): obtenidos de los residuos municipales y estiércol; pueden generar calor y electricidad, localmente y en sistemas interconectados.
- Los bioenergéticos (o biocombustibles) también pueden ser clasificados de acuerdo a las tecnologías empleadas en su obtención (Tabla 1.1).

Tabla 1.1. Principales biocombustibles

Bioenergéticos	Sólidos	Líquidos	Gaseosos
1a generación	Leña, carbón vegetal, bagazo, pellets	Bioetanol, biodiésel, licor negro	Biogás, gas de síntesis
2a generación	Biochar, torrefactos, torpellets	Etanol celulósico, syndiésel, aceite de pirólisis.	Biometano
3a generación		Diésel de algas, etanol de algas	Biohidrógeno

La bioenergía presenta varias ventajas en comparación con otras fuentes de energía renovable (REMBIO, 2011):

- Es versátil, lo que permite satisfacer la mayor parte de los usos finales de la energía ya que puede brindar calor, electricidad en forma de combustibles sólidos, gaseosos y líquidos. Estos últimos son muy importantes para el sector transporte ya que permiten el uso de la infraestructura y los vehículos actuales.
- Es almacenable, lo que complementa la intermitencia de otras fuentes de energía renovable y presenta ventajas para aplicaciones de calor y producción de electricidad.
- Es escalable, lo que permite desarrollar sistemas de suministro energético a nivel hogar y a escalas mayores, con alcances locales, regionales, nacionales y hasta globales.
- Es comercialmente madura, porque muchas de las tecnologías para su producción están disponibles en el mercado.

Por otra parte, la bioenergía también presenta ventajas en comparación con las energías fósiles debido a sus potenciales impactos positivos en el ambiente, en la economía y en el desarrollo social. En términos ambientales, la bioenergía, si es desarrollada de forma adecuada, permite mitigar las emisiones de GEI al sustituir combustibles fósiles, además de evitar emisiones de metano por la descomposición anaerobia de biomasa (Chum et al., 2011); y podría reducir los daños ambientales asociados a una inadecuada disposición de desechos orgánicos al convertir éstos en combustible (Chum et al., 2011). En términos socioeconómicos puede promover la creación de empleo por medio de la producción de bioenergéticos (Dale et al., 2015). Además, el uso de leña en estufas mejoradas permitiría disminuir impactos negativos a la salud por la eliminación de humo intramuros y promovería mejoras en la calidad de vida por el ahorro de tiempo en la recolección de biomasa (García-Frapolli et al., 2010).

La participación actual de la bioenergía en la oferta de energía primaria en México es del 4.2% del total, y del 60% de la proveniente de fuentes renovables (SENER, 2014). Actualmente las tecnologías utilizadas para el aprovechamiento energético de la biomasa en el país son en su mayoría ineficientes, y algunas generan impactos negativos en la salud y el ambiente (REMBIO, 2011). La biomasa es la mayor fuente de energía renovable en México, principalmente debido a la leña en usos tradicionales (67.3% de esta participación) y al bagazo de caña empleado para la cogeneración en los ingenios azucareros (3 2.7%) (SENER, 2014).

En cuanto a las oportunidades para la bioenergía en México, se estima un potencial de producción sustentable de 3,000 a 3,459 PJ/año (García et al., 2013; Johnson et al., 2009; Ríos y Kaltschmitt, 2013), sin utilizar tierras actualmente dedicadas a la producción de alimentos y respetando las áreas naturales protegidas al igual que las coberturas vegetales con altos contenidos de carbono. Esta cifra equivale al 69% del consumo de energía final en el año 2012 o al 38% de la producción de energía primaria de México.

La experiencia de otros países —como Brasil, Dinamarca, Suecia, entre otros.— demuestra que es posible aprovechar la biomasa empleando tecnologías eficientes, aportando así a la transición energética del país y a la mitigación de emisiones de GEI (Johnson et al., 2009; REMBIO, 2011).

Algunos estudios señalan que México solo podrá lograr sus metas de mitigación para 2030 y 2050 con una importante participación de la bioenergía, especialmente en los sectores eléctrico, transporte, industrial, residencial, agrícola y cambio de uso de suelo (García et al., 2015; Islas et al., 2007; Johnson et al., 2009; Octaviano et al., 2015; Versey et al., 2015). Para poder materializar esas metas de mitigación, y lograr una transición energética a fuentes renovables de energía, será necesario adoptar metas mucho más ambiciosas para la bioenergía que las previstas hasta ahora a nivel gubernamental. Por ejemplo, difícilmente se logrará una mitigación importante de emisiones de GEI, ni una sustitución significativa de combustibles fósiles cuando la meta gubernamental más ambiciosa es una Prueba de Concepto para introducir 390 millones de litros (ML) al año o 1.1 ML/día de etanol hasta 2019, que equivale a menos de 1% del consumo total de gasolina en el país. Como argumentaremos en este volumen, México se beneficiaría enormemente de una política mucho más agresiva de innovación y sobre todo de desarrollo comercial de la bioenergía en su diversidad de aplicaciones —generación de calor y electricidad, biocombustibles para el transporte y la industria— siempre bajo una lógica de sustentabilidad ambiental y social.

HACIA UNA ESTRATEGIA NACIONAL PARA LA PROMOCIÓN DE LA BIOENERGÍA

La experiencia de otros países demuestra que es posible utilizar la biomasa para satisfacer una gran cantidad de usos finales energéticos, lo que aporta a la diversificación energética del país y a su desarrollo económico y socialmente sustentable. Para materializar estos beneficios es importante trabajar simultáneamente en cinco ejes estratégicos:

1. Desarrollo de un marco regulatorio. Se debe fortalecer el marco legal y jurídico para fomentar el uso sustentable de la bioenergía, es necesario desarrollar regulaciones específicas para el manejo intensivo de recursos forestales para energía; el uso energético de residuos agrícolas; el reciclado de nutrientes y de materia orgánica. También es importante desarrollar criterios e indicadores sobre reducción efectiva de emisiones de GEI; contaminación del aire y tratamiento de efluentes líquidos; seguridad alimentaria; uso y manejo del agua; desarrollo rural, y bioseguridad, entre otras.
2. Desarrollo institucional. Es necesario lograr arreglos institucionales sólidos y de largo plazo para formular y ejecutar programas específicos en cada rama de la bioenergía y coordinar programas intersectoriales (salud, ambiente, desarrollo social). Los programas deben tener metas claras, recursos suficientes, mecanismos de evaluación externa por terceras partes y actualizaciones frecuentes. De igual forma, es importante la participación de organizaciones no vinculadas directamente al sector energético como ONG de asistencia técnica y promoción social; organizaciones ambientalistas; empresas, municipios y otras. La comunicación sobre beneficios y retos de la bioenergía a la sociedad también es un aspecto importante.

3. Desarrollo de mercados. Se requiere desarrollar estándares y normas técnicas para los diferentes biocombustibles; eliminar subsidios a los combustibles fósiles y reflejar sus verdaderos costos (incluyendo sus externalidades).
4. Desarrollo de capacidades técnicas. Se necesitan convenios entre las empresas e instituciones educativas de nivel superior para formar a los ingenieros, técnicos y administradores que se desempeñarán en las actividades productivas relacionadas con la bioenergía. Temas importantes de un plan de estudios profesional incluyen: especialización en logística y control de calidad de biocombustibles sólidos; formación de operarios y técnicos para plantas de biocombustibles líquidos, biodigestores; aplicaciones residenciales, especialización en biohidrógeno y biometano; formación de diseñadores; formación de técnicos constructores, y especialistas en difusión de tecnologías, entre otras.
5. Investigación y validación tecnológica: Se requiere incentivar y destinar más recursos financieros al desarrollo, adaptación y aplicación de la tecnología. Se deben fomentar los grupos, las redes de investigación y los proyectos de colaboración internacionales. Se deben buscar mecanismos para incrementar los proyectos de investigación sobre las implicaciones ambientales, económicas y sociales de las tecnologías de bioenergía, ya que estos representan una muy pequeña parte del total de proyectos financiados.

En los siguientes capítulos del libro presentamos una panorámica general del estado del arte de la bioenergía en México. Para lograr este objetivo, nos enfocamos, en primer lugar, en el análisis sobre la disponibilidad de biomasa para energía; en segundo término, examinamos el nivel de desarrollo tecnológico logrado en su utilización ya sea como biocombustibles líquidos, gaseosos o sólidos. Finalmente, analizamos los aspectos de sustentabilidad y políticas públicas relacionados con la utilización de la bioenergía. Esperamos que el texto sea útil para diferentes sectores de la sociedad interesados en la problemática energética, y que aporte al proceso de transición energética de México.

REFERENCIAS

- Chu, S. & Majumdar, A., 2012. Opportunities and challenges for a sustainable energy future. *Nature*, 488(7411), pp.294-303.
- Chum, H. et al., 2011. Bioenergy. En O. Edenhofer et al., eds. *IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation*. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press.
- Cornelissen, S., Koper, M. & Deng, Y.Y., 2012. The role of bioenergy in a fully sustainable global energy system. *Biomass and Bioenergy*, 41, pp.21-33.
- Creutzig, F. et al., 2015. Bioenergy and climate change mitigation: an assessment. *GCB Bioenergy*, 7(5), pp.916-944.
- Dale, V.H. et al., 2015. A framework for selecting indicators of bioenergy sustainability. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 9(4), pp.435-446.
- Diario Oficial de la Federación, 2013. *Decreto por el que se reforman y adicionan diversas disposiciones de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, en Materia de Energía*, Mexico: Secretaría de Gobernación.
- García, C.A. et al., 2015. Sustainable bioenergy options for Mexico: GHG mitigation and costs. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43, pp.545-552.
- García, C.A., Riegelhaupt, E. & Masera, O., 2013. Escenarios de bioenergía en México: potencial de sustitución de combustibles fósiles y mitigación de GEI. *Revista Mexicana de Física*, 59(2), pp.93-103.
- García-Frapolli, E. et al., 2010. Beyond fuelwood savings: Valuing the economic benefits of introducing improved biomass cookstoves in the Purépecha region of Mexico. *Ecological Economics*, 69(12), pp.2598-2605.

- Islas, J., Manzini, F. & Masera, O., 2007. A prospective study of bioenergy use in Mexico. *Energy*, 32(12), pp.2306-2320.
- Johnson, T. et al., 2009. *México: Estudio Sobre la Disminución de Emisiones de Carbono*, Washington DC: Banco Mundial y Mayol Ediciones S.A.
- Octaviano, C., Paltsev, S. & Gurgel, A.C., 2016. Climate change policy in Brazil and Mexico: Results from the MIT EPPA model. *Energy Economics*, En Prensa.
- REMBIO, 2011. *La Bioenergía en México: Situación Actual y Perspectivas.*, México: Red Mexicana de Bioenergía.
- REN21, 2014. *Renewables 2014. Global Status Report*, Paris: Renewable Energy Policy Network for the 21st Century.
- Rios, M. & Kaltschmitt, M., 2013. Bioenergy potential in Mexico—status and perspectives on a high spatial distribution. *Bio-mass Conversion and Biorefinery*, 3(3), pp.239-254.
- SENER, 2014. *Balance Nacional de Energía 2013*, México: Secretaría de Energía.

RECURSOS BIOMÁSICOS

Raúl Tauro, Adrián Ghilardi, Carlos A. García y Omar Maserá

DEFINICIÓN Y ALCANCES

Los recursos de biomasa para energía comprenden una variada gama de fuentes primarias —es decir, aquellas en que la biomasa para energía se obtiene directamente con este fin— y secundarias —aquellas fuentes en las que la biomasa para energía es un subproducto de otras actividades económicas—. Entre las fuentes primarias destacan los bosques y selvas nativos, y las plantaciones o cultivos para energía. Entre las secundarias están los residuos del aprovechamiento y la industrialización de la madera, los residuos de cultivos agrícolas y los residuos agroindustriales, entre otros (para una discusión detallada de los diferentes recursos bioenergéticos ver Maserá et al., 2006, y REMBIO, 2011).

El potencial energético de los recursos biomásicos se define como la cantidad de biomasa que puede utilizarse con fines energéticos de manera sostenible a partir de estas fuentes primarias y secundarias. Para determinar su magnitud, deben tomarse consideraciones ambientales, sociales y económicas, por ejemplo, la cantidad de biomasa y de tierra que puede utilizarse con fines energéticos sin poner en riesgo áreas de alta biodiversidad, o la producción de alimentos, forrajes o fibras y productos forestales. Dado que hay diferentes criterios para definir las áreas aptas para bioenergía y calcular la disponibilidad de la biomasa (p. ej., cuántos residuos de cosecha se pueden extraer de un cultivo sin provocar un agotamiento de los suelos) se han generado muy diferentes estimaciones del potencial energético de la biomasa.

SITUACIÓN INTERNACIONAL

Existen estimaciones muy diferentes sobre los potenciales de producción sustentable de biomasa para energía a nivel global. Berndes et al. (2003) estimaron un rango de 100 a 400 EJ para el año 2050 y señalan que entre los parámetros que generan esta variación están la disponibilidad de tierras y los niveles de rendimiento o productividad de la biomasa, así como la forma en que un sector bioenergético en expansión podría interactuar con otros usos del suelo.

Hoogwijk et al. (2003) identificaron seis categorías de recursos de biomasa: 1) Cultivos energéticos en tierras baldías, 2) cultivos energéticos en tierras degradadas, 3) residuos agrícolas, 4) residuos forestales, 5) residuos animales y 6) residuos orgánicos urbanos. Concluyeron que hay un rango muy amplio de potenciales de producción global (de 33 a 1,135 EJ/año) para 2050 y que la disponibilidad de biomasa para energía dependerá de la demanda de alimentos y la dieta humana; los sistemas de producción de alimentos; la productividad de los bosques y los cultivos energéticos; el nivel de uso de biomateriales; la disponibilidad de tierras degradadas, y la competencia entre usos alternativos de suelo.

La Agencia Internacional de la Energía (IEA) (2012) estima para el 2050 un potencial técnico de bioenergía máximo de 500 EJ/año considerando cinco categorías de recursos: residuos agrícolas, forestales y desechos orgánicos; aumento en la producción forestal; excedente de tierras aptas para agricultura y pasturas; uso de tierras degradadas y marginales, y mejoras en la productividad de la agricultura y silvicultura.

El IRENA (2014), estima que el potencial de suministro de bioenergía en el mundo sería de 97-147 EJ/año para el 2030, de los cuales entre el 38 y 45% provendría de residuos agrícolas, y el resto estaría distribuido

principalmente entre plantaciones energéticas y productos forestales. Los sectores de transporte y generación de electricidad, junto a la tecnología de calefacción centralizada, son los que proyectan un mayor aumento en la demanda de biomasa en el mundo.

En una revisión exhaustiva a nivel internacional, Creutzig et al. (2015) estimaron que el potencial energético de la biomasa con fines energéticos se sitúa entre los 100 y 300 EJ/año, incluidas fuentes primarias y secundarias. La diferencia estriba fundamentalmente en la cantidad de tierra que se considere podría utilizarse sustentablemente para cultivos energéticos dedicados sin competir con la producción de alimentos y otros usos del suelo.

IMPORTANCIA ACTUAL Y POTENCIAL PARA MÉXICO

Biomasa forestal

La fuente más importante de biomasa para energía en México son los bosques y selvas nativos. La superficie total del país es de 196,437,500 ha, de las que 72% (141,745,168 ha) corresponde a superficie forestal. Más de la tercera parte de ésta se ubica en zonas semiáridas; mientras que 21% corresponde a bosques templados y 19% a selvas tropicales. De estos últimos, Chapela (2012) reporta que 30% se encuentra en alguna fase de sucesión secundaria.

Para el año 2000 se estimó una existencia total de 2,803 millones de m³ de madera. El potencial productivo sustentable, de acuerdo a Chapela (2012), podría ser de 28 millones de m³ por año para fines industriales y otros 28 millones de m³ para usos domésticos y mercados locales, asumiendo un incremento anual disponible para cosecha de 2% del inventario.

Otros autores estiman potenciales productivos mayores: a) de 106 MtMS/año, es decir, unos 212 millones de m³ (Johnson et al., 2009) en 65 millones de hectáreas aprovechables, y b) de 113 MtMS/año en unos 42 millones de ha (REMBIO, 2013, no publicado).

Muchos bosques y selvas ya están bajo manejo forestal y cuentan con permisos de aprovechamiento, pero no hay en el mercado oportunidades para el uso de su potencial energético. A nivel nacional, el volumen de los aprovechamientos forestales autorizados por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat) fue de 21 a 15 millones de m³/año en los años 2008 a 2012. No obstante, solo se extrajeron entre 6.5 y 5.5 millones de m³/año (casi todo para uso industrial) y quedaron unos 12 millones de m³/año sin utilizar (6 MtMS/año).

La diferencia entre el volumen cosechado y la productividad potencial demuestran que hay un margen productivo importante no aprovechado. La mayor parte de ese potencial corresponde a los árboles, las partes de árboles o las especies que no son comerciables como insumo para las industrias de la madera. Otra parte corresponde a áreas forestales que no están siendo manejadas.

El aprovechamiento de madera para energía podría estimular la producción forestal para usos industriales mediante la comercialización de residuos y de especies menos valoradas. Por otro lado, la producción de calor y energía eléctrica a partir de la biomasa forestal, puede contribuir a la mitigación de CO₂ por hasta 35 Mt anuales (Johnson et al., 2009).

Las opciones para aprovechar sustentablemente la biomasa forestal para bioenergía son el manejo de bosques nativos, el uso de los residuos de industrias forestales, y las plantaciones. La biomasa proveniente de leña, carbón vegetal, briquetas o *pellets* se puede usar como biocombustible sólido de primera genera-

ción; mientras que el *biochar*, torrefactos y *torpellets* pueden ser utilizados como biocombustibles sólidos de segunda generación (REMBIO, 2011).

La productividad de un bosque bajo manejo forestal sustentable, depende de la reproducción y el crecimiento de los árboles, lo que a su vez depende de los diferentes tipos de vegetación, las especies, la edad del arbolado, el clima y el suelo. Solo una fracción del crecimiento de cada tipo de bosque queda disponible para fines energéticos una vez descontada la utilizable para productos de alto valor económico como son madera para construcción, madera aserrada, celulosa y papel, entre otros. Los residuos forestales son los derivados del aprovechamiento y la transformación industrial de la madera. Se estima que entre 20 y 60% de la biomasa de los árboles aprovechados y 50% de la madera en rollo que se procesa en los aserraderos son residuos.

Por otro lado, las plantaciones forestales se deben establecer en terrenos que actualmente tienen uso diferente al forestal, pero que son apropiados para la reforestación. De esta forma, se producen materias primas maderables y no maderables que podrían ser usadas con fines energéticos, y se recupera la vegetación de los terrenos.

En total, el aprovechamiento de la biomasa forestal para energía, tanto a partir de bosques nativos, como plantaciones y residuos de la industria forestal, tiene un potencial estimado de entre 1,923 y 1,135 PJ/año en nuestro país (García et al., 2015; REMBIO, 2011).

Biomasa de residuos agrícolas

Potencial para biocombustibles sólidos

El aprovechamiento energético de residuos agrícolas, tiene la gran ventaja de integrarse en el uso de suelo para la producción de alimentos. También en este caso, hay diferentes estimaciones sobre su potencial uso energético.

Según una estimación (Rios & Kaltschmitt, 2013), en México existe un potencial para uso energético de 472 PJ/a, proveniente principalmente de residuos del maíz, la caña de azúcar, el sorgo y el trigo, considerando una tasa de remoción de residuos del 40%. Estos cultivos aportan el 85% de los residuos agrícolas del país (Aldana et al., 2014), pero sus usos actuales para generar energía son muy limitados.

Otra fuente indica que en 2006 se produjeron en México 76 millones de toneladas de materia seca (MtMS) proveniente de 20 cultivos, de los cuales, 60 MtMS corresponden a residuos primarios (hojas y tallos del maíz, tallos y vaina de sorgo, puntas y hojas de caña de azúcar, paja de trigo, paja de cebada y de frijol, así como cáscara de algodón) (Valdez-Vazquez et al., 2010). Este estudio asume 50% de disponibilidad de los residuos para fines energéticos.

Más del 50% de los residuos de cosecha del maíz, sorgo, trigo y cebada, se utilizan para protección del suelo, 27% para alimentar el ganado y 20% se quema (Reyes-Muro et al., 2013). Por esta razón, existe interés en evaluar el potencial energético de residuos que tienen baja calidad alimenticia, los cuales son mayormente quemados en campo, por ejemplo, los residuos de cosecha de la caña y las podas de frutales.

El aprovechamiento de residuos de cosecha con fines energéticos implica considerar, además de sus usos alternativos, otros aspectos, tales como: estabilidad del suelo, prácticas de cosecha, manejo y almacenamiento, y viabilidad de sustitución de combustibles (Hiloidhari et al., 2014). También son importantes las consideraciones técnicas, debido a que la biomasa agrícola como combustible es relativamente difícil de usar y generalmente requiere ser sometida a un pretratamiento, ya que no es homogénea, contiene elevados porcentajes de humedad y es de baja densidad energética.

Por otro lado, existe una heterogénea distribución geográfica de los residuos. Unos pocos municipios en los estados de Sinaloa, Jalisco, Chihuahua, Tamaulipas y Campeche tienen la mayor producción y concentración de residuos de maíz (Valdez-Vazquez et al., 2010). En Tamaulipas, Guanajuato y Sinaloa, se encuentran las mayores concentraciones de paja de sorgo (Reyes-Muro et al., 2013) y en Veracruz las mayores cantidades de residuos de caña de azúcar, de cítricos y de café. Esto conlleva a evaluar el consumo de dichos residuos en demandas localizadas y a pequeña escala o bien, profundizar en el estudio de logística de transporte de biocombustibles procesados.

De los 76 MtMS de residuos que se produjeron en México a partir de los principales cultivos en 2006, entre 7 y 16 MtMS corresponden a residuos agroindustriales o secundarios obtenidos del procesamiento poscosecha (bagazo de caña de azúcar, mazorcas y olotes, bagazo de maguey o agave, cascarilla de arroz y de maní y pulpa de café entre otros) (Rios & Kaltschmitt, 2013; Valdez-Vazquez et al., 2010). Estos podrían brindar un potencial energético de entre 100 y 125 PJ/año (Tabla 2.1).

Considerando que la naranja es el cuarto cultivo de mayor producción anual en el país (después de la caña de azúcar, del maíz y del sorgo), con 4.4 Mt producidas en el 2013, los cítricos son otra fuente de residuos agroindustriales de gran importancia.

Potencial para biocombustibles líquidos de primera generación

La producción de biocombustibles líquidos está destinada principalmente a sustituir en forma parcial la gasolina y el diésel en el sector transporte. Un estudio realizado por García et al. (2015), señala que en México existe un potencial de producción de etanol con caña de azúcar de 338 PJ y 84 PJ de etanol a partir de sorgo dulce. Mientras que para la producción de biodiésel, existe un potencial de 120 PJ con palma aceitera y 36 PJ con *Jatropha curcas*. El mismo estudio señala que las tierras marginales con potencial para nuevas plantaciones energéticas corresponden a 2.9, 2.6, 1.8 y 3.2 Mha respectivamente para los cultivos mencionados. Además, para el 2035 el etanol de caña de azúcar podría reemplazar al 8.9% de la gasolina, mientras que el etanol de sorgo podría lograr el 2.2%. Respecto al biodiésel, el aceite de palma reemplazaría el 7.4% del consumo de diésel en el mismo año, mientras que con la *Jatropha curcas* se lograría una sustitución del 2.2%.

Rios & Kaltschmitt (2013) señalan que en México existe un potencial biomásico para producir etanol con caña de azúcar y sorgo dulce de 226 PJ/año, y un potencial de producción de biodiésel de 66 PJ/año a partir de palma aceitera y *Jatropha curcas*, y estiman que las tierras marginales con potencial sustentable para cultivos energéticos alcanzan a 16 Mha.

Potencial para biocombustibles gaseosos

Existe en México un potencial creciente para la producción de biogás. Se considera posible llegar en 2020 a un potencial de 183 PJ/año a 495 PJ/año (Rios & Kaltschmitt 2013). Las principales materias primas son los residuos municipales en los que existe gran incertidumbre (35 a 305 PJ/año) y en menor medida los residuos ganaderos (148-190 PJ/año). El rango bajo de la estimación es similar al calculado por Masera et al. (2006), quienes evaluaron el potencial de producción de biogás por medio de subproductos pecuarios, cuyo análisis resultó en 148 PJ/año.

Potencial total de la biomasa para energía

En la Tabla 2.1 se puede contemplar detalladamente el potencial total de biomasa a partir de fuentes agrícolas y agroindustriales para el aprovechamiento energético en la producción de biocombustibles sólidos, líquidos y gaseosos. Los potenciales totales alcanzan entre 372-450 PJ/año para residuos agrícolas, 100-125

PJ/año para residuos agroindustriales (ambos para obtener biocombustibles sólidos), entre 292-578 PJ/año para biocombustibles líquidos y entre 183-495 PJ/año para los biocombustibles gaseosos.

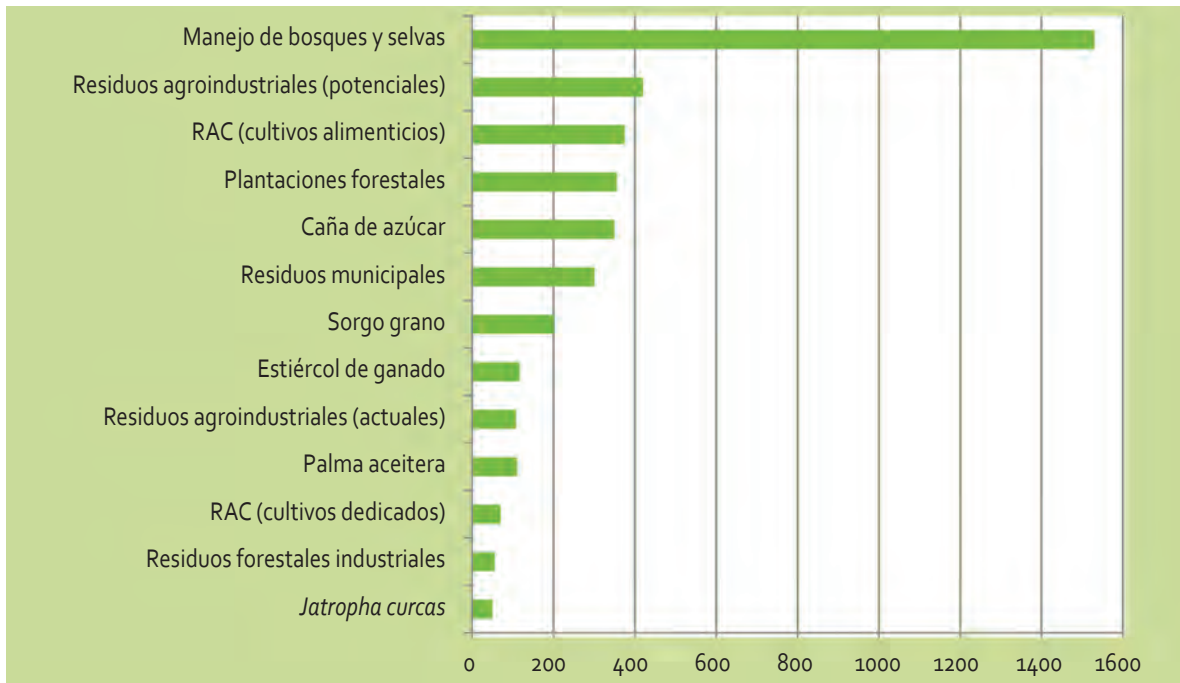
Tabla 2.1. Potencial energético de los residuos agrícolas y agroindustriales

Cultivo	Tipo de residuo	Generación de residuo (MtMS/año) ^a	Potencial min. (PJ/a)	Potencial máx. (PJ/a) ^b
Caña de azúcar	Hojas y punta	2.5-7.6	38	77
Maíz	Rastrojo	14-33	210	248
Sorgo	Rastrojo	4.2-8.3	63	62
Trigo	Rastrojo	1.9-5.1	29	38
Otros*	Rastrojo	2.2-6	32	45
Total de residuos agrícolas (BCS)		24.8-60.1	372	450
Caña de azúcar	Bagazo	3-7.6	45	57
Maíz	Olote	2.8-6.6	42	50
Maguey	Bagazo	0.6-1.5	x8	11
Café	Pulpa	0.1-0.4	2	3
Arroz	Cascarilla	0.03-0.1	0.5	1
Cítricos	Cáscara	0.11	1	2
Otros**	Cascarilla-bagazo	0.2-0.3	2	3
Total de residuos agroindustriales (BCS)		6.8-16.6	101	125
Cultivo	Tipo de producto	Tierras marginales disponibles (Mha)	Potencial min. (PJ/a)	Potencial máx. (PJ/a)
Caña de azúcar	Jugo	2.9	226	338
Sorgo	Grano		2.6	84
Total (BCL-etanol)		5.5	226	422
<i>Jatropha curcas</i> Semilla		3.2	66	36
Palma	Fruto	1.8		120
Total (BCL-biodiésel)		5.0	66	156
Recurso			Potencial mn. (PJ/a)	Potencial máx. (PJ/a)
Residuos municipales			35	305
Residuos ganaderos			148	190
Total (BCL-biogás)			183	495

Nota: Para el cálculo de potencial de los BCS se utilizó un poder calorífico medio de 15 PJ/MtMS. ^aLa Generación de residuos máxima considera el total de residuos generados. ^bSe considera un coeficiente de disponibilidad del 50%. *Cebada, frijol, garbanzo, lenteja, arroz, canola, algodón, sésamo, soya, tabaco, cacahuete. BCL: biocombustibles líquidos; BCS: biocombustibles sólidos. **Cacahuete, algodón, agave. Fuente: Elaboración propia, basado en datos de García et al. (2015), Maserá et al. (2006), Rios & Kaltschmitt (2013), Valdez-Vazquez et al. (2010).

La Figura 2.1 detalla los potenciales de producción sostenible de bioenergía en México, por cada recurso considerado, incluyendo en este caso a la biomasa de origen forestal. El potencial total estimado alcanza entre 2072 y 3571 PJ/año.

Figura 2.1. Potencial de la bioenergía en México (PJ/año)



Fuente: Elaboración propia, basado en datos de García et al. (2015) y REMBIO (2011).

PERSPECTIVAS DE USO DE LOS RECURSOS BIOMÁSICOS POR SECTOR

En México, actualmente, la biomasa no se aprovecha eficientemente a causa de la falta de mercados (REMBIO, 2011) y por la tendencia a consumir combustibles más baratos, usualmente los derivados de fósiles (Rios & Kaltschmitt, 2013; SENER, 2013). Sin embargo, un estudio reciente elaborado por la IRENA (2015) estima la demanda de bioenergía en México para el 2030 en 810 PJ, donde la distribución sería: 32% en el sector transporte, 28% en el comercial, 25% en la industria y 15% en la generación de electricidad. Estas necesidades energéticas podrían ser cubiertas con biocombustibles sólidos (leña, astillas, RAC, pellets de residuos agrícolas y forestales), biocombustibles líquidos (etanol de caña de azúcar y sorgo dulce y biodiésel de palma aceitera y Jatropha) y biocombustibles gaseosos (a partir de residuos urbanos y el estiércol de ganado).

DESAFÍOS Y BARRERAS A SUPERAR

Al presente, hay algunos desafíos a superar para evaluar con mayor exactitud las posibilidades de producción de biomasa para energía en México:

- a) Mejorar el conocimiento y el desarrollo de modelos espaciotemporales que permitan estimar mejor la localización, la productividad y la accesibilidad de los recursos de biomasa, tanto primarios como secundarios.
- b) Identificar las formas de gestión o manejo de esos recursos que permitan obtener los mayores niveles de producción sustentable, particularmente en cuanto a los recursos de bosques nativos.
- c) Generar herramientas accesibles y amigables para los usuarios que permitan la estimación de los potenciales de producción sustentable de cada una de las biomásas bajo diversas condiciones o limitaciones de acceso, en áreas definidas a escala de proyecto.
- d) Integrar la oferta de biomasa con la demanda, identificando usuarios potenciales y evaluando aspectos logísticos con sus respectivos costos de sustitución de combustibles fósiles.

La cuestión de la productividad es clave, porque de ella depende la magnitud de las áreas a manejar y la realización de inversiones para poner en producción los recursos, lo que además tiene un fuerte impacto en los costos de producción. Los aspectos relacionados con la localización y accesibilidad de los recursos también son decisivos, porque determinan los requerimientos logísticos que son un componente mayor de los costos finales de la biomasa.

No existen barreras tecnológicas importantes para superar estos desafíos y generar el conocimiento. Sin embargo, es necesario generar información confiable sobre la productividad primaria y las tasas de cosecha de las principales fuentes de biomasa. También hay que desarrollar herramientas computacionales que permitan hacer estimaciones de producción y costos con base en modelos flexibles.

PRIORIDADES DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO (I+D)

Las prioridades de investigación y desarrollo (I+D) responden a los desafíos y barreras planteadas en el apartado anterior:

- A escalas nacional y estatal, son necesarios una serie de análisis espaciales del potencial técnico de la bioenergía que integren y propaguen la incertidumbre de los múltiples supuestos, al tiempo que proyecten escenarios de corto y mediano plazo (p. ej., 5-15 años). Los análisis deben ser lo suficientemente flexibles para poder evaluar diversas fuentes, procesos de preparación/transformación y usos finales de la bioenergía. Es importante que las técnicas de análisis y modelado espacial puedan servir también como plataforma de un sistema simplificado de consulta que dé flexibilidad al usuario en función de los flujos de biomasa a energía que desee consultar, y de las zonas geográficas de interés.
- A escala de proyecto, los análisis deben ir más allá del potencial técnico en el espacio y el tiempo, y ser capaces de evaluar las tendencias en el uso del suelo y en la gestión de los recursos biomásicos que han sido identificados como fuente potencial de energía. A esta escala es necesario acotar con información de campo los rendimientos esperados en función de las condiciones biofísicas y de manejo. Más allá del análisis y de las prioridades de I+D, es la rentabilidad económica de las diferentes opcio-

nes, es decir, la rapidez con que se recupera la inversión, la competencia con otros productos biomásicos no-energéticos y la concordancia del proyecto con las leyes vigentes de protección al ambiente, lo que finalmente va a determinar que un emprendimiento bioenergético eventualmente despegue.

REFERENCIAS

- Aldana, H., Lozano, F.J. & Acevedo, J., 2014. Evaluating the potential for producing energy from agricultural residues in Mexico using MILP optimization. *Biomass and Bioenergy*, 67, pp.372-389.
- Berndes, G., Hoogwijk, M. & Broek van den, R., 2003. The contribution of biomass in the future global energy supply: a review of 17 studies. *Biomass and Bioenergy*, 25(1), pp.1-28.
- Chapela, F., 2012. *Estado de los bosques de México*, México, D.F.: Consejo Civil Mexicano para la Silvicultura Sostenible A.C.
- Creutzig, F. et al., 2015. Bioenergy and climate change mitigation: an assessment. *GCB Bioenergy*, 7(5), pp.916-944.
- García, C.A. et al., 2015. Sustainable bioenergy options for Mexico: GHG mitigation and costs. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43, pp.545-552.
- Hiloidhari, M., Das, D. & Baruah, D.C., 2014. Bioenergy potential from crop residue biomass in India. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 32, pp.504-512.
- Hoogwijk, M. et al., 2003. Exploration of the ranges of the global potential of biomass for energy. *Biomass and Bioenergy*, 25(2), pp.119-133.
- IEA, 2012. *Technology Roadmap. Bioenergy for Heat and Power*, Paris: International Energy Agency.
- IRENA, 2014. *Global Bioenergy. Supply and Demand Projections. A working paper for REmap 2030*, Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency.
- IRENA, 2015. *Renewable Energy Prospects: Mexico. REmap 2030 analysis*, Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency.
- Johnson, T. et al., 2009. *México: Estudio sobre la disminución de emisiones de carbono*, Washington DC: Banco Mundial y Mayol Ediciones S.A.
- Masera, O., Aguillón, J. & Arvizu, J. (eds.). 2006. *La bioenergía en México. Un catalizador del desarrollo sustentable*, México: Red Mexicana de Bioenergía y Comisión Nacional Forestal.
- REMBIO, 2011. *La bioenergía en México: Situación actual y perspectivas*, México: Red Mexicana de Bioenergía.
- Reyes-Muro, L., Camacho-Villa, T.C. & Guevara-Hernández, F. (Coords.), 2013. *Rastrojos: Manejo, uso y mercado en el centro y sur de México*, Libro Técnico, México.
- Rios, M. & Kaltschmitt, M., 2013. Bioenergy potential in Mexico—status and perspectives on a high spatial distribution. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 3(3), pp.239-254.
- SENER, 2013. *Prospección de energías renovables 2013-2027*, México: Secretaría de Energía.
- Valdez-Vazquez, I., Acevedo-Benítez, J.A. & Hernández-Santiago, C., 2010. Distribution and potential of bioenergy resources from agricultural activities in Mexico. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(7), pp.2147-2153.

BIOCOMBUSTIBLES SÓLIDOS

Enrique Riegelhaupt

DEFINICIÓN Y ALCANCES

Los biocombustibles sólidos (BCS) son vectores energéticos obtenidos de la biomasa, con mayores o menores grados de transformación física o química, que se mantienen en estado sólido hasta su uso final. Entre ellos se encuentran:

- La leña (el bioenergético más utilizado por el hombre en la actualidad).
- Las astillas de madera.
- Los *pellets* de madera (el BCS de mayor comercio global actual).
- Los *pellets* y briquetas de residuos forestales, agrícolas y otros.
- El carbón vegetal (el reductor metalúrgico más antiguo, actualmente es un combustible muy empleado en los sectores residencial, comercial e industrial).

El campo de aplicaciones y usos finales de los BCS está muy diversificado, e incluye: generación de calor directo e indirecto, generación de vapor, cogeneración de electricidad y calor de proceso, refrigeración, fuerza motriz, metalurgia. Los BCS presentan los mayores potenciales para desarrollo de la bioenergía y la mayor gama de aplicaciones—exceptuando al sector transporte, donde actualmente las posibilidades de aplicación directa son muy pocas—.

El uso de BCS no procesados como la leña y el carbón vegetal, por su larga historia y su asociación con el desarrollo tecnológico de las etapas más tempranas de la civilización, se suele vincular con tecnologías tradicionales o anticuadas y de baja eficiencia. Esta percepción se corresponde con la realidad de una parte importante de los usuarios actuales de BCS en los países y sociedades de menor desarrollo tecnológico, pero puede ser engañosa. De hecho, en las últimas tres o cuatro décadas los BCS han recibido creciente atención como alternativas de bioenergía en aplicaciones modernas y de alta eficiencia, en el contexto de la transición energética global.

Así, los BCS tienen un papel destacado en las metas de la Unión Europea para las energías renovables, donde contribuirán con la mitad de la meta fijada de introducir 20% de energías renovables en la matriz energética para el año 2020. También tienen una participación creciente en Brasil, Estados Unidos de América y Canadá, como fuentes de energía térmica en aplicaciones industriales y para generar electricidad. Incluso en el resto del mundo, donde la mayor parte de la biomasa sólida se usa todavía en aplicaciones tradicionales con dispositivos de bajo nivel tecnológico y eficiencia reducida, hay una creciente actividad de innovación y desarrollo de dispositivos eficientes y de combustión limpia para usos térmicos en domicilios, procesos artesanales o pequeñas industrias.

SITUACIÓN INTERNACIONAL

La Agencia Internacional de Energía en su reciente revisión del suministro y uso de energía a nivel global (IEA, 2012) concluye que las tendencias actuales del consumo de energía basado en fuentes fósiles son económica,

ambiental y socialmente insostenibles por su impacto en las emisiones de CO₂ y por la inseguridad en el suministro de petróleo; y remarca que las decisiones de inversión para la transición energética deben tomarse pronto, para no quedar ligados a largo plazo con tecnologías subóptimas.

La IEA estima que la bioenergía provee actualmente el 10% del suministro energético global y, con unos 50 EJ/año, es la mayor de las fuentes renovables. En su mapa de ruta, traza un camino para proveer 160 EJ en el año 2050, de los cuales 100 EJ serían para generación de electricidad y calor, produciendo 3,000 TWH o el 7.5% de toda la electricidad mundial, además del 15% de todo el calor industrial y el 20% de todo el calor consumido por el sector residencial. Con esto, la bioenergía podría reducir emisiones por 1.3 GtCO₂e por año en el sector eléctrico, además de otras 0.7 GtCO₂e en los sectores industrial y domiciliar.

Según la IEA, la biomasa será principalmente utilizada como combustible sólido, con una proyección de 5-7 Gt/año para quema directa, y secundariamente para biocombustibles líquidos, con una estimación de 3-4 Gt/año. Se espera obtener esta biomasa en forma sostenible, a partir de residuos, desechos y algunos cultivos energéticos. La IEA señala que la biomasa para calor y electricidad ya es económicamente competitiva contra los combustibles fósiles en circunstancias favorables, pero en los próximos 10 a 20 años pueden ser necesarios apoyos específicos para cubrir el costo diferencial de la bioenergía en algunos mercados.

Para desarrollar este mapa de ruta, la IEA señala como acciones clave:

- Crear un marco de políticas bioenergéticas estables a largo plazo.
- Definir metas de medio plazo para la bioenergía que doblen el suministro actual al año 2030.
- Introducir mecanismos de soporte eficientes.
- Aumentar la investigación para desarrollo de insumos bioenergéticos y mapeo de aptitud de tierras.
- Reemplazar usos tradicionales de biomasa mediante estufas más eficientes y combustibles más limpios.
- Apoyar más proyectos innovadores y demostrativos.
- Implementar criterios, indicadores y sistemas de evaluación de sustentabilidad internacionalmente acordados.
- Introducir estándares técnicos internacionalmente alineados para la biomasa y bioenergéticos.
- Apoyar la cooperación internacional para construir capacidades y transferir tecnologías.

Un estudio más reciente elaborado por la Agencia Internacional de Energía Renovable (IRENA, 2014) confirma las proyecciones de IEA y para México estima que en 2030 la participación de la biomasa será de 22% en la industria, 4% en el transporte y 3 % en el sector residencial.

IMPORTANCIA ACTUAL Y POTENCIAL PARA MÉXICO

En México, la participación de la biomasa en la oferta de energía primaria del año 2013 fue de 4.22% (SENER, 2014). La mayor parte de esta biomasa (2.83%) correspondió a la leña usada en fogones tradicionales para cocción de alimentos, como fuente de calor en pequeñas industrias (ladrilleras, mezcaleras, talleres alfareños) y como materia prima en la producción de carbón vegetal. El segundo lugar lo ocupó el bagazo usado como combustible en los ingenios azucareros (Tabla 3.1).

Tabla 3.1. Participación de fuentes de energía primaria de México, 2013

Total RENOVABLES		7.05%
Hidro	1.12%	
Geotermia	1.46%	
Solar	0.08%	
Eólica	0.17%	
Subtotal BIOMASA		4.22%
Biogás	0.02%	
Bagazo	1.37%	
Leña	2.83%	

Fuente: Balance Nacional de Energía 2013 (SENER, 2014).

Las tecnologías utilizadas para el aprovechamiento energético de la biomasa sólida en México son, en su mayoría, ineficientes, y algunas generan impactos negativos en la salud y el ambiente (REMBIO, 2011). Aun así, la biomasa en general, y la sólida en particular, la mayor fuente de energía renovable en México, debido a los usos tradicionales, y compone el 59,9% de la energía primaria total obtenida de fuentes renovables (SENER, 2014).

Las acciones para incluir a la biomasa con tecnologías modernas en el sistema energético mexicano son hasta ahora aisladas e insuficientes. En el caso de la biomasa sólida se cuenta con el Programa Nacional de Estufas Rurales, coordinado por la Secretaría de Desarrollo Social (Sedesol), que ha difundido estufas eficientes de leña en aproximadamente 600,000 hogares rurales. También existe una propuesta presentada la Comisión Nacional Forestal (Conafor) para formular un Programa Nacional de Dendroenergía (TRIGENIUS, 2015) donde se propone desarrollar a corto plazo acciones demostrativas para producir electricidad con residuos forestales en plantas termoeléctricas ubicadas en aserraderos. Pero actualmente no hay políticas o programas específicos para promover el uso de biomasa sólida en la cogeneración de electricidad o su uso limpio y eficiente en los sectores industrial y comercial.

La baja prioridad dada a la biomasa en las políticas mexicanas respecto a fuentes renovables contrasta con el alto potencial nacional para producirla sosteniblemente, y con la gran variedad de aplicaciones para las que es útil. México cuenta con un potencial sustentable de 3,000 a 3,459 PJ/año (García et al., 2013; Johnson et al., 2009; Rios & Kaltschmitt, 2013). Esta cifra equivale al 69% del consumo de energía final en el año 2012, o al 38% de la demanda de energía primaria. La mayor parte constituye biomasa leñosa de bosques nativos, seguida por residuos (de cultivos y agroindustrias). Estas fuentes están disponibles de inmediato, a diferencia de las plantaciones energéticas (cultivos y plantaciones forestales) que tienen un potencial importante pero aún deben desarrollarse, lo que implica necesariamente realizar cuantiosas inversiones y esperar muchos años hasta su entrada en producción.

ROLES EN LA TRANSICIÓN ENERGÉTICA

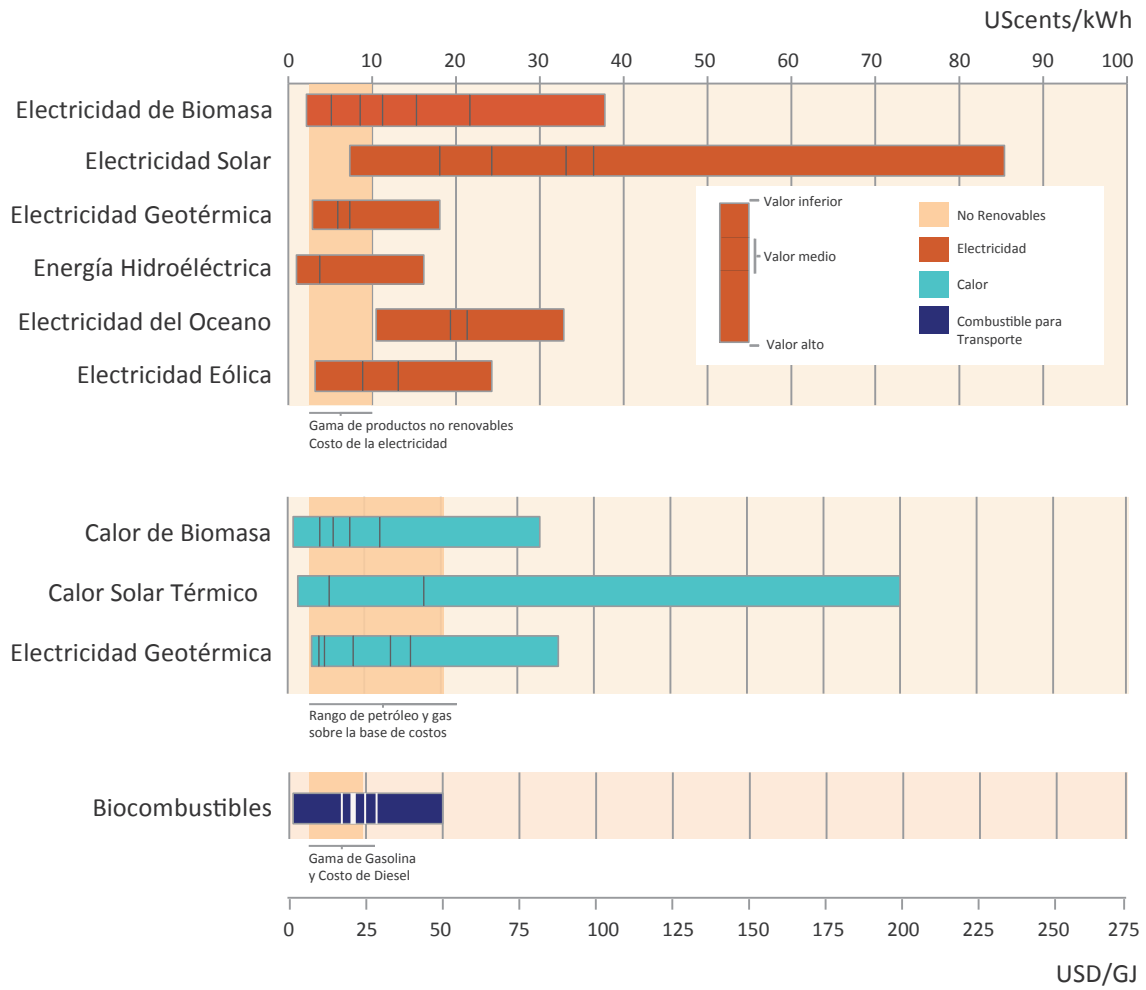
Los BCS ofrecen ventajas importantes para la transición hacia un patrón de energía más diversificado y menos dependiente de los combustibles fósiles, por varias razones:

- A diferencia de otras fuentes renovables, los BCS pueden utilizarse con una parte de la infraestructura y los equipos existentes (p. ej., en la cocombustión de biomasa en termoeléctricas, la cogeneración con astillas en ingenios, reemplazo de petcoque o coque metalúrgico por carbón vegetal en los hornos ya existentes de las respectivas industrias).
- Hay una gran variedad de tecnologías para BCS que ya son completamente comerciales, están establecidas en el mercado internacional y presentan costos competitivos con las tecnologías convencionales (Figura 3.1).
- Adoptando la experiencia de otros países, es posible aprovechar la biomasa empleando tecnologías muy eficientes (Loo van & Koppejan, 2010; REMBIO, 2006; REMBIO, 2011) y comercialmente maduras, como las de combustibles sólidos procesados para el sector residencial, *pellets* para generación de calor en industrias, generación de electricidad por cocombustión y combustión directa, etc.
- Los BCS se cuentan entre las opciones de bioenergía más costo-efectivas para reducir emisiones de GEI en México (Figura 3.2) en cantidades significativas, ya que presentan un potencial acumulado de ca. 600 MtCO₂eq/año hacia el año 2030.

Además de ser tan costo-eficientes que en muchos casos pueden arrojar costos de mitigación *negativos*, los BCS presentan una serie de beneficios ambientales, económicos y sociales que son utilidades no contabilizadas por los análisis financieros a nivel de proyecto. En lo ambiental, el uso de biomasa sólida forestal viabiliza el manejo sostenible y la conservación de los bosques y selvas, en tanto que el aprovechamiento de residuos agroindustriales tiene impactos positivos por reducción de la contaminación de agua y aire.

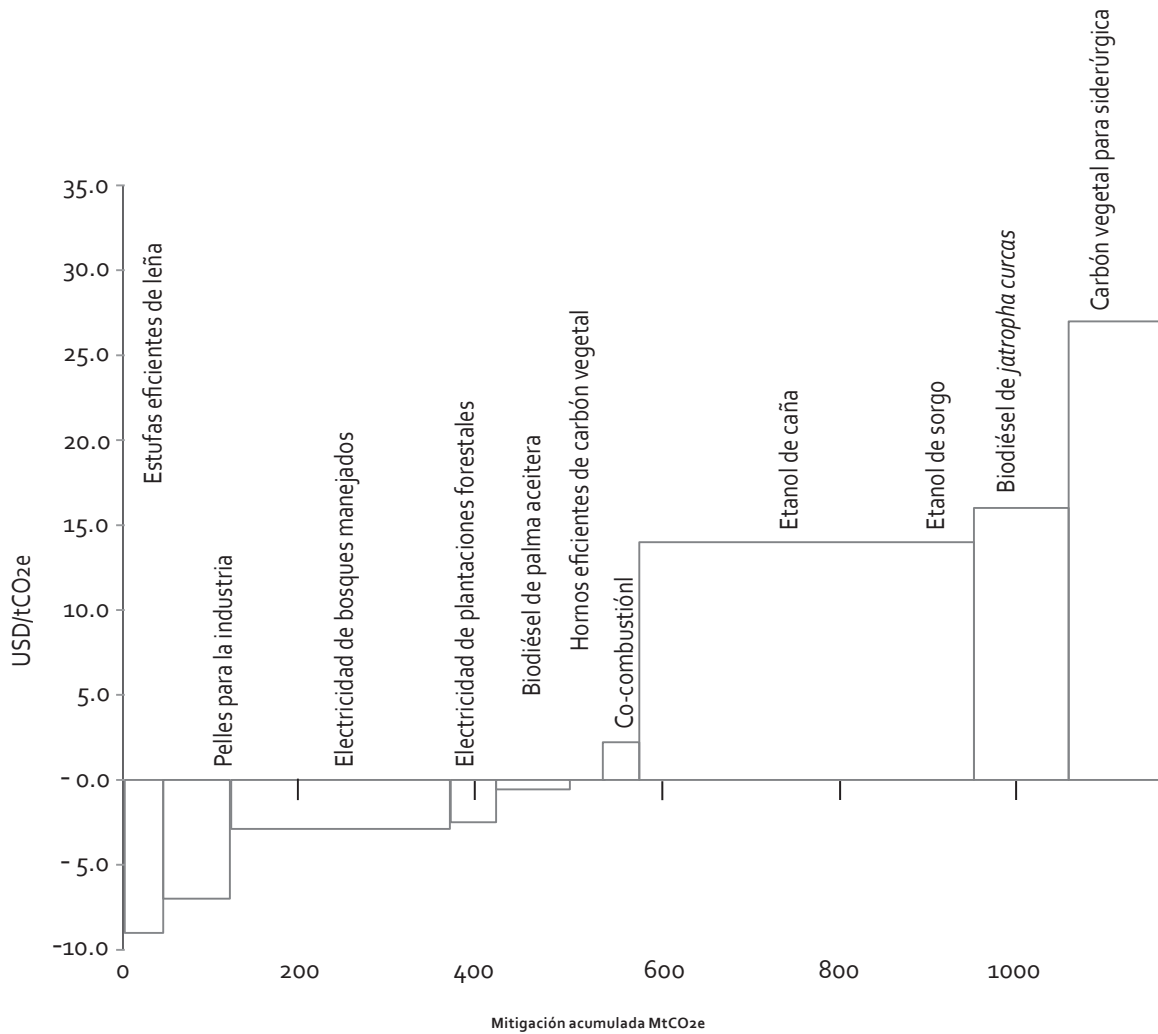
Para los residuos agrícolas de cosecha, el panorama más variado y complejo, ya que puede haber impactos positivos (p. ej., cuando se reduce la quema de residuos en campo), pero también negativos (p. ej., cuando se extraen en exceso, afectando el reciclaje de nutrientes y la conservación de los suelos).

Figura 3.1. Costos comparados de tecnologías bioenergéticas



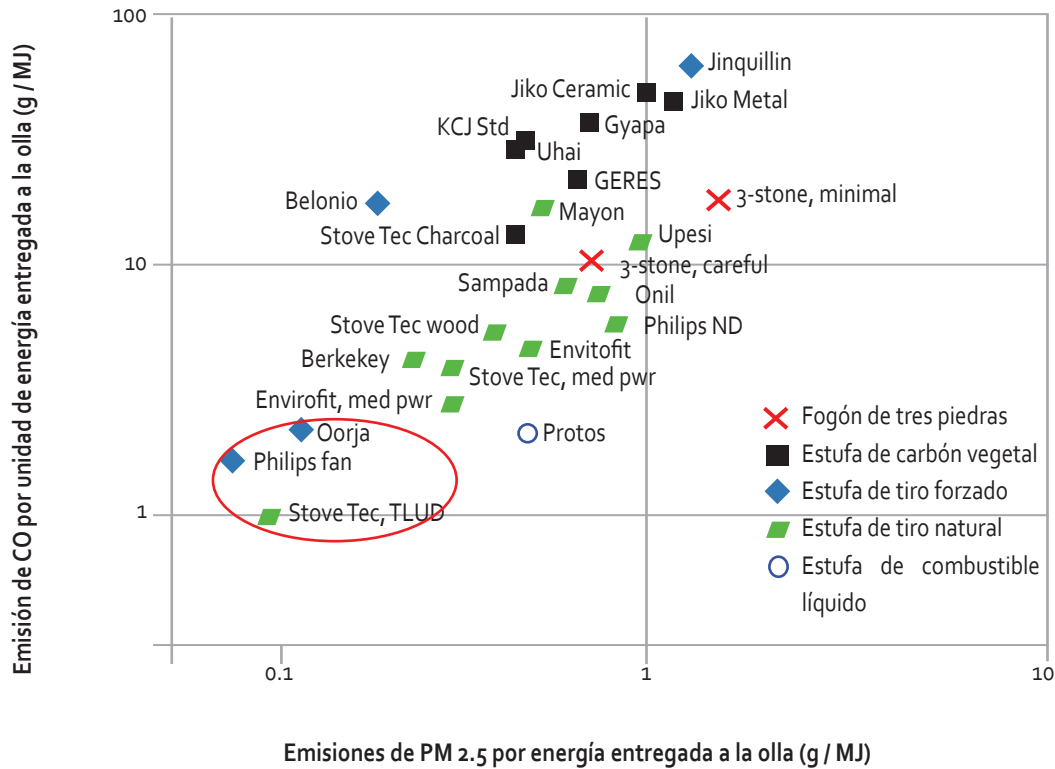
Fuente: Chum et al. (2011).

Figura 3.2: Costos de mitigación de opciones de bioenergía (García et al., 2015)



Por otro lado, hay beneficios sociales potenciales de los BCS, como la generación de empleos en zonas rurales y forestales debido a la producción masiva de biomasa sólida, mejorando así las condiciones de ingreso y la seguridad en estas regiones. Adicionalmente, la difusión de tecnologías limpias para la cocción y calefacción residencial tiene grandes beneficios para la salud, sobre todo de mujeres y niños en zonas rurales. Uno de los más importantes beneficios para la salud se origina en la reducción de emisiones de CO y partículas menores a 2.5 μm , que son causantes de enfermedades respiratorias crónicas en las personas expuestas al humo de los fuegos abiertos. Las nuevas tecnologías de estufas limpias pueden reducir drásticamente estas emisiones, como queda demostrado en la Figura 3.3.

Figura 3.3. Emisiones de CO y particulados de distintas estufas



Fuente: Jetter et al. (2012).

Por último, los beneficios económicos del uso de BCS se ven reflejados en la creación de riqueza en sectores marginados del país por la valorización y el uso eficiente de la biomasa, y en la reversión parcial del flujo de ingresos desde el sector petrolero hacia el sector agrícola y forestal.

En resumen, la biomasa sólida puede tener importantes roles a corto y mediano plazo en la transición energética de México, como fuente de energía renovable, distribuida y actualmente disponible, apta para sustituir a energéticos fósiles y atender necesidades de a) calor residencial, b) calor industrial, c) generación de electricidad, para servicio público y autoprodutores. Además, dentro del campo de las energías renovables, la biomasa sólida la fuente de bioenergía con más alto potencial de mitigación de emisiones.

DESAFÍOS Y BARRERAS A SUPERAR

Los principales desafíos que enfrentan las actividades de investigación, desarrollo y transferencia de tecnología (I+D+TT) en materia de BCS son:

- a) Validar y transferir tecnologías de BCS comprobadas en otros contextos socioambientales, para verificar su aplicabilidad en México.

Existen en el mundo numerosas tecnologías probadas para el procesamiento y uso eficiente de BCS, originadas tanto en países desarrollados como en vías de desarrollo, y que han demostrado ser costo-eficientes para muy diversas aplicaciones. Sin embargo, en México no se realizan esfuerzos sistemáticos para introducir, probar y adaptar estas tecnologías con el fin de verificar su utilidad y conveniencia. Ejemplos destacados son los microgasificadores para estufas y calentadores de agua, los quemadores de pellets para calderas y hornos industriales, los sistemas de cocombustión en centrales carboeléctricas, y el carbón vegetal como sustituto de coque en la siderurgia.

- b) Desarrollar o adaptar métodos de cosecha sostenible, logística eficiente y técnicas de preprocesamiento adecuadas para reducir los costos de producción y transformación de la biomasa sólida.

La biomasa forestal para energía es relativamente costosa en México (con precios practicados de 20 a 40 USD/tMS "libre a bordo de brecha") debido a varias causas concurrentes: métodos primitivos de cosecha y transporte; bajas tasas de extracción, infraestructura y equipos de transporte inadecuados, y baja productividad de la mano de obra en las operaciones de corte, trozado, acarreo y carga. No se practican la densificación ni el presecado.

- c) Definir estándares, criterios e indicadores de sostenibilidad específicos para la producción de biomasa forestal-energética, y adoptar especificaciones técnicas y patrones de referencia para BCS que sean apropiados para el contexto mexicano.

Los estándares, criterios e indicadores de sostenibilidad utilizados para el manejo de bosques y selvas en México son: a) los establecidos por norma NMX-AA-143-SCFI-2008 y b) los del sistema de certificación Forest Stewardship Council (FSC). Estos son de naturaleza general y no contemplan específicamente el uso de los recursos forestales para fines energéticos. Por otro lado, no hay estándares o normas técnicas que especifiquen las propiedades de los BCS procesados y sirvan de referencia para las transacciones comerciales. Tampoco existen normas ni especificaciones para la biomasa sólida procesada a partir de residuos de origen agrícola, forestal y otros.

- d) Entender y modificar las percepciones negativas de los usuarios acerca de los BCS.

Muchos consumidores de energía perciben a los BCS como energéticos anticuados, sucios, de impactos ambientales negativos y poco sustentables. Estas percepciones se deben, por un lado, a una visión anticuada sobre la conservación (que la ve desligada del manejo sustentable de los recursos), y por el otro, a un desconocimiento de las tecnologías modernas para el uso de BCS. Superar estos preconceptos negativos es un desafío que debemos enfrentar.

Los obstáculos que se oponen a una mayor participación de los BCS son relativamente pocos. No existen barreras regulatorias importantes para su uso como combustibles, aunque el acceso al mercado eléctrico está fuertemente condicionado. Una barrera física importante es la pobre infraestructura existente en la mayoría de las áreas forestales.

Otras barreras que operan *por ausencia* son:

- Las *políticas* no favorables y los incentivos inapropiados o subóptimos que favorecen a otras fuentes de energía o a usos no productivos de los mismos recursos forestales.
- Las estructuras sociales con alta resistencia al cambio, vinculadas a formas de propiedad social de los recursos forestales y a la cultura tradicional de las poblaciones rurales.
- Las percepciones de los consumidores que ven ofertas de energéticos fósiles abundantes, baratos y modernos, en contraposición a los BCS escasos, caros y atrasados.

PRIORIDADES DE INVESTIGACIÓN, DESARROLLO Y TRANSFERENCIA DE TECNOLOGÍA

Las prioridades para I+D+TT se orientan a enfrentar los desafíos y superar las barreras existentes para el desarrollo de los BCS.

En cuanto a *políticas e incentivos*, algunas prioridades son:

- Investigar los fundamentos, los diseños y los resultados obtenidos de las políticas de fomento e incentivos aplicadas en el sector forestal.
- Evaluar el costo y los beneficios obtenidos con los programas de apoyo a la reforestación, plantaciones forestales, cultivos energéticos, bioeconomía y otros similares orientados a fomentar la producción de biomasa para energía.
- Evaluar el beneficio/costo de las inversiones apoyadas por programas de gobierno o beneficiadas por exenciones de impuestos en materia de bioenergía.
- Diseñar un marco de evaluación comparada de programas de apoyo a fuentes renovables de energía.

En el *campo socioeconómico*, algunas prioridades son:

- Investigar los procesos sociales que afectan la dinámica y la gestión de las empresas forestales ejidales y comunitarias, y sus efectos en la inversión y el desarrollo de estas empresas.
- Identificar y evaluar los factores que afectan el proceso de adopción de nuevas tecnologías de cocina en las familias tradicionales.
- Encontrar y ensayar alternativas para cambiar las percepciones y aumentar la aceptación de los usuarios por biocombustibles forestales procesados como energéticos limpios, eficientes y modernos, en aplicaciones industriales y comerciales.
- Evaluar y proyectar los efectos macroeconómicos de la sustitución de energéticos fósiles por BCS en el contexto de la transición energética, en especial su costo fiscal y sus impactos en el balance de divisas y en el endeudamiento nacional.

En el área de la *sostenibilidad*, es necesario:

- Estudiar en forma comparada los potenciales de producción sostenible, de mitigación de emisiones de GEI, de generación de empleos y de valor económico de BCS, junto a sus impactos sobre la conservación de recursos naturales de diferentes formas de producción y uso final de bioenergéticos.

- Estructurar estándares de evaluación y opciones para la certificación de sostenibilidad ambiental, económica y social de los BCS.

BASES PARA UN PROGRAMA NACIONAL DE INVESTIGACIÓN, DESARROLLO Y TRANSFERENCIA DE TECNOLOGÍA EN BIOCOMBUSTIBLES FORESTALES (I+D+TT)

En esta etapa inicial de formación de la Red Temática de Bioenergía (RTB) sólo es posible indicar algunos de los conceptos y orientaciones básicas del Programa Nacional de I+D+TT de Bioenergéticos Sólidos, que se diseñará en 2016. Se presentan a continuación con carácter enunciativo y no limitativo:

Como la mayor parte del consumo actual de biomasa leñosa es para cocción domiciliar (la que actualmente se realiza en forma dispendiosa y contaminante), es necesario un esfuerzo importante para hacerlo más sustentable, más eficaz y más limpio (es decir, con menores emisiones de gases de efecto invernadero [GEI] y otros contaminantes). Esto implica actuar en el diseño, adaptación y ensayo de dispositivos de combustión y transferencia de calor (estufas). Como el desempeño de las estufas depende mucho de las propiedades del combustible usado y de su manejo por los usuarios, hay un gran potencial de mejora al utilizar combustibles preprocesados (astillas, finos de carbón, *pellets*, briquetas) en quemadores de potencia regulable. A su vez, esto implica desarrollar sistemas de cosecha, acopio, transformación, empaque, distribución y venta.

1. Un costo social oculto del actual patrón de uso de leña es su impacto negativo en la salud de los usuarios residenciales. Su estudio es un tema de alta prioridad que requiere enfoques y equipos multidisciplinarios.
2. Una necesidad imperiosa para avanzar en el proceso de transición energética es desarrollar la oferta de BCS estandarizados aplicables a usos industriales, como: finos de carbón vegetal, astillas combustibles, *pellets*. Esta oferta debe interactuar con una demanda potencialmente muy amplia, pero que no tiene todavía una fuerte presencia en el mercado. En este tema, lo crítico no es la tecnología de producción o de utilización sino la organización del abasto o provisión, que implica desarrollar estándares técnicos y de sostenibilidad, establecer acuerdos comerciales y sistemas de precios de referencia, crear o adaptar una logística especializada de movilización y almacenaje para reducir costos, etc.
3. Un área de importante potencial a corto plazo es aprovechar residuos de cultivos de cosechas anuales, como caña de azúcar y cereales, así como impulsar la cocombustión de biomasa en las carboeléctricas. Aquí también las tecnologías ya están desarrolladas pero se requiere un esfuerzo para adaptarlas a las condiciones del campo mexicano.
4. En el corto y mediano plazo, la aplicación más promisoría para los biocombustibles forestales es el uso combinado de astillas de madera con residuos de la caña de azúcar (bagazo y paja) para cogenerar electricidad en ingenios azucareros y destilerías de etanol, con una capacidad cercana a 900 MWe y muy alto factor de planta (más de 7,500 h/año a plena potencia). Esta aplicación puede servir de base para el desarrollo de un mercado nacional de amplia cobertura geográfica, ya que existen ingenios en 19 de los 30 estados de México.

REFERENCIAS

- Chum, H. et al., 2011. Bioenergy. En O. Edenhofer et al., eds. *IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation*. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press.
- García, C.A. et al., 2015. Sustainable bioenergy options for Mexico: GHG mitigation and costs. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43, pp.545-552.
- García, C.A., Riegelhaupt, E. & Masera, O., 2013. Escenarios de bioenergía en México: potencial de sustitución de combustibles fósiles y mitigación de GEI. *Revista Mexicana de Física*, 59(2), pp.93-103.
- IEA, 2012. *World Energy Outlook 2012*, Paris: International Energy Agency.
- IRENA, 2014. *Global Bioenergy. Supply and Demand Projections. A working paper for REmap 2030*, Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency.
- Jetter, J. et al., 2012. Pollutant Emissions and Energy Efficiency under Controlled Conditions for Household Biomass Cookstoves and Implications for Metrics Useful in Setting International Test Standards. *Environmental Science & Technology*, 46(19), pp.10827-10834.
- Johnson, T. et al., 2009. *México: Estudio Sobre la Disminución de Emisiones de Carbono*, Washington DC: Banco Mundial y Mayol Ediciones S.A.
- Loo van, S. & Koppejan, J. eds., 2010. *The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing*, London: Earthscan.
- REMBIO, 2011. *La Bioenergía en México: Situación Actual y Perspectivas.*, México: Red Mexicana de Bioenergía.
- REMBIO, 2006. *La Bioenergía en México: Un Catalizador del Desarrollo Sustentable*, México: Grupo Mundi-Prensa S.A. de C.V.
- Rios, M. & Kaltschmitt, M., 2013. Bioenergy potential in Mexico—status and perspectives on a high spatial distribution. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 3(3), pp.239-254.
- SENER, 2014. *Balance Nacional de Energía 2013*, México: Secretaría de Energía.
- TRIGENIUS, 2015. *Programa Nacional de Dendroenergía 2015-2018*, Wismar, Alemania: Trigenius GmbH.

BIOCOMBUSTIBLES LÍQUIDOS

Lorena Amaya, Enrique Alarcón, Norma L. Gutiérrez, Esthela Ramos, Luis E. Mendoza, Roberto Contreras, Alma H. Serafín, Julio C. Sacramento, Gabriela A. Cuevas, Juan C. Chavarría, Georgina Sandoval y Luis F. Barahona

DEFINICIONES Y ALCANCES

Los biocombustibles líquidos son principalmente utilizados en el sector transporte. Su relevancia estriba en que pueden disminuir emisiones de GEI y se obtienen de fuentes renovables. Actualmente los esfuerzos van encaminados a garantizar que su producción sea sustentable, tanto en sus aspectos ambientales como en los económicos y sociales. Entre las tecnologías que más avances han mostrado están las de producción de bioetanol, biodiésel y bioturbosina.

Bioetanol

El etanol o alcohol etílico es el más conocido de los alcoholes y puede obtenerse por procesos químicos a partir del etileno, o bien por procesos bioquímicos empleando azúcares fermentables provenientes de la caña de azúcar, cultivos con almidón, celulosa y otras formas de biomasa. Al etanol producido a partir de biomasa se le conoce como bioetanol, y su uso como combustible para automóviles se remonta a inicios del siglo XX, cuando Henry Ford diseñó el modelo Ford T (1908-1927), que podía utilizar etanol como combustible. Sin embargo, dado los bajos precios de los derivados del petróleo en esa época, se prefirió usar gasolina como combustible. Casi 100 años después y como consecuencia de los pronósticos negativos sobre la disminución de las reservas de petróleo, y los problemas medioambientales causados por los combustibles fósiles, el bioetanol retomó importancia a nivel global.

El bioetanol se utiliza principalmente en mezclas con gasolina y presenta varias ventajas, entre ellas: a) mayor octanaje (116 AKI, 129 RON contra 86/87 AKI, 91/92 RON de la gasolina), y b) es un oxigenante que puede sustituir a otros que tienen impactos negativos en la salud y el ambiente como es el caso del éter metil terbutílico (MTBE). Sin embargo, su poder calorífico es 30% más bajo que el de la gasolina (26 MJ/kg contra 38 MJ/kg, o 23 MJ/L contra 32 MJ/L) lo que implica un mayor consumo específico, tanto en volumen como en masa. Esto hace también que el punto de equilibrio energético para sustituir gasolina por etanol corresponda a una relación gravimétrica de 1.4:1.

La producción principal de bioetanol para combustible se lleva a cabo en Estados Unidos de América y en Brasil. El primero lo produce a partir de maíz amarillo, en tanto que el segundo lo obtiene de la caña de azúcar. El proceso bioquímico convencional de producción de bioetanol consiste en la conversión de la biomasa en azúcares fermentables, la fermentación de estos azúcares y la posterior separación y purificación del bioetanol. A estos procesos se les conoce como de primera generación. Para mayores detalles de los procesos de producción de bioetanol se remite al lector al Anexo A.

A partir de los altos costos de la materia prima para producir etanol de biomasa proveniente de cultivos, así como debido a cuestiones de sustentabilidad (ver capítulo 6), se han propuesto como materias primas otras formas de biomasa, principalmente aquellas que son un residuo de otra actividad. Entre las principales materias primas de este tipo encontramos a los rastrojos de los cultivos, bagazo de caña, biomasa residual del aprovechamiento forestal y residuos sólidos municipales.

Los residuos orgánicos o subproductos generados por actividades agroindustriales y agrícolas son reservorios de energía “sólida”, que pueden convertirse en energéticos líquidos como el bioetanol lignocelulósico a partir de tecnologías llamadas de segunda generación. Estos tipos de materia orgánica tienen alto contenido de celulosa, hemicelulosa y lignina (Tabla 4.1), componentes que se encuentran juntos, tanto en plantas gimnospermas como angiospermas. La lignocelulosa se encuentra de forma natural en árboles y hierbas, y como residuo de cultivos agrícolas en forma de rastrojos, pajas, bagazos, entre otros.

El bioetanol lignocelulósico se produce actualmente de manera experimental y en plantas piloto. En el mundo hay menos de una decena de plantas que declaran operar a escala industrial. El bioetanol lignocelulósico tiene baja penetración en el mercado por varias razones: la primera es el bajo rendimiento de transformación, debido a que sólo un tercio de la biomasa procesada se convierte en etanol. Una de las barreras para aumentar el rendimiento del etanol de segunda generación es aprovechar al máximo el carbono contenido en celulosas y hemicelulosas; sin embargo, la lignina que envuelve a dichos polímeros impide una hidrólisis completa de los polisacáridos. Por otra parte, sólo la hemicelulosa y la celulosa ($\frac{3}{4}$ partes de la masa de la lignocelulosa) son hidrolizables a azúcares fermentables, y éstos a su vez se convierten a etanol con una eficiencia máxima de 53%.

Tabla 4.1. Principales constituyentes de sustratos lignocelulósicos

Sustrato	Componentes químicos (%)			Referencia
	Celulosa	Hemicelulosa	Lignina	
Paja de arroz	31	25	19	Dale et al. (1996)
Maderas	40-50	25-35	18-35	Pettersen (1984)
	39-45	17-29	22-27	Sjöström (1993)
Paja de trigo	37-41	27-32	13-15	Pettersen (1984)
Paja de maíz	38	26	19	Wiselogel et al. (1996)
Pastos	25-40	25-50	10-30	Pettersen (1984)
Lirio acuático	25	35	10	Bhattacharya & Kumar (2010)
Pulpa de café	17.7	2.3	17.5	Elías (1979)
Bagazo de caña	42	25	20	Kim & Day (2011)
	40-45	30-35	20-30	Peng et al. (2009)30, and 60% (v/v)

El proceso para producir etanol lignocelulósico consta de cinco etapas fundamentales: 1) pretratamiento físico del residuo orgánico, para reducir el tamaño de partícula, 2) tratamiento físico-químico, para romper la estructura de la lignocelulosa, 3) hidrólisis enzimática, para generar monómeros fermentables, 4) fermentación de los azúcares generados durante la hidrólisis y 5) recuperación del alcohol producido (Kim et al., 2016). A pesar de la abundante experimentación para optimizar la producción de bioetanol lignocelulósico (Bhutto et al., 2015; Wen et al., 2015), como notamos anteriormente, la producción a nivel industrial es escasa.

Biodiésel

El biodiésel es un combustible limpio y renovable que puede producirse a partir de aceites vegetales, grasas animales y lípidos de micro algas. Sus propiedades físicas y químicas son muy similares a las del diésel convencional, por lo que es una alternativa prometedora para competir con el combustible diésel (Fukuda et al., 2001). El biodiésel presenta ventajas porque es biodegradable, no tóxico, es producido por fuentes renovables y genera menores emisiones de gases de efecto invernadero (Khan, 2002; Ma & Hanna, 1999).

La Sociedad Estadounidense para Pruebas de Materiales (ASTM), define al biodiésel como “ésteres monoalquílicos de cadena larga de ácidos grasos derivados de recursos renovables, como por ejemplo aceites vegetales o grasas animales, para utilizarlos en motores diésel”.

Puede ser usado en su forma pura (B 100, conocido como “gasoil verde”) o mezclado con diésel en diferentes concentraciones. La mezcla se nombra con base en el porcentaje de biodiésel presente en la mezcla (B20, B50, B80). La más utilizada actualmente es al 20% y cuando se utiliza como aditivo no supera el 5% (Demirbas, 2007; Stratta, 2000).

Al utilizar el biodiésel como combustible líquido, se presentan distintas ventajas e inconvenientes que deben tomarse en cuenta en la producción y consumo del combustible. Además, contiene muy poco azufre y algo de oxígeno, lo que ocasiona que la combustión sea más completa y se reduzca la emisión de partículas y gases contaminantes (Ballesteros, 2003; Larosa, 2001).

El biodiésel es el único combustible que puede usarse directamente en cualquier motor diésel, sin necesidad de hacer algún tipo de modificación debido a las similitudes que presenta, lo que hace que un motor que ya está en uso tenga la alternativa de operar de forma más limpia. Cabe mencionar que el motor diésel originalmente se diseñó para que funcionara con aceite vegetal, pero esto implicaba un problema, ya que la maquinaria no podía lidiar con la viscosidad del aceite. El biodiésel, a diferencia del aceite, puede presentar una viscosidad igual a la del diésel convencional. En la Tabla 4.2 se mencionan de manera resumida y clasificada las ventajas e inconvenientes que presenta el biodiésel (Ishikura, 2005; Knothe et al., 2007; Lapuerta et al., 2005; Manzanares, 2007; Zhang & Gerpen van, 1996).

Los aceites vegetales se han usado como combustibles alternos desde 1900, cuando el Dr. Rudolph Diesel probó por primera vez aceite de cacahuete como combustible en su máquina de compresión (Foglia et al., 2000). Se encontró que al usar aceite vegetal puro, el consumo de energía es muy similar al que se tiene con diésel (Ma & Hanna, 1999). Por períodos cortos, combinaciones como 1:10 y 2:10 de aceite:diésel han tenido muy buenos resultados (Fukuda et al., 2001). Sin embargo, el uso directo o la mezcla de aceites vegetales genera problemas debido a su alta viscosidad, así como a su composición ácida, el contenido de ácidos grasos libres, la formación de gomas debido a la oxidación y polimerización durante el almacenamiento y la combustión, los depósitos de carbón y la poca lubricidad del aceite (Ma & Hanna, 1999).

Los aceites vegetales y grasas animales son apropiados para ser modificados a fin de reducir sus viscosidades, de manera que el producto obtenido tenga propiedades adecuadas para usarse como combustible en motores diésel. Existen varias tecnologías que se han ido desarrollando para lograr la modificación de las grasas y aceites con el fin de producir una mejor calidad de biodiésel, como son las microemulsiones, la pirólisis (*thermal cracking*) y la transesterificación (Leung et al., 2010; Ma et al., 1998; Patil & Deng, 2009).

La vía más utilizada a nivel industrial en la producción de biodiésel es la transesterificación de aceites vegetales, empleando un alcohol de bajo peso molecular, como el metanol o el etanol, y un catalizador.

Cada molécula de aceite consiste de tres ácidos grasos ligados a una molécula de glicerina por enlaces éster, lo que forma un triglicérido.

Tabla 4.2. Ventajas y desventajas que presenta el biodiésel

Ventajas	Desventajas
Propiedades físico-químicas	
Contiene cerca del 11% en oxígeno. El diésel no contiene oxígeno Posee un punto de inflamación muy alto, lo que hace el manejo más seguro	Bajo los 0°C puede existir problemas de congelación de biodiésel y depósitos en el motor Se oxida con mayor rapidez que el diésel, por lo que el almacenamiento a largo plazo puede causar sedimentos y rebasar los estándares de calidad
Medio ambiente	
Emite 50% menos monóxido de carbono y 78% menos dióxido de carbono No genera lluvia ácida, al no contener sulfatos u óxidos de azufre Reduce las partículas contaminantes hasta un 65% Reduce la emisión de óxidos de nitrógeno en la atmósfera un 10% Biodegradable y no tóxico	Mayores emisiones de aldehídos y de NOx Requiere de grandes superficies de terreno para producir la materia prima
Motor	
Mayor desempeño en el motor debido a su alto poder lubricante Reducción de ruido en el motor Mayor facilidad en el inicio de la combustión	Necesita filtros de combustible adicionales Tiende a corroer el hule natural contenido en ciertos vehículos Tiene 8% menos energía por litro que el diésel, reduciendo la potencia y el rendimiento del motor Puede causar obstrucción de filtros en su primer uso en motores que operan con diésel
Económicas	
Contribuye a reducir la dependencia de combustible fósil del país y a la reducción de importaciones de diésel	Costos elevados de producción

La reacción para la obtención de biodiésel ocurre cuando el alcohol de bajo peso molecular, metanol o etanol, reemplaza a uno de los grupos de alcoholes en la unión de ésteres, convirtiendo un triglicérido en un diglicérido y una molécula de biodiésel o un éster. Este tipo de reacción, donde un alcohol reemplaza a otro en un éster se llama transesterificación. La reacción continúa para reemplazar cada uno de los grupos alcoholes convirtiendo cada molécula de triglicérido en tres de biodiésel y una de glicerina (ver Anexo A para mayores detalles). La Tabla 4.3, enlista las propiedades del diésel y de otras materias primas empleadas en su producción, y muestra la gran diferencia que se tiene en la viscosidad, motivo por el cual no se pueden emplear como diésel directamente (Aransiola et al., 2014; Atabani et al., 2012; Leung et al., 2010; Ma & Hanna, 1999).

Tabla 4.3. Características de las algunas materias primas empleadas en la producción de biodiésel

Aceite	Viscosidad cinemática 311 K (mm ² /s)	Número de cetano	Valor Calorífico MJ/Kg	Punto de fluidez (K)	Punto de inflamabilidad (K)
Diésel	2.7	47	45.3	240	325
Ricino	29.7	--	39.5	241.3	533
Maíz	34.9	37.6	39.5	233	550
Algodón	33.5	41.8	39.5	258	507
Linaza	27.2	34.6	39.3	258	514
Palma	39.6	42	--	--	540
Cacahuete	39.6	41.8	39.8	266.3	544
Canola	37	37.6	39.7	241.3	519
Cártamo	31.3	41.3	39.5	266.3	533
Soya	32.6	37.9	39.6	260.8	527
Girasol	33.9	37.1	39.6	258	547
Grasa animal	51.2	--	40	--	474

Además de los aceites vegetales, las microalgas han destacado como una fuente de producción de lípidos para abastecer la industria del biodiésel. Se les han atribuido ventajas sobre los cultivos terrestres: a) no compiten directamente con los mercados alimentarios, b) los cultivos son continuos y no presentan estacionalidad, c) el consumo de agua es mucho menor que el necesario para cultivos terrestres, especialmente en el caso de fotobiorreactores cerrados, d) tienen períodos muy cortos de duplicación de biomasa, debido a una mejor eficiencia fotosintética y de asimilación de nutrientes, e) presentan mayor productividad de aceites, f) pueden utilizar tierras no aptas para otras actividades naturales y antropogénicas, o incluso se pueden cultivar mar adentro, y g) tienen el potencial de fijar CO₂ de efluentes industriales, líquidos o gaseosos (Wang et al., 2008). En años recientes se han incrementado los trabajos que investigan la utilización de aceites de microalgas para producir biodiésel y bioturbosina, o incluso la utilización de toda la biomasa microalgal para producir biocombustibles de uso directo (*drop-in biofuels*).

Bioturbosina

Entre los biocombustibles líquidos que están siendo objeto de estudios y desarrollos tecnológicos se encuentra la bioturbosina o bioqueroseno parafínico sintetizado. La bioturbosina está formada por hidrocarburos en el intervalo de 8 a 16 átomos de carbono, principalmente parafinas ramificadas, las cuales tienen puntos de fusión muy bajos, necesarios para cumplir con una temperatura de congelamiento de -47 °C, indicada en la norma D7566 para bioturbosina, por mencionar uno de las especificaciones más exigentes.

Actualmente existen tres procesos certificados por la ASTM para la producción de bioturbosina que puede ser usada en mezclas con turbosina de petróleo. El primero es el conocido como proceso de Fischer-

Tropsch (FT-SPK). La gama de productos que se obtienen por este proceso es amplia y pocas veces se orienta hacia la obtención de bioturbosina, debido a que generalmente se obtienen rendimientos relativamente bajos para este biocombustible (Matas-Güell et al., 2012). No obstante, tiene la ventaja de una gran flexibilidad en cuanto a la materia prima que puede ser procesada, ya que puede aprovecharse todo tipo de materia orgánica, incluidos desde residuos agrícolas hasta desechos municipales. La bioturbosina obtenida por FT puede mezclarse con turbosina fósil hasta en un 50%.

La segunda tecnología para obtener bioturbosina certificada es conocida como ésteres hidroprocesados y ácidos grasos (HEFA, por sus siglas del inglés Hydrotreated Esters and Fatty Acids). Este proceso es una adaptación del hidrotatamiento, ampliamente usado en la industria de la refinación del petróleo y, en el caso de la producción de bioturbosina, se utilizan aceites y grasas como materia prima, con lo que se obtienen principalmente bioturbosina y diésel renovable. Al igual que para el proceso FT, la bioturbosina obtenida por este proceso puede mezclarse hasta en un 50% con turbosina de petróleo. Una de las principales ventajas del HEFA es la flexibilidad de la materia prima que puede utilizarse (aunque ésta es menor que para el proceso FT), incluyendo una amplia gama de aceites vegetales, grasas animales, aceite de pescado, aceite de cocina usado y aceite de microalgas. Los principales inconvenientes de esta tecnología son los altos costos de inversión y que el precio de la materia prima aún es elevado.

En junio de 2014 la ASTM certificó la tercera tecnología para obtener bioturbosina, conocida como Synthetic Iso-paraffin from Fermented Hydroprocessed Sugar (SIP), la cual previamente había sido referida como Direct-Sugar-to-Hydrocarbon. Se trata de un proceso de fermentación en el que se transforman azúcares en uno de los isómeros del farneseno, hidrocarburo de 15 carbonos que presenta varias insaturaciones y grupos metilo en su estructura. Una vez obtenido, este compuesto es sometido a un proceso de hidrogenación para saturar los dobles enlaces y obtener la bioturbosina, constituida en este caso por una sola isoparafina. Debido a esta peculiaridad, la cantidad en la que se puede mezclar con turbosina de petróleo está limitada al 10%. Sin embargo, se espera en un futuro la implementación de las modificaciones genéticas necesarias para que los microorganismos sinteticen hidrocarburos con otras estructuras y de esta forma se pueda obtener bioturbosina que pueda mezclarse con turbosina convencional en porcentajes mayores.

Además de las rutas tecnológicas mencionadas, existen otras que están siendo investigadas y evaluadas de manera intensiva como el *alcohol to jet* (ATJ) (ver Anexo A para mayores detalles de estos procesos).

Biorrefinerías

La producción exclusiva de biocombustibles presenta altos costos, por lo que es necesario desarrollar otros productos comercializables en el mismo proceso. Por ello, los esquemas actuales son conducidos hacia la integración de varias líneas de producción para que cada una de ellas genere productos de valor agregado, con el fin de mejorar el desempeño económico del sistema. Surge así el concepto de biorrefinería, similar al de una refinería convencional, con la diferencia de que busca convertir biomasa en una variedad de productos de valor agregado, donde incluyen a los propios biocombustibles.

Con esta idea, el biorrefinamiento es la separación de la biomasa en diversos productos y el posible subsecuente procesamiento termoquímico, bioquímico, químico o biológico de ellos para obtener sustancias químicas, alimentos, materiales y energía en combustibles, potencia o calor, análogo a una refinería petroquímica. Los productos de una biorrefinería abarcan una amplia gama de mercados, como el

de los energéticos, construcción, embalaje, materiales compuestos, nuevos materiales o, de acuerdo con el procesamiento y las modificaciones químicas, entran en el mercado de alimentos, farmacia, polímeros, resinas, solventes, síntesis de nuevos productos, entre otros (Sun et al., 2011). En el corto y mediano plazo, se prevé que la síntesis industrial de varios productos químicos básicos (*bulk chemicals*) con producciones mayores a 50,000 toneladas/año se convierta en una ruta enteramente basada en biomasa, destacando el etileno, butadieno, ácido acrílico o estireno, entre otros (Haveren van et al., 2008).

La transición a una economía basada en productos de naturaleza renovable toma cada día mayor relevancia. En un mediano plazo, la dependencia a las importaciones de fuentes fósiles por parte de muchos países alcanzará niveles que pueden comprometer su seguridad energética, por lo que existe la gran necesidad de diversificar las fuentes de energía, además de vincularlas con el tema global de cambio climático dentro del compromiso de reducir las emisiones de GEI, e involucrar el desarrollo regional y rural.

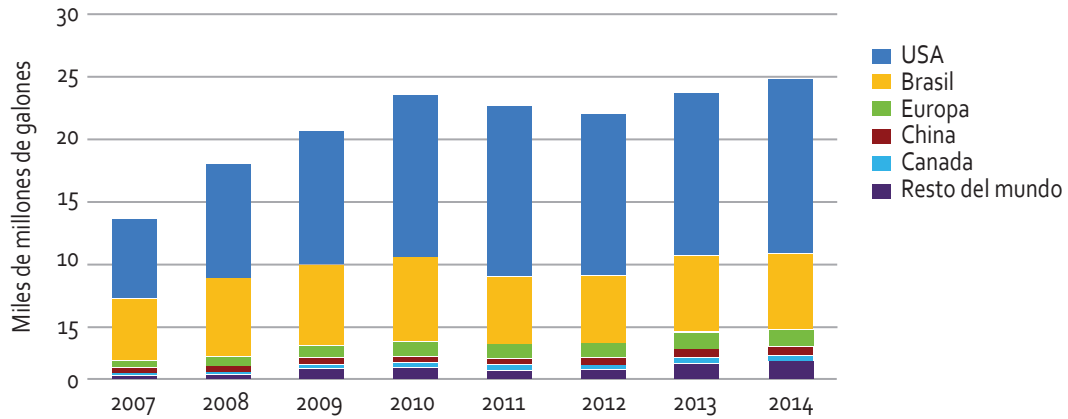
SITUACIÓN INTERNACIONAL

La producción y uso de bioetanol como combustible en el mundo ha venido incrementado año con año debido a las exigencias y cambios en las políticas energéticas de los países. En Estados Unidos de América, el mayor productor de bioetanol a nivel mundial, lo que fomentó el incremento de su producción fueron las leyes como la Clean Air Act Amendments (CAAA) de 1990, cuyo objetivo era la reducción de CO₂ y ozono en el aire. Por otro lado, en el año 2000, la US Environmental Protection Agency (USEPA) recomendó el desuso a nivel nacional del MTBE como oxigenante de la gasolina, y California fue el primer estado en utilizar etanol en lugar de MTBE (Ghosh & Prellas, 2011). En Brasil, el segundo mayor productor de bioetanol, el uso obligatorio de etanol en gasolina es de entre el 20 y 25%, en las mezclas denominadas E20 y E25, respectivamente. Actualmente, más del 50% del combustible utilizado en vehículos ligeros en Brasil, es bioetanol (Ghosh & Prellas, 2011). Además de Estados Unidos de América y Brasil, en muchos otros países es obligatorio el uso de etanol en gasolinas.

En el caso de América Latina, Brasil es el mayor productor de etanol. Actualmente existen 362 plantas productoras de etanol ratificadas por la Agencia Nacional de Petróleo, Gas Natural y Biocombustibles (ANP), lo que corresponde a una capacidad total de producción de 189,32 m³/día de bioetanol hidratado y 100,653 m³/día de bioetanol anhidro. Adicionalmente, en el corto plazo, 21 nuevas plantas de producción recibirán autorización por la ANP para su operación, con una capacidad de producción adicional de 16,885 m³/día de bioetanol hidratado y 10,468 m³/día de bioetanol anhidro. Esto significará 383 plantas de etanol, con una producción total de 111,121 m³/día. Es importante mencionar que el 97.1% de la producción corresponde a bioetanol de primera generación a partir de jugo y melaza de caña de azúcar (Superintendência de Refino, 2015).

En la Figura 4.1 se muestra la producción global de bioetanol por país o región, del 2007 al 2014. Se puede observar un pico de producción en 2014 luego de un declive en el 2011 y 2012. Estados Unidos de América, como el mayor productor de bioetanol, produjo arriba de 14 billones de galones en el 2014 utilizando maíz como materia prima, seguido por Brasil con una producción de 6.19 billones de galones a partir de caña de azúcar; estos dos países producen el 83% del etanol a nivel mundial.

Figura 4.1. Producción global de bioetanol por país o región.



Last updated: June 2015
Printed on October 15

Fuente: F.O. Licht, citado en Renewable Fuels Association, Ethanol Industry Outlook 2008-2015 reports.
(Tomado de <http://www.afdc.energy.gov/data/10331>).

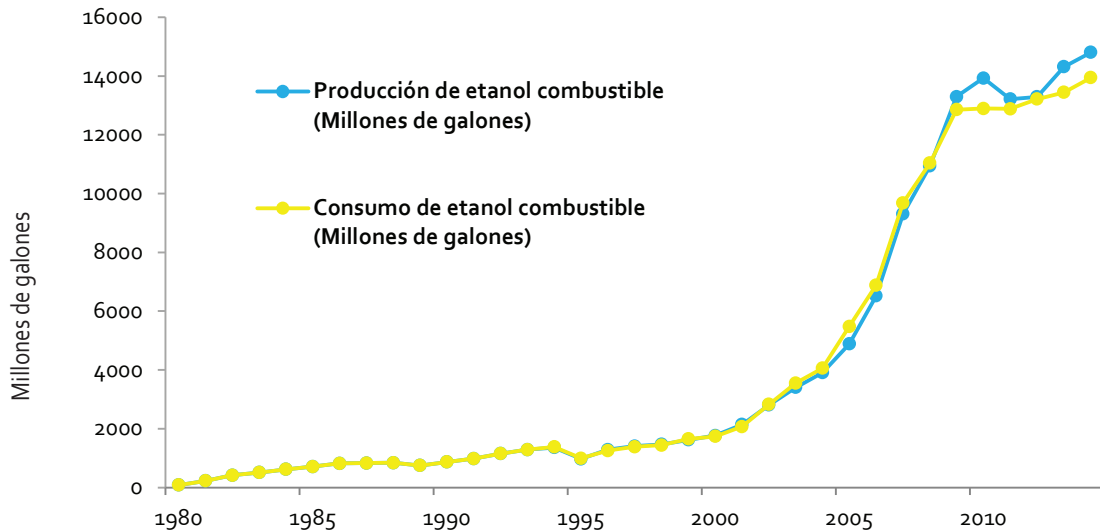
En cuanto a la demanda de este combustible, la Tabla 4.4 muestra los datos de producción y consumo para el periodo del 2008 al 2012. Países como Alemania, Italia, España y Reino Unido incrementaron en un 200% su consumo de etanol, sin lograr ser autosuficientes. En Asia y Oceanía, creció el número de países usuarios de etanol como combustible, y se produjo un déficit del 15% en el 2012 (Fuente: U.S. Energy Information Administration).

Tabla 4.4. Producción y consumo de bioetanol combustible (miles de barriles por día)

País o región	Producción					Consumo				
	Año					Año				
	2008	2009	2010	2011	2012	2008	2009	2010	2011	2012
Norteamérica	620.56	733.49	891.74	938.91	908.25	653.93	745.93	871.07	883.35	879.5
Canadá	15	20	24	30	32.7	24	26	32	42	41.2
México	0	0.003	0.3	0.3	0	0	0.003	0.3	0.3	0.3
Estados Unidos	605.56	713.49	867.44	908.61	875.55	629.93	719.93	838.77	841.05	838
Centro y Suramérica	497.84	476.54	502.91	415.9	428.94	342.8	402.88	393.5	350.12	378.86
Argentina	0.2	0.4	2.1	3	4.3	0	0.05	2	3	4.5
Brasil	466.29	449.81	486.01	392	402.5	336.55	393.29	381.9	332.41	358.5
Colombia	4.4	5.6	4.8	6	8.5	4.4	5.6	4.8	6	6.1
Europa	47.36	59.31	71.6	72.8	68.46	61.57	77.71	98.37	104.3	114.1
Francia	16	17	18	17.4	17	14	14	15	16	13
Alemania	10	13	13	13.3	13.37	13	19	25	26.5	27.2
Italia	1	1	2	1	0.91	2	4	5.2	4.9	8.3
Holanda	0.2	0	2	4	3	3.6	4.6	4.5	5.2	5.2
España	6	8	8	8	7.9	4	5	8	8	8
Suecia	1.7	3	3.5	3.4	2.7	7.3	6.5	7	7	7
Reino Unido	1.2	1.3	5	5	4.3	3.5	5.5	11	11.2	17.4
África	0.3	0.45	0.85	0.62	0.62	0.8	0.43	0.83	1.6	0.6
Asia y Oceanía	48.45	52.08	52.68	61.85	63.55	47.93	53.18	54.67	67.05	73.3
Australia	2.5	3.49	4.73	5.49	5.25	2.5	3.72	5.29	6.22	5.06
China	34.4	37.54	36.67	38.85	43.23	34.4	37.54	36.67	38.85	43.23
India	5	1.72	0.86	6.28	5.25	5	1.72	0.86	6.28	5.25
Japón	0.003	0.25	0.86	0.43	0.43	0.1	0.25	0.47	0.89	0.96
Filipinas	0.01	0.5	1	0.5	0.09	0.1	1.51	2.6	3.77	4.54
Taiwán	0	0.1	0.1	0.5	0.5	0.03	0.1	0.1	0.5	1.8
Tailandia	5.7	7.22	7.77	8.37	8.11	5.5	8.21	8.16	8.11	9.13
GRAN TOTAL	1215	1323	1521	1490	1470	1107	1280	1419	1407	1446

En el caso particular de Estados Unidos, el mayor consumidor de bioetanol combustible, la relación entre producción y consumo ha sido mayor a 1 en los últimos seis años, (Figura 4.2); lo que significa que ese país ya es autosuficiente y produce la gran mayoría del etanol que consume en su mezcla E10, que se distribuye en los 50 estados que lo conforman.

Figura 4.2. Producción y consumo de etanol en Estados Unidos.



Fuente: EIA Monthly Energy Review, 2017 (<http://www.afdc.energy.gov>).

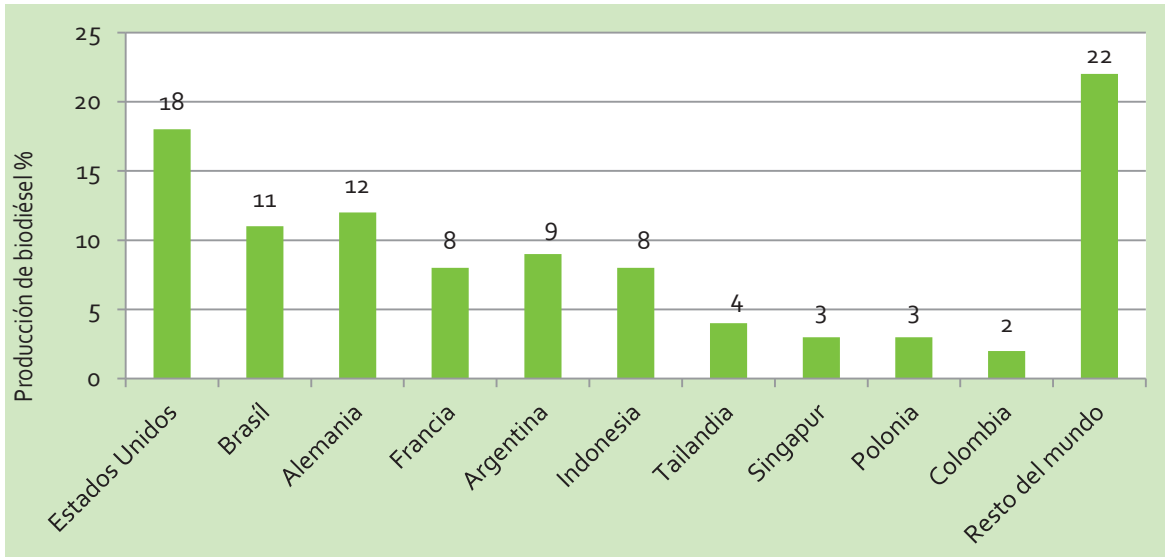
Debido a las presiones internacionales para disminuir el uso de cultivos alimenticios para producir bioetanol y al aumento en el consumo de energéticos en el mundo, se espera que el etanol de segunda generación cobre mayor importancia en los próximos años.

Con apoyo de la Unión Europea, en el marco de Séptimo Programa Marco, en 2011 se anunció el inicio de operaciones de la primera biorrefinería, la planta Crescentino, en Italia, para producir bioetanol completamente a partir de lignocelulosa, además de aprovechar el butanol y otros derivados. La planta comenzó a producir bioetanol de manera industrial en 2013. Se han anunciado proyectos similares en Brasil, Estados Unidos de América, República Checa, España, Finlandia y China.

La importancia del bioetanol lignocelulósico se deriva de la posibilidad de utilizar materia prima más barata, evitar la competencia directa e indirecta con la alimentación humana y, al mismo tiempo, reducir los riesgos ambientales como la degradación del suelo y agua, y la contaminación del aire (Gnansounou & Dau-riat, 2010), además de incidir en la baja emisión de gases de efecto invernadero (GEI).

En cuanto al biodiésel, su producción mundial en el 2001 fue de 959,000 m³, y de 15,760,000 m³ en 2009. De continuar esta tendencia, se espera que para el 2020 se triplique la producción del año 2009. En la Figura 4.3 se observan los principales productores de biodiésel en el mundo, de los cuales Estados Unidos de América, Alemania y Brasil son los tres países con mayor producción (Atabani et al., 2012).

Figura 4.3. Principales países productores de biodiésel



En el caso del biodiésel, en la Unión Europea y Asia ya se ha desarrollado una infraestructura para su comercialización, mientras que en otros países se está analizando cómo y en qué medida deben participar los biocombustibles en sus sistemas energéticos en el futuro. Durante la década pasada, la producción de biodiésel se concentró en países europeos, con un marcado liderazgo por parte de Alemania. En años recientes la mayor capacidad de producción se ha presentado en Estados Unidos de América, Brasil, Argentina, Canadá, Australia y el sur de Asia.

Desde el lanzamiento del Programa Nacional de Producción y Uso de Biodiésel, en diciembre de 2004, hasta finales de 2011, Brasil dejó de importar 7,900 millones de litros de diésel, lo que equivale a una ganancia de aproximadamente 5,200 mdd en su balanza comercial (Sigler, 2013).

En el campo de las microalgas, existen muchas compañías que afirman producir o estar en vías de producir biocombustibles a partir de esta materia prima. Sin embargo, no existe claridad en la información en cuanto a las tecnologías utilizadas, eficiencias o rendimientos, o incluso los volúmenes de producción y los mercados que atienden.

Por otra parte, la industria de la aviación es responsable del 12% de las emisiones de CO₂ originadas por el sector transporte en el mundo, y del 2% de las emisiones de CO₂ totales originadas por la actividad humana (ATAG, 2016). Debido a esta situación, esta industria se ha impuesto metas ambiciosas para reducir sus emisiones de GEI, las cuales incluyen, entre otras, estabilizar las emisiones a partir del año 2020 y reducirlas para el 2050 al 50% del valor de las emisiones emitidas en el año 2005. Para poder alcanzar esas metas la industria aeroespacial está implementando diferentes estrategias que incluyen el uso cada vez mayor de biocombustibles de aviación renovables (bioturbosina), además de mejoras tecnológicas, operacionales, de infraestructura y medidas basadas en esquemas de intercambio de emisiones.

El uso de aviones impulsados por energía solar, o propulsados por turbinas de H₂, se prevé para el mediano y largo plazo, por lo que la bioturbosina es considerada un combustible de transición, del cual se exige que sea *drop-in fuel*, es decir, que su aplicación no requiera la modificación o adaptación de la tecnología usada en la actualidad.

Según el reporte de la International Air Transport Association de 2014, hasta el año pasado se habían realizado más de 1,500 vuelos por 21 aerolíneas, en los cuales se ha usado un porcentaje variable de bioturbosina (IATA, 2014). En la mayoría de los vuelos de prueba realizados hasta ahora se ha empleado bioturbosina sintetizada en lotes especiales para esos fines. Neste Oil tiene actualmente la mayor capacidad de producción de bioturbosina, a través del proceso HEFA, con una producción que asciende a 2 Mt anuales, sin embargo, sólo produce bioturbosina por pedido. Varias empresas productoras de biocombustible de aviación han experimentado diferentes problemas para alcanzar la producción comercial; algunas como Kior, que trabajaba en el desarrollo de procesos de desintegración catalítica, se han declarado en quiebra. Gevo, un actor principal en el desarrollo del proceso ATJ, experimentó dificultades financieras durante algunos años, si bien en 2014 firmó un acuerdo con Lufthansa para evaluar bioturbosina producida a partir de isobutanol, con miras a la aprobación del combustible de ATJ para uso comercial en la aviación. Otras empresas tales como Solazyme han preferido orientarse hacia otros mercados menos demandantes en términos de volúmenes de producción (producción de químicos) que ofrecen mayor rentabilidad en comparación con el mercado de biocombustibles (IATA, 2014).

No obstante, se tienen perspectivas favorables para la bioturbosina. El farneseno obtenido por el proceso SIP ya está siendo producido a escala comercial inicial en la planta de Amyris en Brasil, la cual tiene una capacidad de 40 kt de biocombustible anuales. Actualmente la planta usa caña de azúcar como materia prima, pero se tiene planeado aplicar el proceso en el futuro para procesar residuos forestales y agrícolas (IATA, 2014). Durante 2014 se realizaron más de 200 vuelos comerciales con una mezcla al 4% de biocombustible durante la Copa Mundial de la FIFA, usando 92,000 litros de bioturbosina obtenida mediante el proceso HEFA, suministrada por UOP. Experiencias similares se han dado en otras aerolíneas como KLM, Air France y Norwegian.

Por otra parte, se han anunciado alianzas estratégicas y colaboraciones que darán mayor impulso al uso de bioturbosina en el mundo. De 2009 a diciembre de 2014 la Global Framework on Aviation Alternative Fuels, la base de datos de la International Civil Aviation Organization (ICAO) dedicada a combustibles alternativos, ha anunciado 24 acuerdos entre aerolíneas y productores de combustible. Estos incluyen acuerdos de suministro (p. ej., United Airlines con ALtAir en 2013), cooperación para el desarrollo de tecnología (p. ej., Lufthansa con Gevo para probar la bioturbosina obtenida por el proceso ATJ en 2014) o para el establecimiento de la cadena de producción (p. ej., British Airways con Solena en 2014), e incluso inversiones de aerolíneas en compañías de combustible (United Airlines con Fulcrum BioEnergy en 2015).

Otro aspecto interesante que permitirá impulsar el empleo de biocombustibles para aviación en el corto y mediano plazo, es la originalmente no prevista flexibilidad que se empieza a demostrar sobre el uso de diferentes moléculas que pueden mezclarse en porcentajes limitados con turbosina fósil. Ejemplo de esto es el farneseno obtenido por el proceso SIP, el cual puede mezclarse en hasta 10% con turbosina.

En cuanto a la experiencia con biorrefinerías, los principales actores para el desarrollo de estos procesos a escala comercial son: Estados Unidos de América, Brasil, la Unión Europea y China, y para ello destinan inversiones públicas y mantienen proyectos con diferentes opciones de financiamiento. Si bien los programas tienen en común el desarrollo de biorrefinerías, el objetivo varía un poco. Los de Estados Unidos de América se basan principalmente en la producción de biocombustibles, y los de la Unión Europea también enfatizan la producción de compuestos químicos de interés comercial.

Algunas compañías europeas que están desarrollando los conceptos de biorrefinerías a nivel demostrativo son: Inbicon, Abengoa, NSE Biofuels, Sud Chemie, para la producción de biocombustibles; Bioamber, Solvay, Roquette/DSM, Inventia, para la producción de químicos, y BPS, Chemrec y GoBioGas para varios productos.

En los Estados Unidos de América algunas compañías que se plantean como biorrefinerías son: POET DSM Advanced Biofuels, Abengoa, INEOS Bio, Quad County, American Process Inc., Fiberright, entre otras. También se puede citar a GranBio en Brasil; Enerkem y Husky Energy en Canadá.

IMPORTANCIA ACTUAL Y POTENCIAL EN MÉXICO

De acuerdo a un estudio sobre biocombustibles de la Secretaría de Energía, la situación real sobre la producción de bioetanol combustible es aún incierta. No obstante, existe un gran potencial para el establecimiento de plantas productoras en estados como Jalisco, Veracruz, Tamaulipas, Morelos, Chiapas, Oaxaca, Nayarit, entre otros, donde se produce caña de azúcar y podría implantarse el sorgo dulce.

A nivel gubernamental, se han hecho diversos esfuerzos para iniciar la producción y utilización de bioetanol como una opción de combustible. En este sentido, el estado de Veracruz reporta la producción de 350,000 litros de etanol diarios en una de las plantas de la empresa OXIFUEL. Dicha empresa, es una de las ganadoras de una licitación para surtir etanol a Pemex a inicios del 2016, con un contrato a diez años con 20 millones de litros al año, obtenidos de la caña de azúcar. En dicho proyecto, se plantea la producción de un biocombustible con un octanaje de 113, muy superior al de las actuales gasolineras (87 y 92 para la Magna y Premium, respectivamente). Actualmente, esta empresa produce el bioetanol combustible en dos plantas principalmente: Fábrica de Alimentos Tenerife y Destiladora de Papaloapan, ambas empresas mexicanas. De acuerdo a las proyecciones de OXIFUEL, se espera que para el 2017 ya estén establecidas 300 estaciones de servicio de venta al público, distribuidas en los estados de Veracruz, Puebla, Oaxaca, Yucatán e Hidalgo, donde se pretende ofertar mezclas desde 5 hasta 50% de bioetanol (Rodríguez, 2015).

En el caso del bioetanol lignocelulósico, México presenta un potencial alto para producirlo, debido a que es un país con importante actividad primaria y existencia de residuos orgánicos (ver capítulo 2). Sin embargo, hasta ahora son pocos los esfuerzos que se han realizado a nivel gubernamental para impulsar la producción de bioetanol de segunda generación, salvo los apoyos a la investigación.

Actualmente, en el país existen diversas universidades, centros de investigación e instituciones privadas que fomentan el desarrollo y la innovación para la producción de biodiésel. En general, la tendencia del gobierno es la apuesta por las plantaciones de especies oleaginosas. Sin embargo, también hay proyectos (y empresas) que además de obtener biodiésel de plantaciones y cultivos intensivos, dan paso a un campo con un gran potencial al utilizar como materia prima aceites y grasas residuales. Las empresas más importantes y reconocidas en el ramo de producción de biodiésel en México son:

- SOLBEN, que produce biodiésel a partir de aceites usados con un proceso de transesterificación homogénea alcalina y tiene una capacidad de producción de 3,000 a 20,000 litros diarios. Cuenta con proyectos para el desarrollo comunitario por todo el país y convenios con otras industrias como la minera y universidades (SOLBEN, 2013).
- REOIL se dedica exclusivamente al manejo integral del residuo aceite usado de cocina (RAUC), con el cual produce pre aceite técnico de planta (Pre TPO) que exporta a la Unión Europea para la fabricación de biodiésel (REOIL, 2009).
- Grupo Energéticos es una empresa dedicada a la comercialización, mezcla y transportación de producto de Pemex Refinación y Pemex Gas y Petroquímica. Construyó y operó la primera planta de producción de biodiésel en Latinoamérica, utilizando como materias primas grasas animales como sebo de res

y grasa de pollo, con una capacidad instalada de 1.5 millones de litros mensuales (ENERGEX, 2008). La planta cerró en 2011 luego de que Pemex Refinación dejó de adquirir el biodiésel como aditivo lubricante para diésel de ultra bajo azufre (Torres, 2011).

- Biofuels de México se dedica a la recolección y reciclaje de aceite vegetal usado, para la producción de biodiésel. Inició operaciones en septiembre de 2005 en la Ciudad de México; al día de hoy tiene cobertura en Puebla, Cholula, Cuernavaca, Distrito Federal, Zona Metropolitana, Toluca, Metepec, Guadalajara, Tlaquepaque, Zapopan, Tonalá, Veracruz, Córdoba, Xalapa, Boca del Río, Querétaro, Cancún, Playa del Carmen, Chetumal. Su planta puede generar hasta 100,000 litros al mes (Biofuels de México, s. f.).
- Biodiésel Moreco es una empresa dedicada a la recolección de aceites vegetales y grasas animales de desecho para su posterior conversión a biodiésel. Cuenta con rutas de recolección en el Bajío (MORECO, 2015).

Todas estas empresas utilizan un proceso de catálisis alcalina homogénea y realizan esfuerzos por reducir los costos en el proceso, sin embargo, la falta de incentivos para su producción ocasiona que el precio por litro de biodiésel (cerca de 16 pesos) no sea competitivo.

Para sustituir con biodiésel un 5% del diésel del petróleo utilizado en México, sería necesario instalar 10 plantas industriales con capacidad de 100,000 t/año cada una o 200 plantas pequeñas con capacidad de 5,000 t/año, según prospectivas de 2007 de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (Sagarpa). Estas plantas enfrentarían el reto de la falta de aceites a precios competitivos, pues México importa cerca del 90% de las semillas oleaginosas que consume, lo que aumenta el costo de producción de biodiésel con aceites vírgenes.

En el marco del plan nacional de desarrollo 2007-2012 se expidió la Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos (01/02/2008) y más tarde su reglamento (18/06/2009). El objetivo es promover y desarrollar los bioenergéticos con el fin de coadyuvar a la diversificación energética, garantizar el apoyo al campo mexicano y dar bases que promuevan la producción de insumos para la producción de bioenergéticos, sin poner en riesgo la seguridad alimentaria del país. A partir de ese momento se desarrollaron varios instrumentos, programas y estrategias dirigidos a la generación de biocombustibles: el 7 de octubre de 2009, el Programa de Producción Sustentable de Insumos para Bioenergéticos y de Desarrollo Científico y Tecnológico; el 13 de septiembre de 2009, el acuerdo por el que se emiten los formatos y lineamientos de solicitudes de permisos para la producción, el almacenamiento, el transporte y la comercialización de bioenergéticos del tipo etanol anhidro y biodiésel; el 30 septiembre de 2009, la Estrategia Intersecretarial de los Bioenergéticos así como el Programa de Introducción de Bioenergéticos a cargo de la SENER (SENER, 2009).

En México, todos los esfuerzos por producir biocombustible de microalgas se mueven a nivel de investigación. A pesar de que algunas empresas aseguran que producen biodiésel de esta fuente, no existe evidencia de que dicha producción ocurra en territorio nacional.

La industria del biodiésel en México es aún incipiente, conformada principalmente por productores a pequeña escala a partir de aceites vegetales y aceites o grasas residuales. Se espera que en 2016 inicie la producción de bioetanol a partir de sorgo y caña de azúcar en el noreste del país. Esto quizás abra las puertas a un mercado nacional de bioenergéticos.

En el camino hacia la implementación y uso de bioturbosina, México se ha sumado a los esfuerzos internacionales a través de Aeropuertos y Servicios Auxiliares (ASA), organismo descentralizado de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), que es actualmente el único proveedor de combustible para aviación.

En 2009, ASA, Boeing y UOP-Honeywell firmaron un memorando de entendimiento en el que expresan sus deseos por hacer sinergia y sumar esfuerzos en torno al desarrollo de los biocombustibles de aviación en nuestro país. Posteriormente, durante 2010 y 2011, ASA en colaboración con The Boeing Company, emprendió el proyecto "Plan de vuelo hacia los biocombustibles sustentables de aviación en México", foro realizado para identificar y analizar los elementos existentes y faltantes en la cadena de valor para la producción y uso de bioturbosina en nuestro país en forma regular en el mediano plazo. Este foro contó con la participación de más de 300 instituciones, incluyendo organizaciones civiles, instituciones gubernamentales, empresariales y de investigación, y se abordaron aspectos legales, disponibilidad de insumos, cadenas de producción, infraestructura de refinación, formas de suministro y viabilidad económica entre otros temas relevantes.

ASA también llevó a cabo el Plan de Vuelo para el Estado de Hidalgo para definir las acciones a seguir y los requerimientos prioritarios para lograr la producción de biocombustible de aviación. Además, ASA se ha involucrado en la producción del biocombustible a lo largo de toda la cadena de producción, logrando un inventario significativo que le ha permitido ejecutar varios vuelos de prueba con dicho energético.

Por otra parte, también se ha impulsado el desarrollo de la bioturbosina a través del fondo ASA-Conacyt, un fideicomiso creado para brindar soluciones a las principales problemáticas en materia aeroportuaria y de navegación aérea. Adicionalmente, se prevé para 2016 la creación del clúster de bioturbosina, como parte del Centro Mexicano de Bioenergía, a través del cual se busca alinear los esfuerzos en todo el país para que los centros de investigación, universidades y empresas colaboren de forma coordinada en el desarrollo de biocombustibles de aviación que puedan ser producidos y usados en las diferentes regiones del país.

A nivel nacional, el campo de investigación en las biorrefinerías ha crecido considerablemente para conllevar la línea de producción de los biocombustibles. Bajo este mismo contexto, varios grupos de investigación del país han desarrollado esquemas de líneas de producción que generan bioetanol, biogás, biodiésel, biohidrógeno y biocombustibles sólidos entre otros. Además, la cadena de producción ha sido enfocada no sólo dentro del sector industrial, sino hacia un beneficio socioeconómico aplicado a las comunidades marginadas donde puedan aprovechar sus residuos generando productos de manera sustentable, con un sentido artesanal.

La integración de la Red Temática en Bioenergía (RTB) y la Red Mexicana de Bioenergía (REMBIO) han impulsado positivamente a la conformación de grupos de trabajo con la finalidad de retroalimentar y fortalecer a nivel nacional el establecimiento de las biorrefinerías, desde una metodología que redirecciona los diversos proyectos nacionales para consolidar e implementar el desarrollo de las tecnologías I+D+I, y con este crecimiento, generar beneficios prósperos desde un sentido científico, tecnológico y socioeconómico sustentable para la nación.

DESAFÍOS Y BARRERAS A SUPERAR EN MÉXICO

La producción de bioetanol en México estará basada, al menos en principio, en el uso de caña de azúcar, sin embargo, existen varios desafíos a resolver. De acuerdo con el Dr. Hugo A. García Rañó, investigador del Programa sobre Ciencia, Tecnología y Desarrollo de El Colegio de México, serán tres los conflictos a vencer: el primero, la competencia de mercado con California, el estado con mayor consumo de combustibles en Estados Unidos de América y cuya tendencia de crecimiento al uso de bioetanol ha generado fuertes expectativas y controversias a nivel mundial. El segundo conflicto que se puede presentar es la competencia por los precios de las materias primas, caña de azúcar, para su uso como insumo para la producción de

bioetanol o para la producción de azúcar de mesa; por lo que se deberán fijar reglas claras y contundentes por parte de instancias gubernamentales mexicanas, para la elección de las materias primas y evitar la competencia de precios y desabasto de uno u otro producto (azúcar y etanol). Y finalmente, se habla de la evidente competencia del uso del suelo: suelos fértiles para biocombustibles o suelos fértiles para producir alimentos. Es bajo esta lupa que se observa la falta de políticas públicas y leyes claras sobre la producción, comercialización y uso de bioetanol combustible en México.

Para el desarrollo de la producción del bioetanol lignocelulósico en el país, además se requiere garantizar en el corto, mediano y largo plazo, el suministro de la materia prima para el funcionamiento de las plantas productoras con procesos costeables energética y económicamente.

En el caso del biodiésel, se presentan casos similares: falta de un marco legal para su producción y comercialización, así como definir especies potencialmente generadoras de aceite para la implementación de biorrefinerías y determinar si éstas dan una respuesta a la necesidad de la sustitución de diésel proveniente del petróleo.

México importa del 91 al 93% de las oleaginosas que consume, por lo que si bien es necesario impulsar el sistema-producto de oleaginosas, durante posiblemente una década será inviable utilizar aceites vegetales como materia prima para biodiésel. Lo anterior implica el uso de materias primas de menor calidad (residuos), que tienen un alto porcentaje de ácidos grasos libres y por lo tanto el proceso establecido de esterificación alcalina no es adecuado. Ello hace necesarios otros sistemas catalíticos que permitan además de la transesterificación, la esterificación de los ácidos grasos libres. Dichos catalizadores (ácidos, óxidos metálicos y enzimas) tienen un costo más elevado que los catalizadores alcalinos, por lo que la inmovilización o el uso de sistemas sólidos permitirían una reutilización y ahorro de costos. Sin embargo, un sistema heterogéneo también implica posibles problemas de transferencia de masa y otras consideraciones de proceso, como la posible interacción con el soporte o su desgaste.

Otra alternativa a la escasez de aceites vegetales es el uso de aceites microbianos o de microalgas. En el caso de las microalgas, la composición de los aceites puede ser demasiado rica en ácidos poliinsaturados y la extracción de su aceite es más complicada. Actualmente se está estudiando la genética de las microalgas para intentar controlar la composición de sus aceites, pero pasarán varios años para lograr en las microalgas el control genómico que ya se tiene en varios microorganismos modelo.

Por otra parte, existen pocos estudios que contemplen la recuperación/purificación del biodiésel después de la reacción (*downstream*), su estabilización y su implementación en motores o motogeneradores. Casos de estudio hasta la aplicación final podrían acelerar la creación de mercado para este biocombustible.

Las tecnologías para cultivo y cosecha de microalgas son a la fecha muy costosas para poder competir con los precios de los combustibles fósiles, y aunque en los últimos años se ha progresado mucho en estos aspectos, los cambios súbitos en los precios del petróleo de los recientes años han hecho aún más difícil la entrada de las microalgas al mercado energético. El desafío es así lograr la madurez de tecnologías de cultivo, cosecha y transformación de microalgas en tiempos cortos (Amaro et al., 2011; Fernández-Linares et al., 2012; Pragma, et al. 2013; Singh & Gu, 2010).

La existencia de diferentes mecanismos de certificación de sostenibilidad para biocombustibles implica que su producción comercial está supeditada al cumplimiento de diversos estándares de sostenibilidad (Roundtable of Sustainable Biomaterials, GBEP, US Renewable Fuels Standard). Dichos estándares están basados en el entendimiento actual de los impactos de la industria de los biocombustibles en el medio ambiente, los mercados y la sociedad. Sin embargo, dicho conocimiento es aún limitado en el país y los mecanismos de aplicación para la evaluación de estos sistemas son muy diversos. Por esto, es de gran

importancia tener sólidas bases científicas para identificar los principales aspectos que afectan y definen la sostenibilidad de los sistemas de biocombustibles, y herramientas congruentes que permitan aplicarlos en el diseño y evaluación de los mismos (Singh & Gu, 2010).

La principal barrera a superar para la implementación de biocombustibles de aviación en el mundo es su alto precio en comparación con los combustibles fósiles. Afortunadamente, la producción estable de bioturbosina a nivel comercial está naciendo y todo indica que irá en aumento en los siguientes años, lo cual permitirá que sus precios se reduzcan, sin embargo ello no será posible en el corto plazo (IATA, 2014).

Por otra parte, las políticas gubernamentales hasta ahora no han favorecido en general la producción de biocombustible para aviación, como ha ocurrido en muchos países para el caso de los combustibles de transporte terrestre. Sin embargo, las políticas en materia de biocombustibles en algunos países europeos, así como en Estados Unidos de América, ya comienzan buscar fortalecer la producción y uso de biocombustibles para aviación. En nuestro país, la Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos está enfocada principalmente a etanol anhidro y biodiésel, y no hace una referencia específica a bioturbosina. Por ello es necesario trabajar en un proyecto para modificar estos lineamientos y darles un alcance general que abarque a todos los bioenergéticos. Por otra parte, también es necesario regular y promover la producción de insumos para biocombustibles, así como evaluar el impacto en la seguridad alimentaria y el desarrollo rural. Asimismo, es necesario establecer las bases para asegurar y promover la producción, almacenamiento, transporte y comercialización de bioenergéticos, y evaluar su impacto sobre el balance energético. Otro aspecto que aún está muy poco explorado en México y en el mundo es el relacionado con la sustentabilidad de la producción de insumos y de los bioenergéticos mismos. Cada uno de estos temas presenta grandes vacíos que deberán irse subsanando antes de que la industria de los biocombustibles de aviación pueda establecerse de manera firme.

Otro de los desafíos a superar tiene que ver con el desarrollo de diferentes rutas tecnológicas que aún no han alcanzado la madurez y que se encuentran en el largo camino hacia su posible certificación. Es necesario desarrollar o adaptar procesos que permitan el aprovechamiento de materias primas de bajo costo, tales como residuos agrícolas y forestales. Si bien estos materiales ya pueden ser transformados en bioturbosina, aún se requiere de varias etapas de reacción, y los rendimientos que pueden obtenerse del biocombustible son muy bajos. Esto lleva a otro aspecto relacionado, que es el aprovechamiento de los subproductos generados durante la síntesis de bioturbosina, pero también es necesario encontrar opciones de utilización de los residuos generados en el procesamiento de las materias primas. Los desafíos tecnológicos también se encuentran en la síntesis a menor costo de los insumos que han de ser transformados en bioturbosina. Tal es el caso de la producción de alcoholes para el proceso ATJ, o de la producción de lípidos de microalgas para someterlas al proceso HEFA o una de sus modalidades.

En el caso mexicano, gracias al llamado Plan de Vuelo organizado por ASA, fue posible identificar los siguientes cuellos de botella en la cadena de valor para la producción y uso de bioturbosina en nuestro país: una producción insuficiente de materia prima (se consideró aceite vegetal para ser procesado vía HEFA), infraestructura de procesamiento insuficiente, necesidad del marco legal para biocombustibles de aviación (ya mencionado), así como la necesidad de esquemas de financiamiento adecuados.

PRIORIDADES DE INVESTIGACIÓN, DESARROLLO Y TRANSFERENCIA DE TECNOLOGÍA

Las investigaciones actuales en México con respecto a la producción de bioetanol de primera generación se centran básicamente en la etapa de deshidratación o secado del carburante. Este proceso se ha convertido en el cuello de botella para las empresas que desean producir bioetanol, y los proyectos de producción dejan de ser atractivos dado los costes energéticos de esta etapa que desequilibran los estudios de factibilidad técnico-económicos. Encontrar mejoras en equipos de secado de etanol, que resulten en una mayor eficiencia energética, ayudará a incentivar la participación de empresas en el campo de los bioenergéticos.

Las etapas de extracción de azúcares de caña de azúcar o maíz son bien conocidas y existe la tecnología adecuada para su aplicación inmediata en el país. En México existe capacidad instalada para extracción de azúcares a partir de caña de azúcar y se tiene mucha experiencia en el tema, dada la industria azucarera existente en el país.

Los procesos fermentativos y de destilación para la producción de etanol, han sido también muy bien estudiados en México. Se cuenta con infraestructura instalada en diversos estados. Aunque la mayoría de esta infraestructura está desarrollada para producir etanol para bebidas, pudiera resultar fácilmente adaptable a la producción de bioetanol combustible. Se cuenta también, con diversos grupos científicos y técnicos altamente calificados que se encuentran trabajando en estos temas: diagnóstico, desarrollo y mejora de procesos, instalación de plantas pilotos e industriales, desarrollo de cepas alcoholeras, entre otros. Una oportunidad evidente en estos temas es la formación de recursos humanos altamente capacitados para atender la demanda de personal en las futuras plantas productoras de bioetanol.

Actualmente, en el mundo se han instalado plantas productoras de etanol tomando en cuenta el concepto de biorrefinería, como una manera de hacer más atractiva la producción de bioetanol. Estas plantas integran procesos para ser autosuficientes y no depender de un solo producto (Kamm et al., 2000). Las plantas basadas en este tipo de esquema podrían resultar interesantes en México, por lo que será de suma importancia integrar procesos de producción de bioetanol y productos de alto valor agregado de nueva génesis.

En el caso del biodiésel, las prioridades que se pueden citar son: evaluar por zonas de la República Mexicana las especies prometedoras para la generación de biodiésel; evaluación de los espacios disponibles para el cultivo de las especies generadoras de la materia prima; evaluación del empleo de residuos en la producción de biodiésel; determinar las áreas de tierra no cultivables para satisfactores alimenticios; empleo de algas y microalgas en la generación de aceites; determinar la ubicación de las biorrefinerías, y la adaptación de sistemas donde se emplee diésel para que trabajen con biodiésel.

Desde el punto de vista de proceso, es necesario desarrollar más investigación y tecnología en los catalizadores heterogéneos, enzimáticos, recuperación del biodiésel, su estabilización y distribución.

Las prioridades de investigación y desarrollo en el campo de las microalgas pueden ser: incrementar la productividad de biomasa y lípidos de cultivos comerciales de microalgas creciendo en medios de cultivo con agua residual; desarrollar procesos para reciclar efectivamente el agua y los nutrientes residuales en el medio de cultivo de las microalgas; desarrollar procesos para el aprovechamiento de fuentes industriales de CO₂ en fotobiorreactores; lograr la modificación genética de microalgas para incrementar la productividad de biomasa y lípidos, así como diseñar y proponer esquemas de biorrefinería integrada rentables para maximizar el aprovechamiento de los constituyentes de la biomasa microalgal.

En el caso de la producción de bioturbosina, los temas que se deben atender, de manera general, son: desarrollo de procesos que permitan el aprovechamiento de las fuentes de biomasa más abundantes en el país, para la obtención de bioturbosina; para diferentes procesos es necesario definir condiciones de reacción

y catalizadores que permitan hacer más eficientes las etapas de transformación de insumos hacia bioturbosina; identificar y evaluar moléculas con alto potencial para emplearse directamente como bioturbosina, o bien para emplearse como materia prima para transformarse en bioturbosina a través de una o dos etapas de reacción. Estos compuestos pueden ser residuos o subproductos de otros procesos; establecer un laboratorio para analizar el potencial de los combustibles sintetizados para emplearse como combustibles de aviación; producción de materia prima, tal como aceite vegetal no comestible, y producción de aceite de microalgas para su transformación en bioturbosina; estudios para el escalamiento de diferentes tecnologías e implementación de plantas piloto demostrativas.

REFERENCIAS

- Amaro, H.M., Guedes, A.C. & Malcata, F.X., 2011. Advances and perspectives in using microalgae to produce biodiesel. *Applied Energy*, 88(10), pp.3402-3410.
- Aransiola, E.F. et al., 2014. A review of current technology for biodiesel production: State of the art. *Biomass and Bioenergy*, 61, pp.276-297.
- Atabani, A.E. et al., 2012. A comprehensive review on biodiesel as an alternative energy resource and its characteristics. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(4), pp.2070-2093.
- ATAG, 2016. Facts & Figures. Recuperado de <http://www.atag.org/facts-and-figures> [Accedido octubre 26, 2015].
- Ballesteros, M., 2003. *Fuentes, cultivos y PAC. Producciones aspectos legislativos*. CIEMAT, España: CIEMAT.
- Bhattacharya, A. & Kumar, P., 2010. Water hyacinth as a potential biofuel crop. *Electron J Environ Agric Food Chem*, 9(1), pp.112-122.
- Bhutto, A.W. et al., 2015. Perspectives for the production of ethanol from lignocellulosic feedstock – A case study. *Journal of Cleaner Production*, 95, pp.184-193.
- Biofuels de México, Biodiesel C4.
- Dale, B.E. et al., 1996. Hydrolysis of lignocellulosics at low enzyme levels: Application of the AFEX process. *Bioresource Technology*, 56(1), pp.111-116.
- Demirbas, A., 2007. Importance of biodiesel as transportation fuel. *Energy Policy*, 35(9), pp.4661-4670.
- Elías, L., 1979. Chemical Composition of Coffee-Berry By-Products. En J. Braham & R. Bressani, eds. *Coffee Pulp Composition, Technology, and Utilization*.
- ENERGEX, 2008. Sin título. Recuperado de <http://www.reoil.net/biodiesel.html>.
- Fernández-Linares, L. et al., 2012. Producción de biocombustibles a partir de microalgas. *Ra Ximhai*, 8(3b), pp.101-115.
- Foglia, T.A. et al., 2000. *Technologies supporting the adoption of biodiesel as an alternative fuel*, The Cotton Gin and Oil Mill Presses.
- Fukuda, H., Kondo, A. & Noda, H., 2001. Biodiesel fuel production by transesterification of oils. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 92(5), pp.405-416.
- Ghosh, T. & Prelas, M., 2011. *Energy Resources and Systems: Volume 2: Renewable Resources*, Springer Science & Business Media.
- Gnansounou, E. & Dauriat, A., 2010. Techno-economic analysis of lignocellulosic ethanol: A review. *Bioresource Technology*, 101(13), pp.4980-4991.
- Haveren van, J., Scott, E.L. & Sanders, J., 2008. Bulk chemicals from biomass. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 2(1), pp.41-57.
- IATA, 2014. *Report on alternative fuels. 9th edition*, Montreal-Géneva: International Air Transportation Association.

- Ishikura, C., 2005. *Relatório de estágio produção de biodiesel a partir de óleos usados de fritura*, Brasil: Departamento de Engenharia Química e Alimentos, Universidade Federal de Santa Catarina.
- Kamm, B., Gruber, P.R. & Kamm, M., 2000. Biorefineries – Industrial Processes and Products. En *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Khan, A., 2002. *Research into biodiesel kinetics and catalyst development*. University of Queensland.
- Kim, J.S., Lee, Y.Y. & Kim, T.H., 2016. A review on alkaline pretreatment technology for bioconversion of lignocellulosic biomass. *Bioresource Technology*, 199, pp.42-48.
- Kim, M. & Day, D., 2011. Composition of sugar cane, energy cane, and sweet sorghum suitable for ethanol production at Louisiana sugar mills. *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology*, 38(7), pp.803-807.
- Knothe, G., Krahl, J. & Gerpen van, J., 2007. The biodiesel handbook. 2005. *Champaign, IL, USA*.
- Lapuerta, M. et al., 2005. Diesel emissions from biofuels derived from Spanish potential vegetable oils. *Fuel*, 84(6), pp.773-780.
- Larosa, R., 2001. Proceso para la producción de biodiésel (metiléster o ésteres metílicos de ácidos grasos). Recuperado de http://www.zoetecnocampo.com/Documentos/biodie_lar/biodie_lar.htm [Accedido octubre 26, 2015].
- Leung, D.Y.C., Wu, X. & Leung, M.K.H., 2010. A review on biodiesel production using catalyzed transesterification. *Applied Energy*, 87(4), pp.1083-1095.
- Ma, F., Clements, L.D. & Hanna, M., 1998. The effects of catalyst, free fatty acids, and water on transesterification of beef tallow. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 41(5), pp.1261-1264.
- Ma, F. & Hanna, M.A., 1999. Biodiesel production: a review. *Bioresource Technology*, 70(1), pp.1-15.
- Manzanares, P., 2007. *Biocarburantes. Marco europeo, aspectos legislativos. Apuntes docentes Master Europeo en Energías Renovables*, División de Energías Renovables CIEMAT.
- Matas-Güell, B. et al., 2012. *Benchmark of conversion and production technologies for synthetic biofuels for aviation*, Norway. MORECO, 2015. MORECO. Recuperado de <http://www.moreco.com.mx/> [Accedido octubre 26, 2015].
- Patil, P.D. & Deng, S., 2009. Optimization of biodiesel production from edible and non-edible vegetable oils. *Fuel*, 88(7), pp.1302-1306.
- Peng, F. et al., 2009. Comparative Study of Hemicelluloses Obtained by Graded Ethanol Precipitation from Sugarcane Bagasse. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 57(14), pp.6305-6317.
- Pettersen, R.C., 1984. The chemical composition of wood. En R. Rowell, ed. *The chemistry of solid wood*. Washington DC: American Chemical Society, pp. 57-126.
- Pragya, N., Pandey, K.K. & Sahoo, P.K., 2013. A review on harvesting, oil extraction and biofuels production technologies from microalgae. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 24, pp.159-171.
- REOIL, 2009. El Biodiésel, el mejor combustible renovable a partir de un residuo reciclado. Recuperado de <http://www.reoil.net/biodiesel.html> [Accedido octubre 26, 2015].
- Rodríguez, M., 2015. Orizaba, cuna de los energéticos; se producen 350 mil litros de etanol diarios en Oxifuel. *alcalorpolitico.com*. Recuperado de <http://www.alcalorpolitico.com/informacion/orizaba-cuna-de-los-energeticos-se-producen-350-mil-litros-de-etanol-diarios-en-oxifuel-168322.html#.VpXLLPnhDIV> [Accedido octubre 26, 2015].
- SENER, 2009. *Programa de Introducción de Bioenergéticos*, México: Secretaría de Energía.
- Sigler, E., 2013. México queda 'frito' en biocombustibles. *CNNEXPANSION*. Recuperado de <http://www.cnnexpansion.com/negocios/2013/09/20/mexico-frito-en-biocombustibles> [Accedido octubre 26, 2015].
- Singh, J. & Gu, S., 2010. Commercialization potential of microalgae for biofuels production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(9), pp.2596-2610.
- Sjöström, E., 1993. *Wood chemistry: fundamentals and applications*, San Diego: Academic Press.
- SOLBEN, 2013. Sin título. Recuperado de <http://www.solben.org.mx/es/> [Accedido octubre 26, 2015].

- Stratta, J., 2000. *Biocombustibles: Los aceites vegetales como constituyentes principales del biodiésel*, Departamento de Capacitación y Desarrollo de Mercado. Bolsa de Comercio de Rosario. Argentina.
- Sun, N. et al., 2011. Where are ionic liquid strategies most suited in the pursuit of chemicals and energy from lignocellulosic biomass? *Chemical Communications*, 47(5), pp.1405-1421.
- Superintendência de Refino, P. de G.N. e P. de B., 2015. *Boletim do Etanol No.5*, Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis.
- Torres, A., 2011. Fracasa proyecto de biodiésel. Recuperado de <http://eleconomista.com.mx/estados/2011/07/18/fracasa-proyecto-biodiesel> [Accedido octubre 26, 2015].
- Wang, B. et al., 2008. CO₂ bio-mitigation using microalgae. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 79(5), pp.707-718.
- Wen, P.L. et al., 2015. Optimal production of cellulosic ethanol from Taiwan's agricultural waste. *Energy*, 89, pp.294-304.
- Wiselogel, A.E. et al., 1996. Compositional changes during storage of large round switchgrass bales. *Bioresource Technology*, 56(1), pp.103-109.
- Zhang, Y. & Gerpen van, J.H., 1996. *Combustion analysis of esters of soybean oil in a diesel engine*, SAE Technical Paper.

BIOCOMBUSTIBLES GASEOSOS

Germán Buitrón, Julián Carrillo, Felipe Alatríste y Elías Razo

DEFINICIÓN Y ALCANCES

En esta revisión se consideran al biometano y el biohidrógeno como los dos gases de importancia dentro de los biocombustibles gaseosos. La producción de biometano a partir de residuos líquidos, sólidos y biomasa, es una tecnología que ha alcanzado la madurez. Por otro lado, la tecnología para la producción de biohidrógeno a partir de los mismos sustratos se encuentra en etapa de desarrollo. Se hace una revisión del estado del arte para la tecnología de producción de ambos combustibles gaseosos.

Biogás

El biogás, compuesto de 55-77% (v/v) CH_4 y 25-45% (v/v) CO_2 , es una fuente alternativa de energía que puede ser utilizada en la producción de energía eléctrica y calor, como combustible automotriz y como sustituto del gas natural (Weiland, 2010). Es el producto principal de la digestión anaerobia y puede ser producido a partir de una gran variedad de sustratos orgánicos, incluidos los residuos sólidos (p. ej., residuos agrícolas, estiércol, residuos orgánicos domésticos, etc.) y aguas residuales domésticas e industriales. Por ello el biogás representa una alternativa no solo a los combustibles fósiles, sino también a la creciente necesidad por revalorizar los residuos orgánicos.

A escala industrial, la producción de biogás a partir de distintos tipos de aguas residuales se lleva a cabo en reactores de segunda generación, de altas velocidades (24 kg DQO/m³-día) y tiempos de residencia relativamente cortos. En general, dichos reactores deben cumplir con tres características principales a fin de tener un desempeño óptimo (Mes de et al., 2003): alta densidad celular, máximo contacto sustrato-bacteria y adecuada transferencia de masa entre el sustrato y la biomasa.

Los biorreactores que cumplen en mayor o menor grado con los requerimientos anteriores, pueden clasificarse en reactores de biomasa fija, reactores de lecho fluidizado y reactores anaerobios de flujo ascendente (UASB). Adicionalmente, las distintas características de las aguas residuales han impulsado el surgimiento de nuevas configuraciones como los reactores anaerobios de contacto, reactores de lecho empacado y reactores de lecho expandido, entre otros.

Existe una amplia variedad de sustratos sólidos con potencial para la producción de biogás, por ejemplo, residuos agrícolas, estiércol, residuos domésticos, entre otros. Adicionalmente, algunos cultivos pueden destinarse directamente para la producción del biocombustible (Lettinga, 2001).

Cuando los residuos sólidos son dispuestos en rellenos sanitarios, es posible recuperar el biogás generado en la descomposición de la materia orgánica. El biogás se extrae generalmente mediante una serie de pozos de extracción con sistemas de soplado o aspiración. Este sistema dirige el biogás hacia un punto central donde puede ser procesado o tratado y, en última instancia, dirigido para su utilización. A nivel mundial, el potencial de generación de metano en rellenos sanitarios es de 0.03-6.58 toneladas de metano por habitante por año, aproximadamente (Bolan et al., 2013).

Además de la producción de biogás en rellenos sanitarios, una de las prácticas más comunes para la producción de metano a partir de residuos sólidos orgánicos es la codigestión, que consiste en la utilización de

residuos sólidos, principalmente residuos agroindustriales, en combinación con otras fuentes de sustratos orgánicos, por ejemplo, estiércol de animales y aguas residuales (Weiland, 2010). De esta manera se logra superar el inadecuado balance de nutrientes en el sustrato sólido e incrementar consecuentemente la eficiencia del proceso (Zhang et al., 2014).

Biohidrógeno

El biohidrógeno es un combustible alternativo a los combustibles fósiles y es considerado un vector energético con gran potencial, sobre todo por su contenido energético específico de 122 kJ/g, mayor a cualquier otro combustible. Entre las tecnologías de generación de hidrógeno, la que utiliza microorganismos es atractiva frente a los procesos termoquímicos por sus menores requerimientos energéticos, así como por sus ventajas ambientales debido a la potencial valorización de residuos sólidos y aguas residuales con alto contenido orgánico, como los son los residuos agroindustriales, municipales, o efluentes de la industria alimentaria (Buitrón & Carvajal, 2010; Buitrón et al., 2014; Davila-Vazquez et al., 2008).

Existen varias tecnologías para la producción de biohidrógeno, incluyendo biofotólisis, fotofermentación, fermentación oscura y procesos bioelectroquímicos (Azwar et al., 2014), las cuales no son excluyentes, por el contrario, el uso de tecnologías acopladas disminuye el costo de producción y aumenta los rendimientos (Hay et al., 2013).

Para la producción de biohidrógeno se pueden utilizar tanto cepas puras como consorcios microbianos. Al utilizar cultivos puros es posible realizar modificaciones genéticas para eliminar las rutas metabólicas que compitan en la producción de hidrógeno, o acoplar nuevas rutas no nativas, de esta manera se pueden incrementar el rendimiento y la productividad. También se pueden realizar modificaciones con el objetivo de utilizar sustratos que la cepa original no podía consumir (Mathews & Wang, 2009; Rosales-Colunga & Rodríguez, 2014). Estas características ofrecen la oportunidad de desarrollar procesos viables, económicamente competitivos a mayor escala para la producción de hidrógeno a partir de recursos naturales.

SITUACIÓN INTERNACIONAL

Biogás

A escala global, la producción de biogás se ha expandido rápidamente en diferentes países. En la Unión Europea, la producción de energía a partir de biogás fue de 12 millones de toneladas de equivalentes de petróleo (Mtep), que representan un incremento del 15.7% con respecto al año anterior (EurObserv'ER, 2013). En dicha región, Alemania se sitúa como el líder en producción de biogás con una generación mayor a 6 Mtep en 2012. El Reino Unido, segundo de la lista con casi 2 Mtep, incrementó su capacidad de producción mediante la construcción de 58 nuevas plantas de biogás. Por último, en Italia, el tercer mayor productor de biogás de Europa, el número de plantas de producción creció de 521 a 1,264 en un solo año, y su capacidad es ligeramente mayor a 1.1 Mtep (EurObserv'ER, 2013; REN21, 2014).

En latitudes distintas, Estados Unidos de América posee más de 2,200 plantas de producción de biogás; en Latinoamérica, Brasil es líder de la región y tiene en operación alrededor de 24 plantas de biogás, que representan una producción energética de 84 MW (REN21, 2014).

Biohidrógeno

Gran parte de la investigación a nivel mundial está enfocada en la obtención de energía para poder sustituir a los combustibles fósiles y reducir las emisiones de dióxido de carbono (Oh et al., 2011). El hidrógeno es uno de los vectores de energía más atractivo debido a su alta densidad energética (Davila-Vazquez et al., 2008). Se estima que si se realizan las inversiones adecuadas en tecnología e infraestructura, se podrá realizar la transición de una economía basada en el petróleo a una basada en hidrógeno para el año 2050 (Lee & Chiu 2012).

Se ha reportado que la producción mundial del hidrógeno crecerá a una tasa de 5.6% anualmente, entre los años 2011 al 2016, implicando un aumento del mercado de hasta 118 mil millones de dólares al final de dicho período. Actualmente solo el 1% del hidrógeno producido es generado a partir de biomasa, siendo el 88% producido a partir de combustibles fósiles (Hay et al., 2013). Diferentes mapas de rutas para el hidrógeno de países como Estados Unidos de América, Japón y la Unión Europea, prevén un mercado establecido de hidrógeno libre de emisiones de carbono en el año 2050, lo que implica una completa transición de los combustibles fósiles, para usos industriales, domésticos y en el transporte (European Commission, 2008; United States Department of Energy, 2006).

Entre las metas específicas que se han fijado a nivel internacional, el Departamento de Energía de los Estados Unidos de América marcó como objetivo la reducción de los costos de producción de hidrógeno por vía biológica a 10 dólares por un galón de gasolina equivalente para el 2020. Dicha meta está comprometida por los precios de la materia prima, que para biocombustibles avanzados se consideran fuentes de biomasa sustentable, como los azúcares liberados de residuos lignocelulósicos (United States Department of Energy, 2015).

Debido a estas razones, la producción de biohidrógeno es uno de los temas de investigación más activo (611 artículos publicados en el 2013, búsqueda en Sciencedirect con la palabra "biohydrogen"). De acuerdo a un estudio para Estados Unidos de América, Japón, China e India (Lee & Chiu, 2012) para maximizar los beneficios económicos basados en el hidrógeno se debe privilegiar la inversión en biohidrógeno sobre la inversión en hidrógeno.

La producción de hidrógeno forma parte de los planes estratégicos de las agencias de energía de Estados Unidos de América, Europa y Japón, sobre todo asociado con las energías renovables (Agency for Natural Resources and Energy of Japan, 2014; European Commission, 2008; United States Department of Energy, 2015). No se pretende en ningún plan sustituir a las fuentes actuales de obtención masiva de energía. La producción de hidrógeno a partir de fuentes renovables, como biohidrógeno, es una importante contribución a la reducción de gases de efecto invernadero y por lo tanto influye significativamente en la mitigación del cambio climático.

El desarrollo del mercado de este sector energético dentro de las energías renovables prevé, de acuerdo con la mayoría de los planes estratégicos, enfocarse a la generación de electricidad, principalmente a través de celdas de combustible. Las estrategias de los planes varían, de acuerdo con las economías. Por ejemplo, Estados Unidos de América y la Unión Europea esperan desarrollar los diferentes procesos y comercializarlos. Japón impulsará su uso a través de vehículos y celdas de combustibles y, a mediano y largo plazo (2025), impulsará la producción y suministro de hidrógeno a gran escala. El sector automotriz es uno de los varios mercados a los que va enfocado, así como a los sistemas de respaldo eléctrico para cortes energéticos.

El biohidrógeno parece ser un biocombustible ideal, sin embargo hay que superar ciertos retos para poder producirlo a gran escala (Hallenbeck & Ghosh, 2012). Desarrollar procesos de producción de hidrógeno robustos (Hernández-Mendoza & Buitrón, 2014) y eficientes, conocer las rutas metabólicas que intervienen en la producción de hidrógeno y desarrollar cepas modificadas genéticamente puede contribuir a que se establezcan procesos competitivos de producción de este gas (Abo-Hashesh et al., 2011).

IMPORTANCIA ACTUAL Y POTENCIAL SITUACIÓN PARA MÉXICO

Biogás

En el periodo comprendido entre 2002 y 2005, México fue uno de los países líderes en el desarrollo de la industria de digestión anaerobia en el mundo. Sin embargo, análisis financieros de baja calidad aunados a problemas técnicos, y ciertos movimientos del mercado, lograron frenar el acelerado crecimiento inicial (Eaton, 2010). No obstante, México se mantiene como uno de los países con mayor potencial para la producción de biometano a partir de residuos agrícolas, con un potencial estimado de 5-7 millones de toneladas de equivalentes de CO₂ (Eaton, 2010).

En el 2012, la producción nacional de biogás fue de aproximadamente 1.82 PJ, equivalente a 0.03% del total de la energía generada en el país (SENER, 2013). En particular, en el grupo de las energías renovables, el biogás es la quinta fuente potencial de energía, por debajo de la hidroenergía, geoenergía, energía eólica y la biomasa sólida. Por lo anterior, y tomando en consideración el contexto global, la industria del biogás en México sufre de un rezago importante (Tabla 5.1).

Biohidrógeno

Diversos estudios a nivel laboratorio han demostrado la factibilidad de la producción de biohidrógeno a partir de residuos agroindustriales producidos en altos volúmenes en México, tales como ensilados, pajas de avena, vinazas de la industria tequilera, suero de la fabricación de queso y la fracción orgánica de residuos de cafetería (Arreola-Vargas et al., 2013; Arreola-Vargas et al., 2015; Buitrón & Carvajal, 2010; Buitrón et al., 2014; Davila-Vazquez et al., 2009; Ramos et al., 2012; Valdez-Vazquez et al., 2009). También se han sugerido procesos para acoplar el proceso productor de hidrógeno a la producción de biogás (Buitrón et al., 2014). Sin embargo, su factibilidad a nivel industrial no ha sido reportada.

Tabla 5.1. Entrada de energía primaria a centros de transformación en petajoules [PJ] (SENER 2013)

Carbón	446.74	7.99%
Petróleo	2813.23	50.33%
Condensados	74.55	1.33%
Gas natural	1848.33	33.06%
Núcleo energía	91.32	1.63%
Hidroenergía	114.68	2.05%
Geoenergía	133.13	2.38%
Energía eólica	13.12	0.23%
Bagazo de caña	52.88	0.95%
Biogás	1.82	0.03%
Solar	0.25	0.004%

México es el tercer país más grande en Latinoamérica en términos de área de cultivo; generó 75.73 millones de toneladas de materia seca en el 2006, con potencial de ser transformada en biocombustibles, como biohidrógeno por vía fermentativa (Valdez-Vazquez et al., 2010).

Por otro lado, la producción de biocombustibles a partir de residuos agroindustriales, forestales y otros sustratos como algas, está contemplada en la legislación mexicana, debido principalmente a que no compromete la seguridad alimentaria (Diario Oficial de la Federación, 2008).

La dependencia energética mundial de los combustibles fósiles no es ajena a México, y por lo tanto se deben de buscar alternativas que permitan un desarrollo sustentable. La producción de biocombustibles debe ser uno de los pilares para lograr el desarrollo sustentable. El potencial de producción de biocombustibles en México es muy alto, sin embargo, es necesario identificar los sustratos más abundantes en el país con potencial para la producción de biocombustibles y desarrollar la tecnología para obtener los biocombustibles más adecuados. Para este propósito, la generación de cepas modificadas genéticamente es una herramienta de gran ayuda.

ROLES EN LA TRANSICIÓN ENERGÉTICA

Biogás

Hoy en día, la mayor parte de la energía en México es producida a partir de petróleo, gas natural y carbón (> 90%). Sin embargo, el cambio hacia las energías renovables es cada vez más apremiante. El subsector de las energías renovables es liderado por la hidroenergía y la geoenergía, enfocadas a generar electricidad. En cuanto a fuentes de energía térmica, orientada a sustituir combustibles convencionales, una fuente de energía renovable relevante es el biogás.

El biogás, como actor en la transición energética, ofrece dos ventajas principales de gran importancia:

- Posibilidad de utilizar materias primas de escaso valor económico, como los residuos sólidos urbanos, residuos agroindustriales y aguas residuales domésticas.
- Disponibilidad de tecnología moderna y funcional, utilizada con éxito en la producción de biogás alrededor del mundo.

Biohidrógeno

En México se están adoptando políticas que permiten disminuir la dependencia energética del petróleo. Los estudios sobre la producción de biohidrógeno se encuentran aún en fase de laboratorio y es necesario pasar en los próximos cinco años al desarrollo de tecnología, para que a largo plazo (diez años) se pueda contar con plantas a nivel industrial. El biohidrógeno presenta ventajas sobre los demás biocombustibles. El hidrógeno es considerado un combustible alternativo prometedor, por su alta densidad energética y porque puede ser utilizado en celdas de combustibles para obtener energía eléctrica de manera directa. Esta característica lo hace el combustible alternativo en la transición energética ya que, una vez superadas las limitantes de almacenamiento, este puede ser transportado a donde se requiera la energía eléctrica o puede ser utilizado en automóviles eléctricos; estos potenciales usos se contemplan en los mapas de ruta anteriormente citados para el año 2050 (European Commission, 2008; United States Department of Energy, 2006; United States Department of Energy, 2015).

La posibilidad de utilizar residuos para la producción del biohidrógeno es muy atractiva porque permite la descentralización de la producción, ubicándola allí donde los residuos son generados.

Para desarrollar una economía del biohidrógeno es necesario invertir en proyectos científicos y de desarrollo tecnológico que nos permitan transitar hacia la autonomía energética sustentable.

DESAFÍOS Y BARRERAS A SUPERAR

Biogás

- Desarrollar y optimizar las estrategias de digestión y codigestión anaerobia para la utilización de residuos sólidos y aguas residuales tomando en consideración los distintos contextos regionales del país.
- Desarrollar y adaptar métodos existentes de producción y almacenamiento de biogás a partir de residuos de alto volumen de generación en México (por ejemplo: residuos agroindustriales, aguas residuales, fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos, etc.).
- Definir la metodología para evaluar la factibilidad e impacto económico de la generación de biogás a partir de residuos de alto volumen de generación.
- Desarrollar soluciones para la producción, almacenamiento y utilización de biogás a escala local y regional.
- Desarrollar y optimizar métodos de pretratamiento para incrementar la producción de biogás.

Biohidrógeno

- Disminuir los costos de producción.
- Desarrollar procesos robustos y con altos rendimientos para producir hidrógeno a partir de residuos líquidos y sólidos y de biomasa.
- Acoplar diferentes tecnologías para maximizar la producción de hidrógeno (fermentación oscura, fotofermentación, sistemas bioelectroquímicos microbianos).
- Evaluar nuevas estrategias de pretratamiento como cultivos de microorganismos con capacidad hidrolítica.
- Utilizar consorcios microbianos bioaumentados con especies fermentativas eficientes, uso de organismos genéticamente modificados, entre otros.
- Escalar la tecnología a plantas piloto y finalmente a plantas demostrativas.
- Desarrollar sistemas de almacenamiento de bajo costo, de alta capacidad y con materiales ligeros.
- Reducir los costos de las celdas de combustible.
- Desarrollar políticas públicas que estimulen la infraestructura y el mercado de este biocombustible.

PRIORIDADES DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO

Biogás

- Investigación aplicada orientada al pretratamiento de los residuos agroindustriales, principalmente de origen lignocelulósico, que ayuden a mejorar la eficiencia de obtención de licores ricos en azúcares, con el menor contenido de sustancias potencialmente tóxicas.
- Desarrollo de nuevos diseños de reactores para llevar a cabo la digestión o codigestión de residuos sólidos y semisólidos.
- Desarrollo de sistemas que permitan controlar y dar seguimiento puntal a los procesos de obtención de biogás.

Biohidrógeno

- Investigación aplicada orientada al desarrollo de procesos robustos, estables y con elevado rendimiento.
- Establecer los procesos más adecuados para poder realizar el escalamiento.
- Sistemas de acondicionamiento de biomasa basados en cultivos hidrolíticos.
- Cultivos fermentativos, cepas puras u organismos genéticamente modificados que igualen el rendimiento máximo teórico.
- Sistemas fermentativos en continuo de alta densidad que permitan mejorar las velocidades de producción.
- Investigación aplicada sobre las estrategias de acoplamiento de configuraciones de sistemas fermentativos con celdas de electrolisis microbianas, con sistemas fotofermentativos o procesos de digestión anaerobia.
- Desarrollo de cepas genéticamente modificadas con altos rendimientos de biohidrógeno.

BASES PARA UN PROGRAMA NACIONAL DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO

- Elaboración de un inventario de las regiones productoras de desechos que en principio puedan ser usados para la producción de biogás y biohidrógeno.
- Estudios de factibilidad técnica y económica para la implementación de centrales productoras de biogás y biohidrógeno en regiones estratégicas del país.
- Elaboración de programas para concientizar a la sociedad de la importancia del aprovechamiento de los desechos agroindustriales y la fracción orgánica de los desechos urbanos.
- Elaboración de un plan de incentivos económicos que permitan la inversión en programas de producción de biogás y biohidrógeno.

REFERENCIAS

- Abo-Hashesh, M., Wang, R. & Hallenbeck, P.C., 2011. Metabolic engineering in dark fermentative hydrogen production; theory and practice. *Bioresource Technology*, 102(18), pp.8414-8422.
- Agency for Natural Resources and Energy of Japan, 2014. *Summary of the Strategic Road Map for Hydrogen and Fuel Cells*, Japan: Ministry of Economy, Trade and Industry.
- Arreola-Vargas, J. et al., 2015. Continuous hydrogen production in a trickling bed reactor by using triticale silage as inoculum: effect of simple and complex substrates. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 90(6), pp.1062-1069.
- Arreola-Vargas, J. et al., 2013. Hydrogen production from acid and enzymatic oat straw hydrolysates in an anaerobic sequencing batch reactor: Performance and microbial population analysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(32), pp.13884-13894.
- Azwar, M.Y., Hussain, M.A. & Abdul-Wahab, A.K., 2014. Development of biohydrogen production by photobiological, fermentation and electrochemical processes: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 31, pp.158-173.
- Bolan, N.S. et al., 2013. Landfills as a biorefinery to produce biomass and capture biogas. *Bioresource Technology*, 135, pp.578-587.
- Buitrón, G. et al., 2014. Hydrogen and methane production via a two-stage processes (H₂-SBR + CH₄-UASB) using tequila vinasses. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(33), pp.19249-19255.
- Buitrón, G. & Carvajal, C., 2010. Biohydrogen production from Tequila vinasses in an anaerobic sequencing batch reactor: Effect of initial substrate concentration, temperature and hydraulic retention time. *Bioresource Technology*, 101(23), pp.9071-9077.
- Davila-Vazquez, G. et al., 2009. Continuous biohydrogen production using cheese whey: Improving the hydrogen production rate. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34(10), pp.4296-4304.
- Davila-Vazquez, G. et al., 2008. Fermentative biohydrogen production: trends and perspectives. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 7(1), pp.27-45.
- Diario Oficial de la Federación, 2008. *Ley de promoción y desarrollo de los bioenergéticos*, México: Secretaria de Gobierno.
- Eaton, A., 2010. *Mexico Biodigester Development Program Sustainable Agriculture, Renewable Energy, and Emissions Reductions in the Lerma-Chapala Watershed*, International Renewable Resources Institute.
- EurObserv'ER, 2013. *The State of Renewable Energies in Europe*, Paris: Observ'ER.
- European Comission, 2008. *HyWAYS the European Hydrogen Roadmap*, Brussels.
- Hallenbeck, P.C. & Ghosh, D., 2012. Improvements in fermentative biological hydrogen production through metabolic engineering. *Journal of Environmental Management*, 95, Supplement, pp.S360-S364.
- Hay, J.X.W. et al., 2013. Biohydrogen production through photo fermentation or dark fermentation using waste as a substrate: Overview, economics, and future prospects of hydrogen usage. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 7(3), pp.334-352.
- Hernández-Mendoza, C.E. & Buitrón, G., 2014. Suppression of methanogenic activity in anaerobic granular biomass for hydrogen production. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 89(1), pp.143-149.
- Lee, D.-H. & Chiu, L.-H., 2012. Development of a biohydrogen economy in the United States, China, Japan, and India: With discussion of a chicken-and-egg debate. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(20), pp.15736-15745.
- Lettinga, G., 2001. Digestion and degradation, air for life. *Water Science and Technology*, 44(8), pp.157-176.
- Mathews, J. & Wang, G., 2009. Metabolic pathway engineering for enhanced biohydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34(17), pp.7404-7416.
- Mes de, T. et al., 2003. Methane production by anaerobic digestion of wastewater and solid wastes. En J. H. Reith, R. H. Wijffels, & H. Barten, eds. *Bio-methane & Bio-hydrogen Status and perspectives of biological methane and hydrogen production*. The Hague, Netherlands: Dutch Biological Hydrogen Foundation, pp. 58-102.

- Oh, Y.-K. et al., 2011. Current status of the metabolic engineering of microorganisms for biohydrogen production. *Bioresource Technology*, 102(18), pp.8357-8367.
- Ramos, C. et al., 2012. Effect of the initial total solids concentration and initial pH on the bio-hydrogen production from cafeteria food waste. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(18), pp.13288-13295.
- REN21, 2014. *Renewables 2014. Global Status Report*, Paris: Renewable Energy Policy Network for the 21st Century.
- Rosales-Colunga, L.M. & Rodríguez, A.D.L., 2014. Escherichia coli and its application to biohydrogen production. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 14(1), pp.123-135.
- SENER, 2013. *Balance Nacional de Energía, 2012*, México: Secretaría de Energía.
- United States Department of Energy, 2006. *Hydrogen Posture Plan. An Integrated Research, Development and Demonstration Plan*, US: Accesible en: <http://energy.gov/eere/fuelcells/downloads/hydrogen-posture-plan-integrated-research-development-and-demonstration>.
- United States Department of Energy, 2015. *Multi-Year Research, Development, and Demonstration Plan. Section 3.1 Hydrogen Production*, Accesible en: <http://energy.gov/eere/fuelcells/downloads/fuel-cell-technologies-office-multi-year-research-development-and-22>.
- Valdez-Vazquez, I., Acevedo-Benitez, J.A. & Hernández-Santiago, C., 2010. Distribution and potential of bioenergy resources from agricultural activities in Mexico. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(7), pp.2147-2153.
- Valdez-Vazquez, I., Acevedo-Benitez, J.A. & Poggi-Varaldo, H.M., 2009. Potential of hydrogen production from organic Urban Solid Waste fermentation in Mexico. *International Journal of Environment and Waste Management*, 3(1-2), pp.36-50.
- Weiland, P., 2010. Biogas production: current state and perspectives. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 85(4), pp.849-860.
- Zhang, C. et al., 2014. Reviewing the anaerobic digestion of food waste for biogas production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 38, pp.383-392.

SUSTENTABILIDAD Y POLÍTICAS PÚBLICAS DE LA BIOENERGÍA

Carlos A. García y Omar Masera

INTRODUCCIÓN

Como hemos visto en las secciones previas, la bioenergía presenta oportunidades importantes para la sustitución de los combustibles fósiles, la mitigación de gases de efecto invernadero, la creación de empleo y el desarrollo en las zonas rurales, entre otros beneficios (Dale et al., 2013; Edenhofer et al., 2011). Pero si se expande en gran escala, en particular a partir de sumar áreas dedicadas exclusivamente a cultivos bioenergéticos, puede crear competencia con otros usos del suelo, o afectar la biodiversidad y la seguridad alimentaria. Por esto, cualquier proyecto bioenergético debe cumplir con criterios de sustentabilidad —entendida como la capacidad de una actividad para mantenerse como opción viable para las generaciones futuras sin deteriorar los sistemas socioambientales que la sustentan (World Commission on Environment and Development, 1987)—.

De igual forma, es importante revisar cuál es la posibilidad concreta de difusión de los distintos recursos y tecnologías bioenergéticas en el sistema energético mexicano a mediano y largo plazo. Para hacerse realidad, la bioenergía debe apoyarse en un entramado de políticas públicas que consideren aspectos tecnológicos, económicos y sociales.

Este capítulo aborda sucesivamente estos tres grandes temas —sustentabilidad, escenarios y políticas públicas— con el fin de obtener un panorama sobre el rol que podría jugar la bioenergía en la transición energética en México.

ANÁLISIS DE SUSTENTABILIDAD DE LOS SISTEMAS BIOENERGÉTICOS

A diferencia de otras fuentes energéticas como la energía solar o la eólica, la bioenergía es intensiva en el uso de la tierra y su abasto está muy interrelacionado con otras actividades económicas de la sociedad (p. ej., el aprovechamiento de residuos de cultivos para fines energéticos depende de cuánto del cultivo particular se produzca en un momento dado y qué usos alternativos tienen esos residuos; desarrollar plantaciones energéticas en áreas extensas puede competir con la producción de alimentos o impactar en la biodiversidad). Estas interrelaciones han dado lugar a grandes debates a nivel internacional sobre la sustentabilidad del aprovechamiento de la bioenergía en gran escala (Creutzig et al., 2015; McBride et al., 2011; Mendes et al., 2015; Williams et al., 2009).

Entre las afectaciones negativas a la sustentabilidad debidas a la bioenergía están la pérdida de bosques y selvas por la expansión de cultivos, lo que afecta a la biodiversidad y genera emisiones; degradación de suelos; sobreexplotación y disminución en la calidad de los recursos hídricos, y afectaciones a la seguridad alimentaria, entre otros. De igual forma, existen aspectos positivos de la sustentabilidad por la bioenergía, como pueden ser la mitigación de gases de efecto invernadero, la creación de empleos y el desarrollo económico de zonas rurales.

Metodológicamente, la sustentabilidad de la bioenergía se analiza, como es usual, en tres dimensiones: ambiental, económica y social. La sustentabilidad ambiental se refiere al impacto de los proyectos bioenergéticos sobre las propiedades biofísicas y ecológicas de los ecosistemas, como calidad del aire y

agua, biodiversidad, emisiones de gases de efecto invernadero, factores de estrés ambientales, y las actividades humanas (Dale et al., 2015).

La sustentabilidad económica se refiere a que la bioenergía sea competitiva, en términos de costos de producción, con la energía procedente de combustibles fósiles y otras fuentes. Para calcular estos costos debe considerarse toda la cadena de la energía, lo que incluye la producción de materia prima, transporte de biomasa, procesamiento, distribución y los usos finales (Dale et al., 2015; Edenhofer et al., 2011).

Finalmente, la dimensión social de la sustentabilidad implica un acceso equitativo a la energía y a los recursos naturales; que la producción de bioenergía no prive a las personas del acceso a cultivos alimenticios; que no afecte los medios de vida de las personas, como el empleo, el salario o la seguridad (Dale et al., 2015).

Aunado a esto, es importante que los análisis sobre la sustentabilidad de la bioenergía incluyan toda la cadena de suministro, es decir, desde la producción de materia prima, logística de su recolección, conversión industrial, distribución y usos finales (Dale et al., 2013; Mendes et al., 2015). A continuación, presentamos algunos de los aspectos críticos para analizar la sustentabilidad de la bioenergía en México.

Impactos ambientales de la bioenergía

Las principales preocupaciones ambientales de la bioenergía son las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), los impactos a la calidad del aire, efectos en los suelos, disponibilidad y calidad de los recursos hídricos, deforestación y pérdida de biodiversidad.

Debido a los efectos globales esperados por el calentamiento global y el cambio climático, ha cobrado una alta importancia el evaluar las emisiones de GEI de las tecnologías energéticas. La biomasa tiene la posibilidad de absorber mediante la fotosíntesis las emisiones de CO_2 que se generan durante su procesamiento y uso final. Esto la hace, en principio, una fuente neutral en emisiones de CO_2 . Sin embargo, hay emisiones adicionales de CO_2 y de otros GEI (CH_4 , N_2O) a lo largo del ciclo de vida de la producción de bioenergéticos, debidas al uso de fertilizantes, plaguicidas y combustibles fósiles durante el cultivo, la cosecha, el transporte, la conversión del insumo y el uso final. En otras palabras, la mitigación neta de una opción bioenergética depende del balance entre los GEI emitidos en el ciclo de vida del biocombustible y los ahorros por los energéticos o combustibles fósiles sustituidos. De acuerdo a las materias primas, las formas de producción o cultivo y las tecnologías utilizadas, este balance puede ser positivo o negativo, lo que determina que las opciones bioenergéticas resulten ser reductores de emisiones o emisores netos con respecto a las fuentes fósiles (Chum et al., 2011).

La metodología utilizada para el estudio de las emisiones de GEI de la bioenergía (y en general de todas las fuentes de energía, así como de productos y servicios) es el Análisis de Ciclo de Vida, misma que está estandarizada en las normas ISO 14040 y 14044, sin embargo, aún persisten retos en cuanto a la forma como debe ser aplicada, ya que distintos supuestos generan resultados divergentes para la misma tecnología. Entre estos supuestos encontramos a la definición de los límites del sistema a estudiar, las fuentes de información y bases de datos, criterios para asignación de emisiones a coproductos, entre otras (Cherubini & Strømman, 2011).

En general, la bioenergía tiene menores emisiones que la energía fósil, donde las aplicaciones para generación eléctrica tienen una mayor mitigación de GEI que la lograda con los biocombustibles líquidos, principalmente debido a que evitan el uso de insumos, energía y emisiones del suelo durante la producción de

la materia prima (Cherubini & Strømman, 2011; Chum et al., 2011; García et al., 2011) (ver ANEXO B para mayores detalles).

En México existen pocas evaluaciones del potencial de mitigación de GEI en el ciclo de vida de la sustitución de combustibles fósiles por biocombustibles sólidos y gaseosos. Las evaluaciones existentes en general se han calculado para biocombustibles líquidos (García et al., 2011; García, 2012).

Por otro lado, se ha identificado que las emisiones por cambio de uso de suelo, debidas al cambio en los almacenes de carbono en la vegetación y el suelo al sustituir algún tipo de vegetación natural por cultivos bioenergéticos, pueden ser determinantes en cuanto al balance positivo o negativo de emisiones de GEI de tecnologías bioenergéticas (Fargione et al., 2008; Kim & Dale, 2011; Mendes et al., 2015; Searchinger et al., 2008). Las emisiones por cambio en el uso de suelo se pueden diferenciar en emisiones directas e indirectas (para consultar las definiciones de cada tipo de cambio en el uso de suelo se refiere al lector al ANEXO B).

Para el caso de México, las estimaciones de emisiones de GEI, al incluir aquellas por el cambio directo en el uso de suelo para la producción de biocombustibles líquidos, señalan que son mucho mayores que las emisiones de la gasolina si las plantaciones se establecen en áreas con altos contenidos de carbono (García et al., 2011; Skutsch et al., 2011). Hasta el momento no existen evaluaciones de las posibles emisiones por el cambio indirecto en el uso de suelo por la producción de bioenergía en México.

En cuanto a los efectos de la bioenergía en la calidad del aire, la combustión de biomasa (y de biocombustibles líquidos en motores de combustión interna) tiene el potencial de liberar contaminantes que pueden causar efectos adversos en la salud humana y en los ecosistemas. Las principales fuentes de emisiones al aire son la combustión incompleta de leña, sobre todo en los hogares rurales (Masera et al., 2005; REMBIO, 2011); las emisiones por pequeñas industrias como las ladrilleras y la producción de carbón vegetal (Blackman et al., 2000; Pennise et al., 2001); la quema de residuos agrícolas y agroindustriales (Jones et al., 2014; Mugica-Alvarez et al., 2015); y la combustión de mezclas de etanol y biodiésel con combustibles fósiles en motores de combustión interna (García et al., 2010; Jones et al., 2014; Niven, 2005; Schifter et al., 2011; Winebrake et al., 2001) (ver ANEXO B para mayores detalles).

Por otra parte, el suelo es particularmente importante para la bioenergía, debido a que la productividad de los cultivos en el corto y largo plazo está ligada al buen estado de éste. Las opciones de bioenergía que dependen de cultivos pueden tener impactos en los niveles de nitrógeno, fósforo y otros nutrientes del suelo. También se puede ocasionar erosión y compactación de los suelos dependiendo de los tipos de cultivos y de las prácticas agrícolas.

De igual forma, la disponibilidad de agua afectará de forma importante el grado de participación de la bioenergía en el sistema energético. El uso de agua es particularmente intensivo para opciones de bioenergía que tienen su origen en cultivos irrigados que pueden ser altamente demandantes de agua (caña de azúcar, maíz) (Gerbens-Leenes et al., 2009). Esta situación podría causar competencia por los recursos hídricos con otros usos como la producción de alimentos e incrementar sus precios (Gerbens-Leenes & Hoekstra, 2011).

En México la disponibilidad de agua puede limitar en gran medida el desarrollo de cultivos energéticos (CONAGUA, 2013; Delgado, 2014).

Para evaluar el uso de agua en la producción de energía se han propuesto metodologías, donde destaca la huella hídrica (Gerbens-Leenes et al., 2007). Resultados de este indicador para México muestran que las tecnologías bioenergéticas en general usan mucha más agua que otras tecnologías energéticas, en especial si los cultivos necesitan ser irrigados (García, 2012; Haro et al., s. f.) (ver ANEXO B para mayores detalles).

La producción de bioenergía también podría afectar la calidad del agua (p. ej., contribuir a la eutrofización de cuerpos de agua superficiales debido al uso de fertilizantes o vinazas), en tanto que la contaminación del agua con nitratos y plaguicidas puede representar un problema importante de salud para los humanos y los ecosistemas.

Por otro lado, debido a que la mayor parte de las tierras productivas disponibles se dedican a la producción de alimentos, los nuevos cultivos para bioenergía podrían imponer presiones adicionales de deforestación. A menos que los cultivos para energía sean establecidos en tierras abandonadas o degradadas, su ampliación en grandes superficies podría tener efectos negativos sobre la biodiversidad debido a la pérdida de especies y a la degradación del hábitat, además de las ya mencionadas emisiones por el cambio en el uso de suelo.

A partir de la literatura científica se puede extraer una serie de recomendaciones generales para mejorar la sustentabilidad de la bioenergía. En el caso de las emisiones de GEI sería importante:

- Evitar la producción de biomasa vía la conversión de áreas de alto contenido de carbono, como bosques y selvas, a zonas de cultivo (Chum et al., 2011).
- Usar materias primas que tengan una alta productividad de biomasa por unidad de superficie.
- Mejorar las prácticas agrícolas para minimizar el uso de combustibles fósiles para maquinaria (como la labranza cero), así como reducir el uso de fertilizantes sintéticos y de plaguicidas (como las prácticas agroecológicas) (García et al., 2011).
- Emplear biomasa como combustible en los procesos industriales: el etanol de caña emplea el bagazo de caña sin usar combustibles fósiles (Macedo et al., 2008) y lo mismo podría ocurrir en el caso del etanol a partir de granos si se sustituye el gas natural por rastrojos de los cultivos (Chum et al., 2011).
- Buscar que las cadenas de producción de bioenergía aprovechen al máximo los subproductos que puedan obtenerse (Mendes et al., 2015).

De igual forma, la implementación de tecnologías de combustión eficiente a nivel residencial y la evacuación de los gases al exterior de las viviendas pueden jugar un papel fundamental para disminuir las enfermedades debidas al uso de leña en el sector rural, como se ha documentado en un estudio para el estado de Michoacán (García-Frapolli et al., 2010). También es importante minimizar o limitar la quema a cielo abierto de residuos agrícolas (Mugica-Alvarez et al., 2015) e implementar tecnologías de bajo costo para reducir la emisión de contaminantes atmosféricos en pequeñas, medianas y grandes industrias (Jones et al., 2014).

En cuanto a las mezclas de gasolina con etanol, se pueden lograr mejoras en los niveles de emisiones si se retiran de circulación los vehículos de más antigüedad, se establecen normativas ambientales más estrictas a los vehículos nuevos y se adoptan nuevos combustibles (García et al., 2010; Schifter et al., 2011).

El manejo del suelo en áreas cultivadas y las prácticas poscosecha (p. ej., las prácticas de labranza, el retiro de rastrojos) son de particular importancia para mantener la calidad de los suelos. Además, el establecimiento de plantaciones de materias primas lignocelulósicas (que no tienen uso alimenticio) en tierras agrícolas degradadas y abandonadas, que requieren un manejo de baja intensidad y pocos insumos de energía fósil en relación con los sistemas actuales de biocombustibles, podría mejorar el contenido de carbono y conservar los nutrientes del suelo (Chum et al., 2011).

Para disminuir el impacto de la bioenergía en la cantidad y calidad de los recursos hídricos es importante priorizar a las formas de bioenergía que utilizan residuos. Si se emplean cultivos energéticos se deben buscar usar sólo cultivos de temporal, o bien, implementar sistemas de riego por goteo (que usan menos

agua por unidad de área y unidad de producción), seleccionar cultivos más eficientes en el uso de agua y con mayor tolerancia a la sequía, así como reciclar y tratar el agua a nivel industrial.

Asimismo, aumentar la movilización de biomasa de los bosques nativos para generar energía renovable sin deforestar ni afectar la biodiversidad, usar residuos agrícolas y pecuarios, así como establecer cultivos energéticos intercalados con cultivos convencionales (como los sistemas agroforestales), son algunas de las alternativas para ayudar a evitar la deforestación y la pérdida de biodiversidad (Mendes et al., 2015).

Impactos socioeconómicos de la bioenergía

Los biocombustibles líquidos han sido cuestionados ampliamente a nivel internacional por su posible impacto en la seguridad alimentaria, el cual puede ser negativo cuando las áreas de cultivo para alimentos se utilicen para la producción de bioenergéticos, lo que reduciría el abasto local de comida, además de que el creciente uso de tierra de cultivo para bioenergía induciría la escasez de alimentos y con ello un aumento en el precio de éstos. Además, este efecto podría agravarse considerando que los escenarios globales de cambio climático pronostican un decremento en los rendimientos agrícolas (Mendes et al., 2015).

Sin embargo, también existe la posibilidad de que la producción de bioenergéticos aumente la seguridad alimentaria local, por ejemplo, con cultivos o plantaciones multipropósito (que permitan producir al mismo tiempo alimentos, fibras, forrajes y energía), lo que mejoraría los ingresos de los productores; al usar tierras degradadas (lo que ayudaría a restaurarlas), o con el aprovechamiento de los residuos agrícolas, pecuarios y forestales que no se usen como alimento o forraje. De esta manera uno de los retos primordiales es identificar los lugares con las mejores condiciones para llevar a cabo lo anterior.

La ausencia de metodologías científicamente robustas ha sido una limitante para poder evaluar el impacto real de las políticas de bioenergía en la seguridad alimentaria; no obstante, estudios internacionales señalan que existe suficiente tierra arable para producir alimentos y bioenergéticos en los próximos años (Mendes et al., 2015). De cualquier forma, es fundamental hacer viables tecnologías bioenergéticas que utilicen biomasa no alimentaria, principalmente aquellas que usen los residuos.

En México, la Ley para el Desarrollo de los Bioenergéticos prohíbe el uso de maíz para la producción de etanol, a partir de una preocupación en la seguridad alimentaria. En el 2015 una de las empresas ganadoras de la tercera licitación para vender a Pemex 183 millones de litros de etanol al año lo producirá a partir de sorgo grano. Esta decisión debe evaluarse en términos de posibles efectos en la seguridad alimentaria, ya que si bien las importaciones nacionales de sorgo han disminuido de forma importante en los últimos años, aún se importan alrededor de 1.2 millones de toneladas al año (Secretaría de Hacienda y Crédito Público, 2014).

La bioenergía presenta también oportunidades para atraer inversiones y fomentar el desarrollo mediante la creación de empleos principalmente (Chum et al., 2011). Los biocombustibles líquidos de primera generación tienen un alto potencial de creación de empleo ya que generalmente en los países en desarrollo el sector agrícola es intensivo en mano de obra. Asimismo, se crean también empleos en el procesamiento de la materia prima y en las otras partes de la cadena de producción. Sin embargo, la viabilidad económica de los biocombustibles depende de mantener bajos costos o una alta productividad de mano de obra, lo que podría ocasionar bajos salarios y condiciones no óptimas para los trabajadores agrícolas (Smeets et al., 2008).

La sustentabilidad social puede estar también comprometida porque el uso de algunas tecnologías de bioenergía —como los cultivos dedicados— requiere de grandes extensiones para cultivos que pueden provocar el desplazamiento de pequeños productores y generar potenciales conflictos entre grupos sociales.

Este riesgo existe principalmente para el caso de los biocombustibles líquidos de primera generación que se obtienen de cultivos como la caña de azúcar, la soya y la palma aceitera.

Otro punto importante para la sustentabilidad está relacionado con la adquisición o arrendamiento de tierras. En este sentido, es indispensable que las comunidades involucradas en este tipo de transacciones sean consultadas, se debe garantizar el acceso tradicional a la tierra de las comunidades locales y que cualquiera de las partes que pudiera verse afectada sea compensada adecuadamente (Dale et al., 2013). De esta forma se podrían evitar conflictos como los que se han observado en proyectos de energía eólica en México.

Finalmente, el cumplimiento de la ley y las regulaciones son prerrequisitos para la sustentabilidad, que incluso han sido definidos en iniciativas internacionales sobre sustentabilidad como la Roundtable for Sustainable Biomaterials. A este respecto, Dale et al. (2013) señalan: “los efectos socioeconómicos de un sistema de bioenergía no pueden ser medidos de forma consistente y fiable en entornos en los que la corrupción, la anarquía o la inseguridad personal prevalecen o en estados fallidos y durante los períodos de guerra civil y crisis. El despliegue de los procesos de producción más sustentables se construye a partir de una capacidad institucional mínima de gobernabilidad, salud, seguridad, recursos legales y la protección de los derechos humanos”. Dadas las condiciones de violencia e inseguridad que prevalecen en varias zonas de México debido al crimen organizado, este punto es particularmente sensible. De esta manera, las acciones del gobierno y de la sociedad encaminadas a recuperar la gobernabilidad en estas zonas, pueden contribuir a garantizar la sustentabilidad social de la bioenergía.

Por otra parte, la viabilidad económica de las opciones de bioenergía es un elemento fundamental para lograr su sustentabilidad. Existen varias aplicaciones tecnológicas de la bioenergía que son costo-eficientes y competitivas en el mercado, principalmente para la generación de calor a nivel residencial e industrial; sin embargo, en muchos casos se necesitan altas inversiones iniciales, un marco regulatorio favorable y un apoyo decidido del sector público para que tengan preferencia frente a los combustibles fósiles y puedan desplazarlos.

Los biocombustibles líquidos han tenido dificultades para lograr su viabilidad económica debido a que dependen en gran medida del costo de la materia prima —que representa del 40 al 70% del costo final—, de manera que sólo los países con bajos costos o con rendimientos agrícolas muy altos pueden competir en la actualidad contra los derivados del petróleo en los mercados internacionales (p. ej., Brasil con etanol de caña de azúcar, Estados Unidos de América con etanol de maíz) (ver el ANEXO B para mayores detalles).

INICIATIVAS PARA LA CERTIFICACIÓN DE LA SUSTENTABILIDAD DE LA BIOENERGÍA

La creciente preocupación acerca de la sustentabilidad de la bioenergía, y en particular de los biocombustibles líquidos a partir de cultivos dedicados, ha llevado a instituciones internacionales, científicas y a un número creciente de gobiernos, a trabajar para procurar que la producción y el uso de la bioenergía sea sustentable. Para este fin se han desarrollado iniciativas Gubernamentales y de Cumplimiento Voluntario.

Iniciativas de certificación internacionales

Existen dos Iniciativas gubernamentales importantes en la experiencia internacional para lograr la sustentabilidad de la bioenergía: los Estándares para Biocombustibles Renovables en sus versiones 1 y 2 (RFS/RFS2),

desarrollados para los Estados Unidos de América, y la Directiva Europea de Energías Renovables (RED), que aplica en la Unión Europea.

Los estándares RFS/RFS₂ surgieron como un esfuerzo para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y ampliar la participación de combustibles renovables, a la par de disminuir la dependencia del petróleo importado (US Environmental Protection Agency, 2015). El estándar establece cuatro categorías de biocombustibles líquidos (biodiésel de biomasa, biocombustibles celulósicos, biocombustibles avanzados y combustibles renovables) y establece metas de introducción al mercado (en volumen) para cada uno de ellos. Además, se establecen metas de reducción de emisiones para cada tipo de biocombustible en comparación con una referencia fósil, que son las emisiones en el ciclo de vida. Las metas de reducción son 20% para los *combustibles renovables* (básicamente al etanol de maíz), 50% para el biodiésel y los biocombustibles avanzados, y 60% para los biocombustibles lignocelulósicos.

El estándar establece el método con el cual se deben calcular las emisiones de GEI, el cual está basado en un Análisis de Ciclo de Vida, e incluye emisiones por el cambio indirecto del uso de suelo.

Por su parte, la RED establece, en cuanto a bioenergía, que para el 2020 al menos el 10% de la energía del sector transporte en la Unión Europea debe provenir de fuentes renovables. Para los biocombustibles, la RED establece criterios de sustentabilidad que deben cumplirse de manera obligatoria, tales como que deben reducir sus emisiones de GEI en el ciclo de vida de un mínimo inicial de 35% en comparación con su referencia fósil, y llegar a 60% en 2018, y excluye la producción de biomasa en áreas de alta biodiversidad y con altos contenidos de carbono.

No se incluyeron criterios sociales y económicos obligatorios en esta iniciativa, sin embargo, para cumplir con los criterios de sustentabilidad de la RED, la comisión europea aceptó trece estándares de certificación, los cuales deben asegurar que la producción de biocombustibles cumple criterios ambientales y sociales, por medio de una evaluación por terceras partes. Más adelante se abordará lo relativo a los estándares de certificación.

Estas iniciativas gubernamentales dan gran importancia a la mitigación de gases de efecto invernadero en cuanto a la dimensión ambiental, establecen metodologías específicas para su evaluación y presentan valores de referencia para los combustibles fósiles a partir de los cuales se debe calcular la mitigación. En contraste, es poca la importancia que se presta a los criterios sociales de la sustentabilidad, ya que los estándares de Estados Unidos de América no consideran criterios sociales, en tanto que la RED de la Unión Europea sólo requiere que los indicadores sociales sean reportados, de acuerdo a los estándares de certificación que acepta como válidos. Esto debe ser tomado en cuenta, ya que se han publicado estudios de caso que reportan impactos negativos a pesar de contar con certificación de sustentabilidad (Tomei, 2015).

Precisamente, en paralelo a las iniciativas gubernamentales, evolucionaron las iniciativas de cumplimiento voluntario para certificar la sustentabilidad de las operaciones de bioenergía, las cuales implican evaluaciones y verificaciones por terceras partes. En el ámbito internacional existen varias iniciativas para desarrollar sistemas de certificación de la sustentabilidad de la producción de biocombustibles. A continuación se listan algunas de ellas y sus países de origen:

- Cramer Commission (Holanda).
- Roundtable on Responsible Soy Association (Internacional).
- Better Sugar Initiative (Brasil).
- Renewable Transport Fuel Obligation (UK).
- Roundtable on Sustainable Biomaterials (RSB, Internacional).

- International Sustainability and Carbon Certification (Alemania).
- Roundtable on Sustainable Palm Oil (Internacional).
- Biomass Biofuels Voluntary Scheme (Francia).

Estas iniciativas se basan en el cumplimiento de indicadores ligados a criterios de sustentabilidad. Los indicadores están basados en el conocimiento científico, en la relevancia para la sustentabilidad y su aplicabilidad. Los criterios más comunes entre estas iniciativas son: legalidad; respeto a los derechos humanos y laborales; mitigación de emisiones de GEI; calidad y cantidad de agua; emisiones al aire y al suelo; desarrollo rural y social; derechos de propiedad de la tierra, entre otros.

Iniciativas de certificación en México

En México se desarrolló la Norma MX para la certificación de biocombustibles líquidos provenientes de biomasa vegetal. Es de tipo voluntario y considera dos niveles de cumplimiento (con un conjunto de indicadores básicos de cumplimiento y otro conjunto más exigente, que representan mejoras). La norma está inspirada en la iniciativa de la RSB, y contiene 9 criterios y 120 indicadores. Para la dimensión ambiental se incluyen: la mitigación de GEI, calidad del aire, consumo y calidad del agua, entre otros. Para la dimensión social incluye criterios relativos a la propiedad de la tierra, desarrollo rural y seguridad alimentaria (Tabla 6.1). La norma además presenta un elemento positivo y novedoso, en comparación a las iniciativas internacionales existentes, al incluir un criterio sobre la eficacia de los biocombustibles para sustituir energía fósil, el cual es calculado por medio del índice de retorno energético. Este índice debe permitir que sólo se puedan certificar combustibles que entregan más energía renovable que la energía fósil consumida en producirlos ($E_{\text{renovable}}/E_{\text{fósil}} \geq 1.5$). La norma presenta las metodologías específicas para este índice y para el cálculo de las emisiones de gases de efecto invernadero, y propone un valor provisional de referencia fósil en tanto son acordados los valores de emisiones de GEI en el ciclo de Vida de la gasolina y el diésel que se vende en México, para determinar si se cumplen los requerimientos de mitigación de la norma.

Tabla 6.1. Principios y criterios que se establecen en el Proyecto de Norma Mexicana que establece especificaciones y requisitos para la sustentabilidad ambiental de la producción de bioenergéticos líquidos de origen vegetal

PRINCIPIOS	Criterios	Indicadores A*	Indicadores B	Total de indicadores
1. Legalidad	3	5	0	5
2. Planeación, monitoreo y mejora continua	4	10	1	11
3. Gases de efecto invernadero	1	2	0	2
4. Conservación	5	11	2	13
5. Suelo	3	7	3	10
6. Agua	5	17	5	22
7. Aire	3	5	5	10
8. Uso de tecnología e insumos y manejo de residuos	5	20	4	24
9. Desarrollo y bienestar social	11	21	2	23
TOTAL	40	98	22	120

*Los indicadores tipo A se deben cumplir en su totalidad para lograr la sustentabilidad en tanto que los de tipo B permiten obtener una certificación más alta.

Un punto que merece atención y mayor trabajo se refiere al criterio de seguridad alimentaria. Los indicadores que quedaron establecidos en la norma señalan que la evaluación de la seguridad alimentaria se llevará a cabo mediante los criterios que determine la Sagarpa. Sin embargo, hasta la firma del documento por parte del grupo técnico de trabajo de la norma, dicha secretaría no dio a conocer cuáles eran estos criterios. Existen además otros retos de la norma para cumplir con su objetivo:

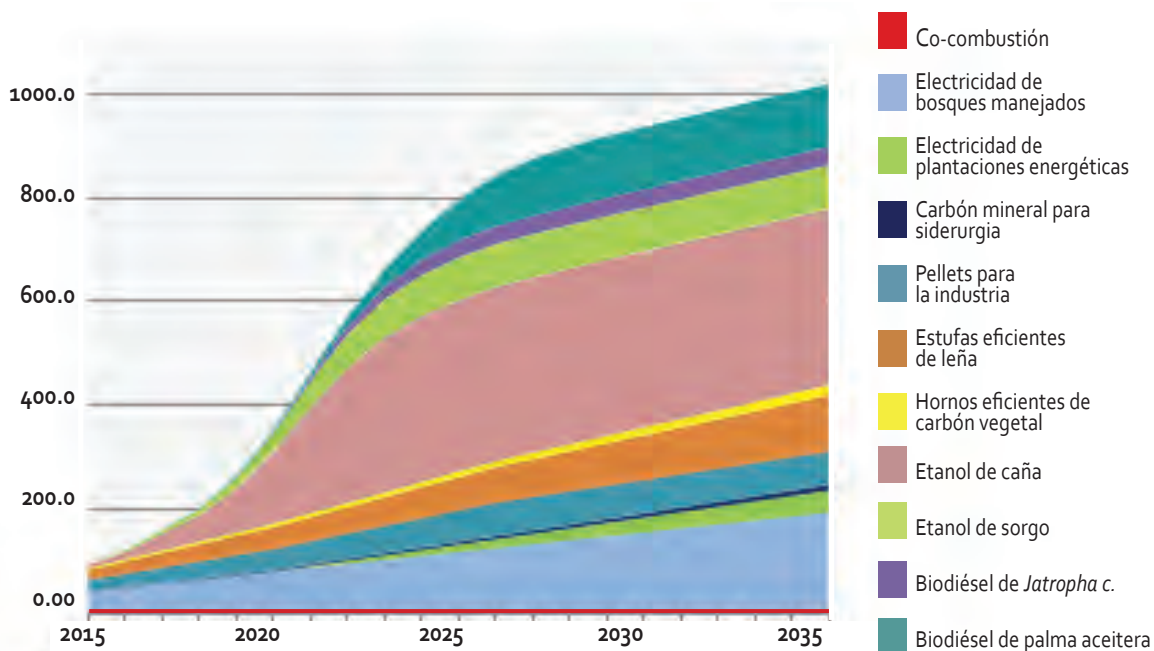
- ¿Quién certifica o acredita a los certificadores?
- ¿Cuáles son los estándares que prevalecerán?
- ¿Se harán válidos a nivel internacional estándares nacionales como los de México?
- Es necesario armonizar la definición de términos clave (p. ej., suelos degradados).
- Es necesario mejorar el conocimiento científico para proponer mejores indicadores, ya que algunos son muy descriptivos.
- Armonizar metodologías para la evaluación de los indicadores (p. ej., para la estimación del uso de agua y de gases de efecto invernadero).
- Desarrollo y armonización de valores de referencia en los Análisis de Ciclo de Vida para estimar el retorno energético y las emisiones de GEI.
- Hacer compatibles los esquemas de certificación de bioenergía con el logro de un sistema energético sustentable.

ESCENARIOS DE BIOENERGÍA

Los escenarios son concepciones descriptivas de futuros posibles, que pueden resaltar la posibilidad de cambios estructurales, así como de evaluar sus posibles consecuencias ambientales y económicas. Los estudios disponibles muestran que México solo podrá lograr sus metas de mitigación para 2030 y 2050 con una importante participación de la bioenergía en los sectores eléctrico, industrial, residencial, agrícola, además del sector transporte (García et al., 2015; Islas et al., 2007; Johnson et al., 2009; Octaviano et al., 2016; Veysey et al., 2016).

Las aplicaciones consideradas en los distintos estudios incluyen: la producción de etanol de caña y sorgo; la producción de biodiésel de palma aceitera; la cocombustión en plantas eléctricas de carbón; la generación eléctrica con biomasa (de plantaciones y de residuos de aserraderos o del aprovechamiento forestal); la cogeneración en ingenios azucareros; la introducción de estufas de leña eficientes; la producción eficiente de carbón vegetal; la producción de biogás; el uso de *pellets* para generación de calor en la industria, y el uso de carbón vegetal en la industria siderúrgica, entre otras¹. Se estima que la bioenergía podría cubrir el 16% de la demanda de energía en 2035, lo que equivale a suministrar el 20% de la energía final consumida en México en 2010 (García et al., 2015) (Figura 6.1).

Figura 6.1. Escenario de penetración de la bioenergía en México (PJ/año)



Fuente: García et al. (2015).

¹ Todas las aplicaciones están basadas en evaluaciones sobre la disponibilidad de biomasa en el país para energía, con la diferencia de que algunos abordan con mayor detalle opciones de bioenergía basados en evaluaciones del potencial de biomasa que cumplen con criterios de sustentabilidad como la exclusión de áreas naturales protegidas, exclusión de cubiertas forestales y de tierras que se usan para la producción de alimentos, entre otros (García et al., 2015; Johnson et al., 2009)

Los escenarios muestran además un potencial interesante para la mitigación de gases de efecto invernadero, considerando su uso final, con un potencial que varía entre 80 y 110 millones de toneladas de CO₂e al año (García et al., 2015; Johnson et al., 2009). Varias de estas opciones son económicamente rentables, por lo que presentan un costo de mitigación negativo (Tabla 6.2). Según estos estudios, las opciones que podrían ser implementadas en primer lugar dado su costo negativo son: introducción de estufas eficientes de leña, producción eficiente de carbón vegetal, uso de *pellets* para generación de calor en la industria.

Tabla 6.2. Ejemplos de opciones de bioenergía, sus oportunidades de mitigación y sus costos

Opción	Mitigación acumulada en el periodo 2010-2035 (MtCO ₂ e)	Inversión (millones de dólares)	Costo de mitigación (dólares/tCO ₂ e)
Estufas eficientes de leña	222	434	-2.3
Generación eléctrica con residuos de manejo forestal	376	4254	-2.4
Hornos eficientes de carbón vegetal	248	416	-19.6
Cogeneración con bagazo	59	1860	-4.9
Etanol de caña	150	1011	11.3
Etanol de sorgo	62	991	5.3
Pellets para calor en la industria	84.3	270	-7.0

Fuente: Johnson et al. (2010) y García et al. (2015).

Una limitación de la mayoría de los estudios es que sólo considera la mitigación de GEI por el uso final, sin embargo, como hemos visto en secciones anteriores, la mitigación efectiva de bioenergía debe considerar las emisiones que se originan durante la producción, transporte, procesamiento y uso final de la biomasa, es decir, durante su ciclo de vida. Las referencias internacionales mencionan que las opciones de biocombustibles líquidos son las que presentan mayores emisiones en el ciclo de vida con respecto a otras aplicaciones de la bioenergía, por lo que la mitigación para los otros tipos de tecnología bioenergética podrían no estar tan alejados de los reportados en los escenarios. De cualquier manera, es necesario integrar los Análisis de Ciclo de Vida de las tecnologías de bioenergía a los estudios de escenarios, así como incluir otro tipo de impactos ambientales como las emisiones contaminantes (Santoyo-Castelazo et al., 2014).

Hasta el presente no se han formulado escenarios de desarrollo de la bioenergía en México que incluyan las tecnologías de segunda y tercera generación, principalmente por la incertidumbre acerca de sus costos y su adaptación a las condiciones del país, pero también porque el grado de desarrollo logrado hasta el presente no permite prever cuándo serán comercialmente maduras. Considerando que los escenarios y las políticas de bioenergía se plantean hasta los años 2030-2050, y que la amortización de las inversiones tomará por lo menos 20 años, estas tecnologías deberían ser comercialmente maduras antes del año 2020 para poder ser adoptadas y sostenidas en México.

En resumen, la inclusión de la bioenergía en el sistema energético mexicano puede contribuir con la sustitución de combustibles fósiles, la mitigación de emisiones de GEI y hacerse, para una gran cantidad de opciones, de manera costo-efectiva. Sin embargo, para poder materializar estos frutos es necesario concretar un conjunto de políticas públicas coherentes, integradas, y con metas de corto, mediano y largo plazo.

POLÍTICAS PÚBLICAS EN MATERIA DE BIOENERGÍA

En México, el marco legal de la bioenergía está establecido con la Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos (LPDB) y la Ley para Aprovechamiento de las Energías Renovables y Financiamiento para la Transición Energética (LAERFTE). Las políticas públicas actuales están sobre todo enfocadas a la implementación de biocombustibles líquidos y biogás.

La LPDB se concentra en la promoción del etanol y biodiésel como sustitutos de la gasolina y el diésel de petróleo, y de ella se derivaron originalmente dos programas: el Programa de Producción Sustentable de Insumos para Bioenergéticos y de Desarrollo Científico y Tecnológico, que pretende fomentar la producción sustentable de insumos para bioenergéticos y su comercialización, y el Programa de Introducción de Bioenergéticos, que pretendía brindar certidumbre para el desarrollo de la cadena de producción y consumo de biocombustibles en la mezcla de combustibles para el transporte con la meta de producir 200 millones de litros para la mezcla de etanol anhidro en gasolina en Guadalajara, Monterrey y D.F. para el 2012. Debido a que el programa no se pudo concretar, se estableció el Programa de Introducción de Etanol Anhidro, mismo que tampoco tuvo éxito debido a los bajos precios de compra ofertados por Pemex.

Por su parte, la LAERFTE tiene el objetivo de “regular el aprovechamiento de fuentes de energía renovables y las tecnologías limpias para generar electricidad con fines distintos a la prestación del servicio público de energía eléctrica, así como establecer la estrategia nacional y los instrumentos para el financiamiento de la transición energética”. Define entre las fuentes de energías renovables a “los bioenergéticos que determine la LPDB así como las que determine la SENER”. La meta de participación de todo este grupo de fuentes de energía limpias al 2024 es del 35%.

Derivado de la LAERFTE se crea el Programa Especial para el Aprovechamiento de las Energías Renovables, que tiene como objetivo promover el aprovechamiento de las energías renovables para la generación de electricidad. En él se detallan los mecanismos para el pago de las contraprestaciones que se otorgarán a los generadores de electricidad a partir de energías renovables.

La Ley de la Industria Eléctrica publicada en el 2014 establece obligaciones de energías limpias (entre las que incluye a la electricidad generada o cogenerada con biomasa) que deben cumplir los suministradores y los Usuarios Calificados de electricidad. Las obligaciones se establecerán anualmente y se verificarán mediante la generación o la compra de Certificados de Energías Limpias (CEL). Se crea así un mercado para la bioelectricidad que será muy grande, ya que a partir del año 2018, el 5% de toda la generación de los suministradores y del consumo de los llamados Usuarios Calificados deberá ser amparado con CEL. Se espera que la obligación de generar y consumir energías limpias aumente hasta un 30% de toda la electricidad utilizada en México en el año 2030.

Se pusieron en marcha también acciones a nivel de políticas sectoriales. La Comisión Nacional Forestal (Conafor) incluyó a la *Jatropha* en el programa ProÁrbol como una de las especies para reforestación en 2007, aunque la retiró en 2012. La Conafor, a través del programa ProÁrbol, apoyó con subsidios la producción de carbón vegetal a través de capacitaciones para mejorar las prácticas productivas, adquisición de equipos,

apoyo a cadenas productivas en la formulación de estudios de factibilidad, planes de negocio, comercialización y adquisición de equipos.

La Sedesol estableció en el año 2006 el Programa Nacional de Estufas Ahorradoras de Leña, que entrega estufas de manera gratuita con la meta de cubrir el 10% de la demanda objetivo, es decir 500 mil familias con estufas eficientes para el año 2012. Este programa ha continuado con diferentes metas anuales, aunque no existe información sintética accesible al público sobre sus alcances en estos últimos años. Tampoco se ha realizado una evaluación del mismo para entender su impacto real en las familias.

La Sagarpa y el Fideicomiso de Riesgo Compartido (FIRCO) diseñaron el Proyecto de Apoyo al Valor Agregado de Agronegocios con Esquemas de Riesgo Compartido (PROVAR) para apoyar a las empresas y personas en la construcción de biodigestores hasta con un millón de pesos, más 250 mil pesos para generación de electricidad, con un aporte del 50% o más de los beneficiarios.

En los últimos dos años se han tenido algunos avances en el tema de bioenergía en México, en el marco del Programa Sectorial de Energía 2013-2018 (documento donde se definen las actividades que se llevarán a cabo en el sexenio en materia de energía, el cual está basado en el Plan Nacional de Desarrollo y la Estrategia Nacional de Energía). Estos avances se han dado en dos rubros: 1) en acciones para la incorporación de biocombustibles líquidos en el sector transporte, y 2) en la elaboración de normas para certificar los procesos de producción de biocombustibles líquidos. En el primer rubro Pemex emitió una convocatoria para adquirir hasta 123 millones de litros de etanol anhidro para ser mezclado en una proporción de 5.8% (en volumen) con gasolina regular en ocho terminales de almacenamiento de combustible. En marzo de 2015 Pemex dio a conocer los resultados de la convocatoria donde hubo empresas ganadoras para seis de las ocho terminales de almacenamiento licitadas (Pemex, 2015). En el segundo rubro la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat) emitió a finales de 2014, para su consulta pública, una primera propuesta de norma voluntaria para la certificación de la sustentabilidad de la producción de biocombustibles líquidos de origen vegetal (ver sección 6.3.2).

En cuanto a la investigación e innovación tecnológica, en diciembre de 2015 se dieron a conocer los proyectos ganadores para integrar el Centro Mexicano de Innovación en Energía (CEMIE Bio), que estará conformado con cinco clústeres: biocombustibles sólidos, bioalcoholes, biodiésel, biogás y bioturbosina. Cada clúster está conformado por grupos académicos y de investigación nacionales, e internacionales en algunos casos, así como por empresas del ramo. El objetivo es desarrollar tecnología sustentable que pueda ser comercializable, y que a su vez contribuya a la transición energética del país. Los fondos son de 1,380 millones de pesos provenientes, en su mayoría, del Fondo de Sustentabilidad Energética (FSE, 2016).

En conclusión, las acciones para incluir la bioenergía con tecnologías modernas en el sistema energético mexicano son todavía aisladas e insuficientes y carecen de visión a largo plazo. Se ha enfocado a biocombustibles líquidos para el sector transporte, y en menor medida al biogás y a la generación de electricidad, dejando poco apoyo a los biocombustibles sólidos. Como se mencionó en la introducción de esta obra, no se logrará una mitigación significativa de emisiones de GEI, ni sustitución de combustibles fósiles vía la bioenergía, cuando la meta actual más ambiciosa es una Prueba de Concepto para introducir 390 millones de litros (ML) al año o 1.1 ML/día de etanol hasta 2019 (o menos del 1% del total de consumo de gasolina en México).

PRIORIDADES DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO EN SUSTENTABILIDAD Y POLÍTICAS

Con base en el análisis de las secciones previas, las prioridades de investigación y desarrollo para promover sistemas bioenergéticos sustentables son:

- a) En cuanto a sustentabilidad y a la posibilidad de penetración de las opciones bioenergéticas en el sistema energético mexicano:
 - Desarrollar metodologías y estudios para la determinación del potencial de biomasa al considerar restricciones de sustentabilidad como la exclusión de áreas forestales y agrícolas.
 - Promover las tecnologías para el aprovechamiento energético de los residuos forestales, agrícolas y pecuarios que no compitan con la producción de alimentos ni generen cambios de uso del suelo.
 - Desarrollar metodologías y modelos para el estudio de los impactos socioambientales de la bioenergía, por ejemplo, en cuestiones de seguridad alimentaria, mitigación neta de emisiones de gases de invernadero, creación de empleos e impulso al desarrollo regional y local, entre otros temas prioritarios.
 - Definir criterios para la sustentabilidad de la bioenergía y desarrollar herramientas para su evaluación.
 - Desarrollar herramientas computacionales para el Análisis del Ciclo de Vida de opciones de bioenergía que incorporen los últimos acuerdos metodológicos (incluyendo emisiones por el cambio en el uso de suelo).
 - Construir bases de datos para la evaluación de indicadores de sustentabilidad y Análisis de Ciclo de Vida que reflejen la situación en México.
 - Realizar estudios y modelos para la evaluación financiera de proyectos de bioenergía que permitan incluir la variabilidad de parámetros clave como precios de las materias primas, inversiones y precios de los combustibles, entre otros.
 - Desarrollar herramientas y construir escenarios que permitan explorar cómo pueden integrarse las aportaciones de diferentes tecnologías bioenergéticas en el sistema energético mexicano, incluyendo impactos a lo largo del ciclo de vida.
 - Desarrollo de estudios y modelos para determinar los impactos macroeconómicos (aumento del PIB, creación de empleos, etc.) de los escenarios de bioenergía.

- b) En cuanto a políticas públicas, es prioritario llevar a cabo:
 - Estudios para el desarrollo de marcos regulatorios y de políticas integrales de largo plazo que consideren a las distintas formas y opciones de aplicación de la bioenergía. Estos marcos y políticas deben tener objetivos e incentivos claros, tener visión de mediano y largo plazo y articularse en programas intersectoriales coordinados (en salud, energía, ambiente, desarrollo social, agropecuario y forestal).
 - Análisis detallados de costos y beneficios de las políticas ya implementadas en materia de bioenergía.
 - Evaluación cuantitativa de los alcances de las políticas bioenergéticas (tanto las ejecutadas como las posibles) en relación a las metas de reducción de emisiones establecidas por la Contribuciones Previstas Determinadas a Nivel Nacional (INDC, por sus siglas en inglés) de México ante la Conferencia de las Partes de la Convención de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático.

- Evaluación comparada de los costos financieros y ambientales de la exploración y explotación de petróleo y gas natural en aguas profundas y esquistos, versus el desarrollo de fuentes de energía de biomasa.

REFERENCIAS

- Blackman, A. et al., 2000. *The Benefits and Costs of Informal Sector Pollution Control: Mexican Brick Kilns*, Washington DC: Resources for the Future.
- Cherubini, F. & Strømman, A.H., 2011. Life cycle assessment of bioenergy systems: State of the art and future challenges. *Bioresource Technology*, 102(2), pp.437-451.
- Chum, H. et al., 2011. Bioenergy. En O. Edenhofer et al., eds. *IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation*. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press.
- CONAGUA, 2013. *Estadísticas del agua en México, edición 2013*, México DF: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales y Comisión Nacional del Agua.
- Creutzig, F. et al., 2015. Bioenergy and climate change mitigation: an assessment. *GCB Bioenergy*, 7(5), pp.916-944.
- Dale, V.H. et al., 2015. A framework for selecting indicators of bioenergy sustainability. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 9(4), pp.435-446.
- Dale, V.H. et al., 2013. Indicators for assessing socioeconomic sustainability of bioenergy systems: A short list of practical measures. *Ecological Indicators*, 26, pp.87-102.
- Delgado, G. ed., 2014. *Apropiación de agua, medio ambiente y obesidad. Los impactos del negocio de bebidas embotelladas*, México: Centro de Investigaciones Interdisciplinarias en Ciencias y Humanidades, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Edenhofer, O. et al. eds., 2011. Summary for Policymakers. En *IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation*. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press.
- Fargione, J. et al., 2008. Land Clearing and the Biofuel Carbon Debt. *Science*, 319(5867), pp.1235-1238.
- Fondo de Sustentabilidad Energética (FSE) <<http://proyecto.fse.mx/2016/02/03/cemie-bio-los-frutos-la-biomasa/>>
- García, C.A., 2012. *Etanol de primera generación, estudio de la sustentabilidad de su producción considerando el ciclo de vida y análisis económico-ambiental de su introducción en el sector transporte Mexicano*. Tesis de Doctorado. Universidad Nacional Autónoma de México.
- García, C.A. et al., 2011. Life-cycle greenhouse gas emissions and energy balances of sugarcane ethanol production in Mexico. *Applied Energy*, 88(6), pp.2088-2097.
- García, C.A. et al., 2015. Sustainable bioenergy options for Mexico: GHG mitigation and costs. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43, pp.545-552.
- García, C.A., Manzini, F. & Islas, J., 2010. Air emissions scenarios from ethanol as a gasoline oxygenate in Mexico City Metropolitan Area. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(9), pp.3032-3040.
- García-Frapolli, E. et al., 2010. Beyond fuelwood savings: Valuing the economic benefits of introducing improved biomass cookstoves in the Purépecha region of Mexico. *Ecological Economics*, 69(12), pp.2598-2605.
- Gerbens-Leenes, P.W., Hoekstra, A.Y. & Meer van der, T., 2009. The water footprint of energy from biomass: A quantitative assessment and consequences of an increasing share of bio-energy in energy supply. *Ecological Economics*, 68(4), pp.1052-1060.
- Gerbens-Leenes, W., Hoekstra, A. & Meer, T., 2007. The water footprint of energy consumption: an assessment of water requirements of primary energy carriers. *ISESCO Science and Technology Vision*, 4(5), pp.38-42.

- Gerbens-Leenes, W. & Hoekstra, A.Y., 2011. The water footprint of biofuel-based transport. *Energy & environmental science*, 4(8), pp.2658-2668.
- Haro, M.E., Navarro, I. & Jimenez, B., Estimation of water footprint of sugarcane in Mexico: is ethanol production and environmentally feasible fuel option? Recuperado de http://www.pincc.unam.mx/INFORMES PROYECTOS/5_Informe_final_ingles.pdf.
- Islas, J., Manzini, F. & Masera, O., 2007. A prospective study of bioenergy use in Mexico. *Energy*, 32(12), pp.2306-2320.
- Johnson, T. et al., 2009. México: *Estudio Sobre la Disminución de Emisiones de Carbono*, Washington DC: Banco Mundial y Mayol Ediciones S.A.
- Jones, J.M. et al., 2014. *Pollutants Generated by the Combustion of Solid Biomass Fuels*, Springer.
- Kim, S. & Dale, B.E., 2011. Indirect land use change for biofuels: Testing predictions and improving analytical methodologies. *Biomass and Bioenergy*, 35(7), pp.3235-3240.
- Macedo, I.C., Seabra, J.E.A. & Silva, J.E.A.R., 2008. Green house gases emissions in the production and use of ethanol from sugarcane in Brazil: The 2005/2006 averages and a prediction for 2020. *Biomass and Bioenergy*, 32(7), pp.582-595.
- Masera, O.R., Díaz, R. & Berrueta, V., 2005. From cookstoves to cooking systems: the integrated program on sustainable household energy use in Mexico. *Energy for Sustainable Development*, 9(1), pp.25-36.
- McBride, A.C. et al., 2011. Indicators to support environmental sustainability of bioenergy systems. *Ecological Indicators*, 11(5), pp.1277-1289.
- Mendes, G. et al. eds., 2015. *Bioenergy & Sustainability: bridging the gaps*, Sao Paulo: Scientific Committee on Problems of the Environment.
- Mugica-Alvarez, V. et al., 2015. Emissions of PAHs derived from sugarcane burning and processing in Chiapas and Morelos Mexico. *Science of The Total Environment*, 527-528, pp.474-482.
- Niven, R.K., 2005. Ethanol in gasoline: environmental impacts and sustainability review article. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 9(6), pp.535-555.
- Octaviano, C., Paltsev, S. & Gurgel, A.C., 2016. Climate change policy in Brazil and Mexico: Results from the MIT EPPA model. *Energy Economics*, En Prensa.
- Pemex, 2015. Pemex informa los resultados de la licitación para la adquisición de etanol anhidro. Recuperado de http://www.Pemex.com/saladeprensa/boletines_nacionales/Paginas/2015-024-nacional.aspx.
- Pennise, D.M. et al., 2001. Emissions of greenhouse gases and other airborne pollutants from charcoal making in Kenya and Brazil. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106(D20), pp.24143-24155.
- REMBIO, 2011. *La Bioenergía en México: Situación Actual y Perspectivas*, México: Red Mexicana de Bioenergía.
- Santoyo-Castelazo, E., Stamford, L. & Azapagic, A., 2014. Environmental implications of decarbonising electricity supply in large economies: The case of Mexico. *Energy Conversion and Management*, 85, pp.272-291.
- Schifter, I. et al., 2011. Oxygenated transportation fuels. Evaluation of properties and emission performance in light-duty vehicles in Mexico. *Fuel*, 90(2), pp.779-788.
- Searchinger, T. et al., 2008. Use of U.S. Croplands for Biofuels Increases Greenhouse Gases Through Emissions from Land-Use Change. *Science*, 319(5867), pp.1238-1240.
- Secretaría de Hacienda y Crédito Público, 2014. *Panorama del Sorgo*, México: Financiera Nacional de Desarrollo Agropecuario, Rural, Forestal y Pesquero.
- Skutsch, M. et al., 2011. Jatropha in Mexico: environmental and social impacts of an incipient biofuel program. *Ecology and Society*, 16(4), p.11.
- Smeets, E. et al., 2008. The sustainability of Brazilian ethanol—An assessment of the possibilities of certified production. *Biomass and Bioenergy*, 32(8), pp.781-813.

- Tomei, J., 2015. The sustainability of sugarcane-ethanol systems in Guatemala: Land, labour and law. *Biomass and Bioenergy*, 82, pp.94-100.
- US Environmental Protection Agency, 2015. Renewable Fuel Standard Program. Recuperado de <http://www.epa.gov/renewable-fuel-standard-program>.
- Veysey, J. et al., 2016. Pathways to Mexico's climate change mitigation targets: A multi-model analysis. *Energy Economics*, En Prensa.
- Williams, P.R.D. et al., 2009. Environmental and Sustainability Factors Associated With Next-Generation Biofuels in the U.S.: What Do We Really Know? *Environmental Science & Technology*, 43(13), pp.4763-4775.
- Winebrake, J., Wang, M.Q. & He, D., 2001. Toxic emissions from mobile sources : A Total fuel- cycle analysis for conventional and alternative fuel vehicles Toxic Emissions from Mobile Sources : A Total Fuel-Cycle Analysis for Conventional and Alternative Fuel Vehicles. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 51, pp.1073-1086.
- World Commission on Environment and Development, 1987. *Our Common Future*, Oxford: Oxford University Press.

ANEXO A

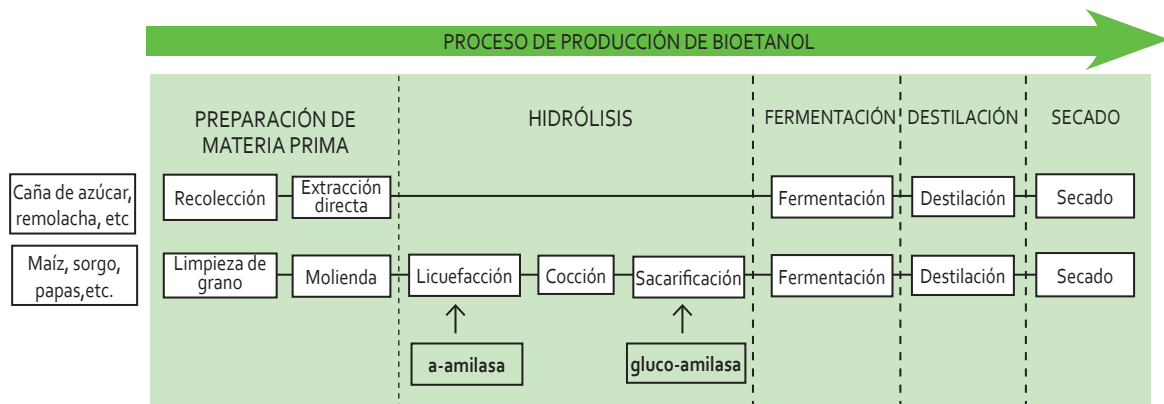
PROCESOS DE PRODUCCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES LÍQUIDOS

BIOETANOL

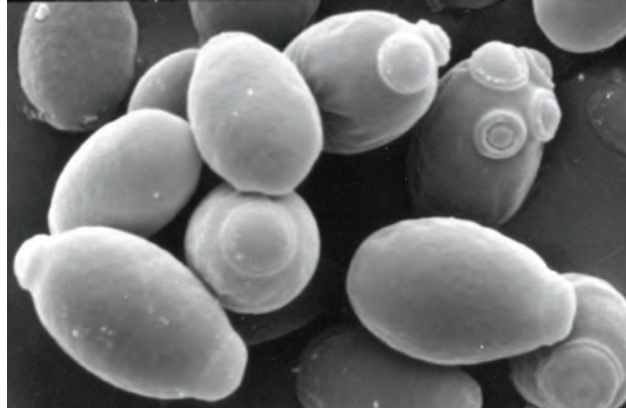
El bioetanol de primera generación (alcohol etílico o etanol) es el obtenido a partir de la fermentación de azúcares provenientes de cultivos agrícolas. Los principales cultivos que se utilizan para la producción de bioetanol son: maíz, caña de azúcar, trigo, sorgo, remolacha, entre otros. Dichos cultivos, ofrecen azúcares simples y almidones para su transformación a bioetanol.

El proceso de producción industrial de bioetanol combustible a partir de materias primas para las tecnologías de primera generación, en este caso de caña de azúcar y remolacha, es simple, ya que estos insumos contienen sacarosa disuelta, la cual es una molécula fácilmente asimilable por bacterias y levaduras, sin requerir hidrólisis previa. El proceso tiene 4 etapas principales: extracción de jugos, fermentación, destilación y secado. Cuando se utilizan almidones como materias primas (provenientes de maíz, trigo, sorgo, etc.) el proceso consta de cinco etapas principales: molienda, hidrólisis, fermentación, destilación y secado (Figura A.1).

Figura A.1. Esquema simple del proceso de producción de bioetanol combustible



Los microorganismos que se utilizan para la transformación de azúcares a bioetanol, en la etapa de fermentación, son bacterias como *Zymomonas mobilis* y levaduras como *Saccharomyces cerevisiae* (Figura A.2). Las levaduras son mayormente empleadas a nivel industrial, con eficiencias de conversión mayores al 85%.

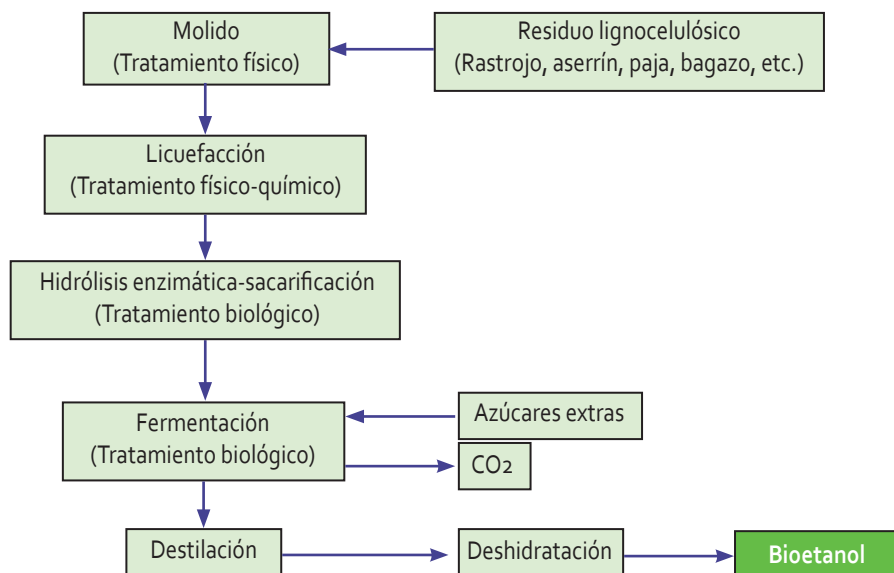
Figura A.2. *Saccharomyces cerevisiae*

Fotografía tomada de: <http://www.micron.ac.uk>

Otros organismos usados son *Clostridium thermocellum* (Zhu et al., 2013), *Paecilomyces variotii* (Dogaris et al., 2013; Zerva et al., 2014) al igual que cepas modificadas de *Escherichia coli*, en las que se integran los genes de las enzimas de *Saccharomyces cerevisiae* y *Zymomonas mobilis* (Barbosa et al., 1994; Reipen et al., 1995). Otra estrategia más reciente ha sido el inmovilizar a los microorganismos para poder recuperarlos y reusarlos durante el proceso (Jovanović-Malinovska et al., 2010; Kim et al., 1988).

En cuanto a la producción de bioetanol de segunda generación, el proceso comprende cinco pasos principales: pretratamiento de la biomasa; hidrólisis de celulosa y hemicelulosa; fermentación; separación y tratamiento de efluentes (Figura A.3).

Figura A.3. Proceso general para producir bioetanol lignocelulósico.



El pretratamiento físico consiste en reducir el tamaño del sustrato mediante el fraccionamiento de la biomasa, que puede ser seguido de un tratamiento térmico —como la explosión por vapor—.

El tratamiento químico tiene la función de romper la estructura de la lignocelulosa (Lee et al., 1994) y reducir su cristalinidad, para lo cual se usan en su mayoría ácidos y bases a diferentes concentraciones (Tabla A.1).

Este tratamiento es un paso importante, debido a que se hace a la lignocelulosa más accesible para las enzimas (Singh et al., 2013); posteriormente, la pulpa se somete a la sacarificación o hidrólisis enzimática, donde diversas enzimas continúan con el rompimiento de la lignocelulosa hasta generar suficientes monómeros fermentables (azúcares) antes de pasar a la etapa de la fermentación. La sacarificación mediante enzimas microbianas es el método más promisorio para aumentar la cantidad de azúcares fermentables (Galbe y Zacchi, 2007) y a la vez una de las mayores limitantes para desarrollar el etanol lignocelulósico, debido a los altos costes de las enzimas comerciales. En este aspecto, se están desarrollando diferentes estrategias para contar con enzimas más eficientes que permitan lograr un proceso menos costoso.

Las enzimas clave para sacarificar son las celulasas (endoglucanasas y exoglucanasas), para generar cadenas cortas de celulosa; las glucosidasas, para generar glucosa a partir de celobiosa, y las xilanasas, para generar azúcares a partir de hemicelulosa (Zampieri et al., 2013). Para poder reducir los costes se han propuesto diversas estrategias como son la inmovilización de las enzimas (Mao, 2010), la recuperación de las enzimas después de la hidrólisis (Haven et al., 2015), la modificación genética de microorganismos para producir, en el mismo organismo, las enzimas requeridas para la sacarificación (Reis dos et al., 2013; Yanase et al., 2010), y búsqueda de enzimas estables durante el proceso (Emond et al., 2008; Zhang et al., 2011).

Tabla A.1. Diferentes pretratamientos químicos usados para tratar la lignocelulosa

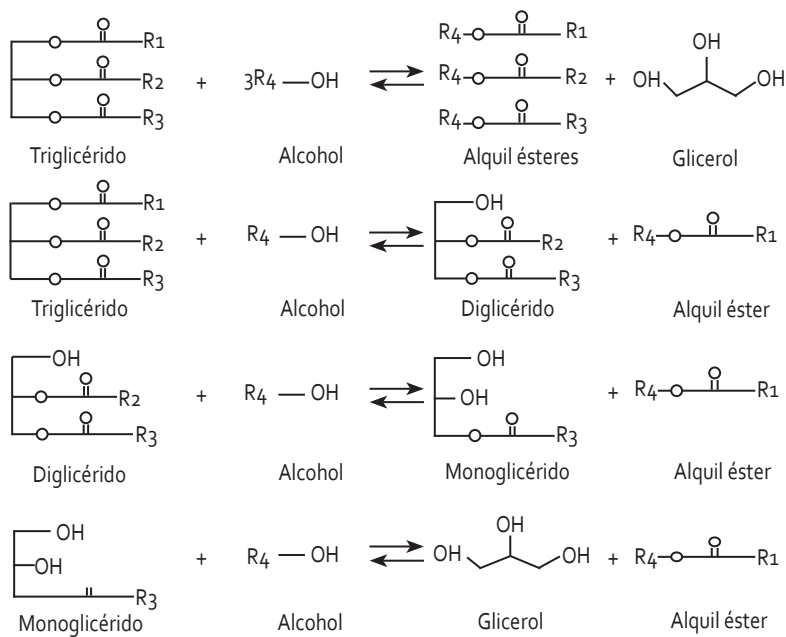
Pretratamiento	Sustancia química	Sustrato	Referencia
Ácido	HCl	Bagazo de caña	Hernández-Salas et al. (2009)
	H ₂ SO ₄	Bagazo de caña	Cheng et al. (2008)
	H ₃ PO ₄	Bagazo de caña	Gámez et al. (2006)
	Na ₂ S ₂ O ₄	Mezquite	Naseeruddin et al. (2013)
	C ₄ H ₄ O ₂	Bagazo de caña	Alvira et al. (2010)
	H ₂ SO ₄	Paja de trigo	Erdei et al. (2010)
Alcalino	NaOH	Bagazo de caña	Peng et al. (2009)
	NaOH	Paja de arroz	Ibrahim et al. (2011)
	NaOH	Pasto	Sills & Gossett (2011)
	Na ₂ CO ₃	Paja de arroz	Yang et al. (2012)

Por otro lado, también se han realizado avances durante la fermentación. Los microorganismos responsables de la fermentación pueden ser bacterias, hongos filamentosos o levaduras. Dentro de las bacterias, *Zyomonas mobilis* produce etanol con rendimientos hasta cinco veces mayores que ciertas levaduras, por la vía Entner-Doudoroff, bajo condiciones anaerobias (Tao et al., 2005). *Saccharomyces cerevisiae*, *Z. mobilis* y *Pichia stipitis* se han usado ampliamente para producir alcohol (Behera et al., 2010; Jeffries et al., 2007; Ndaba et al., 2014) debido a su tolerancia al etanol.

BIODIÉSEL

En la Figura A.4, se muestran las reacciones implicadas en la transesterificación, en donde el triglicérido es convertido consecutivamente en diglicérido, monoglicérido y glicerina. En cada reacción se libera un mol de éster metílico, y es a lo que se llama biodiésel. Para que la reacción se lleve a cabo son necesarios 3 moles de alcohol por cada mol de triglicérido. La conversión de equilibrio de este proceso es usualmente en temperaturas moderadas. En la práctica se utiliza siempre exceso de alcohol (Ma et al., 1998).

Figura A.4. Reacciones implicadas en la reacción de transesterificación



Cuando se lleva a cabo una reacción de transesterificación, inicialmente se observa la formación de dos fases: fase de alcohol y fase de aceite vegetal, los cuales se van mezclando en el transcurso de la reacción. Al terminar, producto de la reacción se forman dos nuevas fases: la fase superior, constituida básicamente por ésteres (biodiésel), y la fase inferior, formada principalmente por glicerol (Ishikura, 2005). La glicerina como subproducto, puede ser purificada y utilizada en la industria farmacéutica y cosmética, donde la demanda es elevada, lo que hace que se considere como un subproducto altamente valorado (Castro et al., 2006). Sin embargo, la purificación de la glicerina cruda puede ser un proceso complejo y costoso debido a la presencia de agua, jabones, metanol, ácidos grasos e impurezas sólidas.

Entre los alcoholes más utilizados en el proceso de producción de biodiésel, se encuentran el metanol y el etanol. Su elección depende de factores económicos y aspectos técnicos dentro del proceso. El metanol presenta ventajas sobre el etanol, ya que requiere menor cantidad, posee mayor eficiencia de conversión de aceites, requiere menores temperaturas de reacción, se recupera más fácilmente y se facilita la separación de fases (CEPAL, 2007). Sin embargo, el etanol puede ser producido a partir de fuentes renovables y, al con-

trario del metanol, no posee grandes problemas de toxicidad. Todos los alcoholes de bajo peso molecular son higroscópicos y capaces de absorber agua del aire, por lo que un parámetro importante a considerar para la elección del alcohol, es el contenido de humedad y su forma de reaccionar ante ella, ya que cuando se tiene presencia de agua, se tienen bajos rendimientos en la reacción y se generan jabones, ácidos grasos libres y triglicéridos en el producto final.

Para que se lleve a cabo la reacción de transesterificación de manera óptima y rápida, se utiliza normalmente un catalizador. Estos pueden ser básicos, ácidos o enzimáticos. Una vez que se lleva a cabo la transesterificación, los productos obtenidos de la reacción se encuentran mezclados o contaminados con otros compuestos. Estos pueden ser triglicéridos que no reaccionaron, alcohol, catalizador, mono y diglicéridos, jabones y glicerol. Por esta razón, es necesario realizar las etapas necesarias para su purificación. Las siguientes etapas describen uno de los procesos más utilizados en la purificación del biodiésel (Bouaid et al., 2005; Gerpen van et al., 2004; Ishikura, 2005):

- Separación de fases. Como se ha mencionado, los productos obtenidos de la transesterificación, son la glicerina y los ésteres. Estos productos presentan diferente densidad, los ésteres con un valor de $0,83 \text{ g/cm}^3$, mientras que el glicerol tiene una densidad de $1,05 \text{ g/cm}^3$ o más. Esta diferencia de densidad es suficiente para que las fases puedan ser separadas por gravedad en un decantador.
- Lavado de biodiésel. Para remover la presencia de catalizador, jabón y glicerol libre, los ésteres se lavan por medio de aspersión de agua templada (50 a $60 \text{ }^\circ\text{C}$).
- Secado. Finalmente, se calienta el biodiésel a temperaturas mayores al punto de ebullición del agua, para garantizar la eliminación del agua por evaporación.

Recuperación del alcohol. Generalmente en la transesterificación se utiliza un exceso de alcohol para lograr mejores rendimientos. Este exceso puede ser recuperado para su reutilización por medio de destilación *flash* (Bouaid et al., 2005).

Control de calidad. Para que el biodiésel sea aceptado como combustible, debe de cumplir con todas las especificaciones que establece la normatividad vigente, por lo que se realizan las diferentes pruebas de caracterización que determinan la calidad del producto obtenido.

El proceso de producción de biodiésel inicia con el prensado de las semillas para la obtención del correspondiente aceite vegetal. Básicamente la extracción se realiza por compresión y extracción con solventes. La compresión se realiza con prensas continuas de tornillo que pueden trabajar con calentamiento o no del material original. Para una extracción total se emplea en forma combinada con solventes como el hexano comercial, que elimina todo el aceite dejando un residual del 0.5 al 1% . Luego de ser extraído, generalmente, el aceite pasa por un proceso de purificación o refinado. Este se trata con álcali para eliminar los ácidos grasos libres, la materia colorante y los mucílagos, quedando como subproducto las llamadas tortas de material sólido, que poseen un alto contenido proteico para ser utilizadas como alimento animal.

El aceite, una vez extraído y refinado, pasa a la fase de esterificación, donde se refinan los ácidos grasos libres. El producto de la reacción se separa mediante centrifugación. Los aceites refinados se secan y se envían a la unidad de transesterificación. Inicialmente, se mezcla el alcohol (metanol) y el hidróxido de sodio para formar metóxido de sodio. El metóxido se agrega al aceite a una temperatura alrededor a los $60 \text{ }^\circ\text{C}$ y a 1.4 bares. Estas condiciones permiten que los triglicéridos se rompan con mayor facilidad.

La parte final del proceso consiste en la sedimentación de la glicerina, que se deposita en el fondo del recipiente en el que se ha producido la reacción, mientras que los ésteres se separan en la parte de arriba.

Estos últimos se someten a una última fase de lavado con agua, para eliminar posibles restos e impurezas en el producto final, pues la persistencia de éstos en el producto final ocasionaría una disminución del rendimiento de la ignición del combustible en el interior de los cilindros. El producto, también puede someterse a destilación para garantizar un mayor grado de pureza.

Existen múltiples opciones de operación viables para el proceso de transesterificación, muchas tecnologías pueden combinarse de diferentes maneras variando las condiciones del proceso y la alimentación del mismo. Sin embargo, todas ellas tienen en común los aspectos mencionados anteriormente. La elección de la tecnología se hace en función de la capacidad de producción deseada, calidad, alimentación, recuperación del alcohol y catalizador. Por lo general, plantas de menor capacidad y diferente calidad en la alimentación suelen utilizar procesos discontinuos o por lotes. Las plantas de mayor capacidad y que requieren una alimentación más uniforme utilizan procesos continuos.

Durante la reacción de transesterificación se emplea un catalizador que puede ser líquido o sólido, en caso de emplear el primero se tratará de una catálisis homogénea y, en el segundo caso, de una catálisis heterogénea. Tanto la catálisis homogénea como la heterogénea pueden ser ácidas o básicas (Aransiola et al., 2014; Atabani et al., 2012; Chouhan & Sarma, 2011; Ma & Hanna, 1999).

En la transesterificación ácida homogénea se emplean soluciones de ácidos tales como sulfúrico, clorhídrico, sulfónico y fosfórico (Aransiola et al., 2014; Atabani et al., 2012; Bournay et al., 2005; Leung et al., 2010; Ma & Hanna, 1999). Este proceso normalmente se emplea para sistemas en que el aceite o materia prima para la transesterificación contiene altos contenidos de ácidos grasos libres. El proceso puede emplearse para obtener el biodiésel con características especiales o con graduaciones específicas de ésteres. Una de las desventajas del proceso es la presencia de agua, que puede llegar a inhibir la reacción cuando está presente en cantidades que van desde 1 a 50 g/kg (Aransiola et al., 2014; Atabani et al., 2012). Los ácidos más empleados son los ácidos sulfúrico y clorhídrico, que se han usado en la transesterificación de aceite de palma en concentraciones de 1.5 y 2.5 M. El ácido sulfónico también se ha empleado y se han obtenido conversiones del 94% de ésteres metílicos con condiciones de 170 °C de temperatura y 4 horas de reacción.

La transesterificación básica o alcalina homogénea ocurre aproximadamente 4,000 veces más rápido que la ácida homogénea (Atabani et al., 2012) y ha sido empleada a nivel industrial (Aransiola et al., 2014). Las soluciones alcalinas que se emplean en este proceso son de NaOH, KOH, NaOCH₃, KOCH₃, y K₂CO₃ (Aransiola et al., 2014; Atabani et al., 2012; Bournay et al., 2005; Chouhan & Sarma, 2011; Leung et al., 2010; Ma & Hanna, 1999), de las cuales la primera es la más empleada, aunque algunos prefieren usar el KOH; sin embargo, aún se tiene la polémica de cuál es el mejor, ya que algunos autores se inclinan por el NaOH (Atabani et al., 2012; Bournay et al., 2005; Ma & Hanna, 1999) y otros por el KOH. Los metaóxidos de sodio y potasio también dan buenos resultados sin embargo el costo de éstos es más elevado que el de los hidróxidos. Cuando los aceites tienen altos contenidos de ácidos grasos libres (FFA) se puede producir jabón y agua, por lo que los contenidos deben de ser menores de 0.5 y hasta 3% (Aransiola et al., 2014; Atabani et al., 2012; Leung et al., 2010). La razón molar de alcohol aceite es de relativa importancia ya que se puede obtener una buena transformación de los reactivos de la reacción de transesterificación empleando grandes cantidades de alcohol, sin embargo, si la cantidad de alcohol llega a ser excesiva la solubilidad del glicerol aumentará y será más difícil separarlo de la mezcla.

En la transesterificación heterogénea se emplea un catalizador sólido para llevar a cabo la reacción y se dice que es ácida porque se emplean materiales considerados de carácter ácido (Aransiola et al., 2014; Chouhan & Sarma, 2011; Leung et al., 2010) que contienen una variedad de sitios ácidos con diferentes

ligandos de Bronsted o Lewis comparados con catalizadores homogéneos ácidos. Algunos de los materiales usados en este proceso son: ZrO_2 , SO_4^{2-}/ZrO_2 , $ZrO_2-Al_2O_3$, $ZrO_2-Al_2O_3$, zirconia-alúmina sulfatada, óxido de titanio sulfatado u óxido de estaño sulfatado. En cuanto a la eficiencia de conversión, se han llegado a obtener conversiones superiores al 90% (250 °C y 20 horas de reacción) cuando se emplea el catalizador zirconia-alúmina-tungsteno. Los catalizadores antes mencionados presentan excelentes conversiones cuando es necesario llevar a cabo la esterificación y transesterificación al mismo tiempo, lo cual es relativamente importante cuando se emplean materias primas de baja calidad. Este tipo de catálisis es menos corrosiva, menos tóxica y genera pocos problemas ambientales. Además de los catalizadores mencionados, también pueden emplearse resinas orgánicas como son Nafion NR-50, Amberlyst-15 y mordenita, que han demostrado que se pueden reutilizar varias veces sin decaimiento del poder de conversión. Estos tipos de catalizadores han sido reconocidos por su alta actividad catalítica, sin embargo, las condiciones de los procesos son más extremas comparadas con las de otros procesos de transesterificación.

En la transesterificación básica heterogénea se emplean materiales con características básicas como MgO , hidrotalcitas, zeolitas, Cs-MCM-41 y Cs-sepiolita, montmorilonita KSF, óxidos metálicos de metales alcalinotérreos como CaO y dolomita, entre otros (Aransiola et al., 2014; Chouhan & Sarma, 2011; Leung et al., 2010). Este tipo de transesterificación ha cobrado gran interés entre los investigadores debido a que han demostrado mayor versatilidad técnica para ser empleados en la industria, a que se ha simplificado el proceso de producción y purificación, se emplea menor cantidad de agua, el tamaño del proceso se ha reducido, los impactos ambientales han disminuido, los catalizadores son fácilmente recuperables y el costo del proceso es más bajo. La lista de materiales empleados en la transesterificación heterogénea cada vez aumenta más ya que cada día se proponen nuevos materiales que ayudan a la reacción (Bournay et al., 2005; Chouhan & Sarma, 2011).

En los últimos años, la catálisis enzimática (homogénea y heterogénea) ha tenido avances importantes. Las enzimas que naturalmente trabajan sobre grasas y aceites (lipasas y esterasas) tienen las ventajas de ser catalizadores seguros y ecológicos, además de catalizar reacciones tanto de transesterificación como de esterificación, siendo especialmente útiles cuando se utilizan aceites con altos contenidos de ácidos grasos libres. Sus posibles desventajas serían su costo (que se reduce si se inmovilizan y reciclan) y que hay (respecto a otros sistemas catalíticos) poca experiencia para optimizar los parámetros de operación de estos biocatalizadores.

Los aceites y grasas utilizados para la producción de biodiésel provienen de fuentes vegetales (oleaginosas) y de grasas de animales. En la Tabla A.2 se presentan los principales cultivos y sus características (Mier et al., 2012).

Tabla A.2. Principales cultivos oleaginosos y sus propiedades

Nombre común (científico)	Acidos grasos presentes (%)	Parte oleaginosa	Contenido de aceite (%)	Rendimiento promedio (kg/Ha/año)	Principales productores
Palma aceitera (<i>Elaeis guineensis</i>)	Palmítico (48) Oleico (38) Linoleico (9)	Pulpa del fruto (aceite de palma) Semilla (aceite de palmeastre)	Pulpa: 45-55 Semilla: 44-57	Pulpa: 5,000 Semilla: 8,000	Malasia, Indonesia, Nigeria, Tailandia, Colombia, Brasil
Soya (<i>Glycine max</i>)	Linoleico (53) Oleico (23) Palmítico (12) Linolénico (8)	Semilla	18-20	280-580	Estados Unidos, Brasil, Argentina, China, India, Paraguay, Canadá
Colza, canola (<i>Brassica napus</i> , <i>Brassica rapa</i>)	Oleico (62) Linoleico (22) Linolénico (10)	Semilla	40	700-1,500	India, China, Canadá, Alemania, Francia
Girasol (<i>Helianthus annuus</i>)	Linoleico (59) Oleico (34)	Semilla	45-55	600-950	Rusia, Ucrania, India, China, Argentina, Estados Unidos
Algodón (<i>Gossypium hirsutum</i>)	Linoleico (53) Palmítico (24) Oleico (18)	Semilla	18-25	300	India, China, Estados Unidos, Pakistán, Uzbekistán, Brasil
Ricino o higerilla (<i>Ricinus communis</i>)	Recinoleico (88) Oleico (8)	Semilla	45-55	1,200	China, India, Brasil
Piñón (<i>Jatropha curcas</i>)	Linoleico (49) Oleico (31) Palmítico (12) Esteárico (7)	Semilla	24-34	1,590	

Para la producción de los aceites a partir de microalgas, se tienen las siguientes etapas:

- *Selección de la cepa.* Para elegir una cepa se deben considerar diversos criterios como la velocidad de crecimiento, cuantificada normalmente por biomasa total acumulada por unidad de tiempo y unidad de volumen; la cantidad y calidad lipídica; la respuesta a alteraciones del ambiente, considerando variaciones de temperatura, entrada de nutrientes y fuente lumínica, así como competencia con otras especies de microalgas o bacterianas; la velocidad de absorción y afinidad por nutrientes, particularmente CO₂, nitrógeno y fósforo, y un cultivo de biomasa sencillo para su posterior procesamiento (Fernández-Linares et al., 2012).

- Entre las especies nativas, aquellas con alto contenido de lípidos a menudo tienen una tasa de crecimiento lento; en tales casos, las modificaciones genéticas son utilizadas para desarrollar organismos que crecen rápidamente, que asimilan grandes cantidades de energía y que son adecuadas para la producción comercial de biodiésel. Sin embargo, se ha obstaculizado el uso de microalgas modificadas genéticamente debido a la falta de herramientas específicas de biología molecular y a la preocupación de contaminación biológica, lo que se ha materializado en una legislación restrictiva al respecto. Algunas de las principales especies utilizadas en la producción comercial a gran escala se limitan a ubicaciones geográficas con climas cálidos, por lo cual serían incapaces de crecer a tasas aceptables durante temporadas de calor y frío. Una solución a este problema es identificar las especies nativas que se adapten al entorno local y que se desempeñan mejor que la mayoría de las otras especies en el cultivo a escala comercial en un medio ambiente nativo (Chen et al., 2015).
- *Cultivo*. El crecimiento a gran escala se ha probado en tanques abiertos y cerrados. Los sistemas empleados con mayor frecuencia en la producción de biomasa microalgal son los de tipo abierto, que, a pesar de sus formas y tamaños diversos, destacan por asemejar el entorno natural de las microalgas. Su construcción y operación son relativamente económicas; no obstante, con frecuencia se presentan los problemas de baja productividad debido a agentes contaminantes, mezclado deficiente, zonas muertas, penetración limitada de la luz, pérdida de agua por evaporación y bajas tasas de fijación de CO₂ debido a pérdidas por difusión de este gas a la atmósfera (Chisti, 2007; Garibay Hernández et al., 2009; Mata et al., 2010).
- Los sistemas cerrados conocidos como fotobiorreactores son más eficientes debido a que se tiene más control sobre las condiciones de cultivo, pueden mejorar la transferencia de masa en la absorción del CO₂, y se han utilizado soluciones alcalinas que estabilizan este compuesto a carbonato para luego ser fijado por las microalgas (Chen et al., 2015). El consumo de nutrientes inorgánicos de N y P tal vez sea una de las operaciones más costosas y que obstaculizan su comercialización, sin embargo quizás pueda ser más económica, sostenible y rentable si se combina con otros procesos como el de tratamiento de aguas residuales.
- Los fotobiorreactores cerrados, con el propósito de coleccionar la mayor cuantía posible de energía solar por unidad de superficie, presentan configuraciones diversas, tubulares (vertical, horizontal, helicoidal, conformación α), paneles planos y columnas de burbujeo, principalmente. Actualmente, la principal desventaja de los sistemas cerrados consiste en sus elevados costos atribuidos en mayor medida a la energía invertida en la agitación mecánica de los cultivos con la finalidad de evitar la sedimentación y favorecer la transferencia de gases (Chen et al., 2015; Chisti, 2007; Garibay Hernández et al., 2009; Rawat et al., 2013). Aunque los fotobiorreactores tienen muchas ventajas operativas en cuanto a rendimiento, eficiencia y fijación de CO₂, la realidad es que solamente un pequeño porcentaje de la producción mundial se produce en este tipo de reactores debido a sus altos costos y requerimientos de energía principalmente en el mezclado (Mata et al., 2010; Torres et al., 2013).
- *Cosecha*. La selección de un método apropiado de cosecha es de gran importancia para la economía del proceso, los métodos apropiados de cosecha dependen fuertemente de las características de la especie. Se han utilizado diversas estrategias de cosecha como centrifugación, sedimentación, floculación, flotación, microfiltración y electroforesis. También depende de muchos factores, incluyendo el tipo de células, densidad y tamaño, junto con los requisitos de procesamiento corriente abajo y el valor del producto final. Muchas técnicas de cosecha se han ideado en las últimas cuatro décadas, sin embargo, por lo general la cosecha de microalgas se pueden dividir en una o dos etapas. La flocula-

ción es el primer método de recolección que está destinado a agregar las células de microalgas con el fin de aumentar el tamaño efectivo de partículas. Es un paso preparatorio antes de otros métodos de cosecha tales como filtración, flotación o sedimentación por gravedad dado que las células de microalgas llevan una carga negativa que evita la agregación natural de las células en suspensión, la adición de floculantes tales como cationes multivalentes y polímeros catiónicos neutraliza o reduce la carga negativa. Los floculantes más adecuados son las sales de metales multivalentes como el cloruro férrico (FeCl_3), sulfato de aluminio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) y sulfato férrico ($\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$). Todavía hay una gran cantidad de retos en la cosecha de biomasa de microalgas utilizando tecnologías floculantes eficientes y rentables. Recientemente se han desarrollado nuevas tecnologías de floculación como la inducida por microorganismos, sustancias poliméricas extracelulares o biofloculantes (Brennan & Owende, 2010; Gerardo et al., 2015; Pragya et al., 2013). Otros métodos tradicionales incluyen la sedimentación, centrifugación y filtración. Cada uno de estos métodos muestra sus propias ventajas y desventajas, las eficiencias de estas tecnologías pueden incrementarse si se integran con otros métodos para obtener beneficios económicos y energéticos.

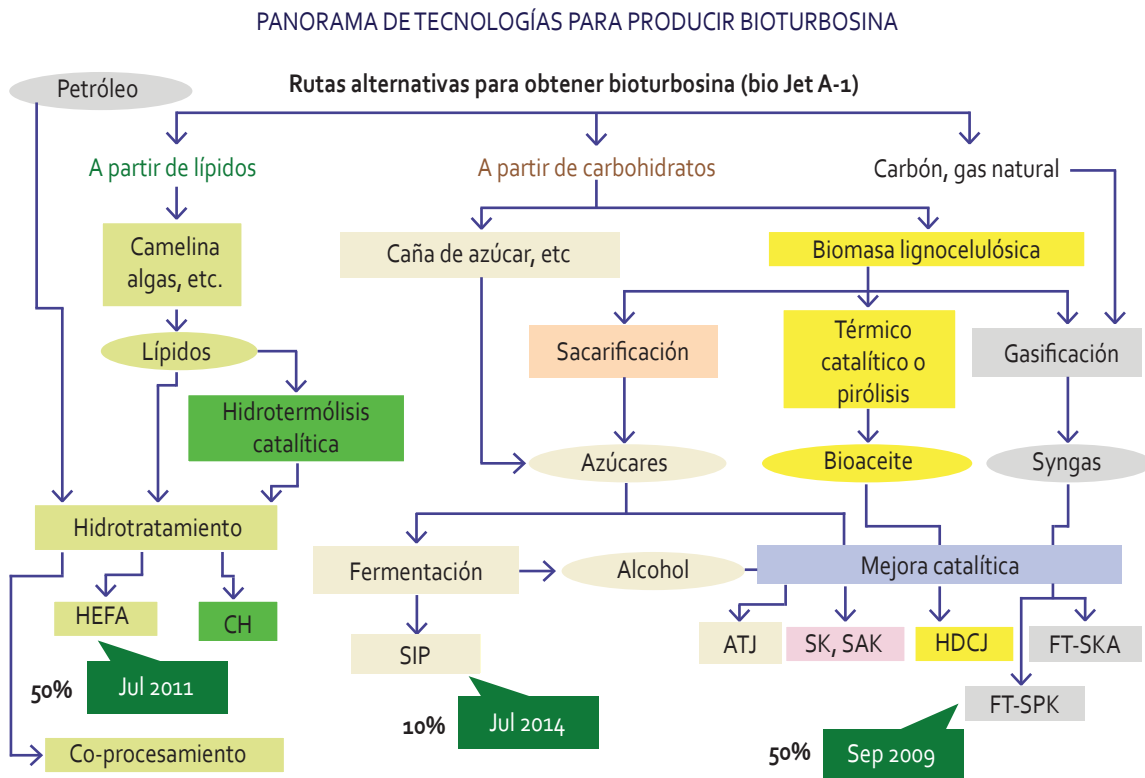
- *Extracción de lípidos.* La extracción de lípidos se realiza mediante métodos físicos o químicos, o una combinación de los dos. El método utilizado para la extracción debe ser rápido, fácilmente escalable, eficaz y no debe dañar los lípidos extraídos. No todos los lípidos son adecuados para la producción de biocombustibles, y además, las fracciones no lipídicas se extraen junto con los lípidos en el mismo proceso, por lo tanto, el proceso de extracción debe ser selectivo hacia las fracciones lipídicas deseables. Otro punto importante a considerar en los costos de producción es la remoción del agua de la materia prima, como el secado solar, por aspersión o por lecho fluidizado entre los más utilizados, lo que implica un gasto extra de energía. Por lo tanto, si un método de extracción puede aplicarse a materias primas húmedas, se puede ahorrar una gran cantidad de energía. Dependiendo del tipo de biomasa, en ocasiones, previo a la extracción de aceite, puede ser necesario un pretratamiento, por ejemplo aplicación de microondas, sonicación, molienda de choque osmótico, homogeneización y liofilización (Kim et al., 2012; Lee et al., 2010). Entre los métodos de extracción de lípidos se encuentran el prensado en frío, la extracción con solventes, extracción con líquidos ionizados y extracción supercrítica con CO_2 , éstos últimos con las mayores promesas de eficiencias de extracción (Halim et al., 2012; Taher et al., 2014). De todos estos, la extracción por prensa se preferirá siempre debido a su bajo costo, aunque su eficiencia es la más baja de todos los procesos, por lo que usualmente se acompañará de una extracción con solventes orgánicos.

Otra fuente de triglicéridos son los aceites microbianos, que provienen de microorganismos *oleaginosos* que acumulan 20% o más de su peso seco como triglicéridos. Su composición es similar a la de los aceites vegetales por lo que, junto con su productividad, se vislumbran como una fuente viable para producir biodiésel en el futuro, ya que la genética y fisiología de varios microorganismos *oleaginosos* es conocida.

BIOTURBOSINA

En la Figura A.5 se muestra un esquema resumido de los procesos ya certificados y de otros procesos que están en desarrollo para la producción de bioturbosina. Como puede apreciarse en el esquema, varias rutas pueden compartir una o dos etapas de transformación, tal como es el caso del “mejoramiento catalítico”, el cual consiste normalmente en una etapa de hidroconversión, donde es posible hidrogenar y modular los niveles de isomerización y rompimiento catalítico a fin de obtener el tipo de hidrocarburos que den buena calidad al biocombustible. Algunas rutas incluyen la formación de compuestos aromáticos, tales como el proceso FT-SKA, el cual es una variante del proceso Fischer-Tropsch, en el cual se emplean catalizadores que permiten la formación de estructuras aromáticas. El combustible así obtenido tiene el potencial de emplearse en concentraciones superiores al 50% al mezclarse con turbosina fósil. De acuerdo con este panorama, se prevé que en el mediano plazo se sintetice bioturbosina de segunda generación, a partir de una amplia gama de materias primas y procesos, y poder satisfacer la demanda creciente de este biocombustible.

Figura A.5. Rutas tecnológicas para la producción de bioturbosina.
Adaptada de IATA (2013)



Uno de los procesos que actualmente está en vías de obtener su certificación es el llamado *alcohol to jet* (ATJ), que se espera se pueda usar en porcentajes mayores al 50% en mezclas con turbosina fósil. En este proceso el combustible renovable se produce a partir de alcoholes que pueden proceder de diferentes orígenes o rutas tecnológicas. La transformación consta de varias etapas de reacción (deshidratación, oligomerización e hidrogenación), cada una de las cuales es un proceso ya usado a escala comercial para diferentes aplicaciones, esto hará más factible su implementación a niveles de producción comerciales; sin embargo, el costo de la producción del alcohol mismo es actualmente la principal barrera para la aplicación de esta tecnología (Matas-Güell et al., 2012).

BIORREFINERÍAS

Este concepto no es nuevo, sólo exhibe claramente la vía sustentable en la que las industrias actuales y futuras pueden guiarse. Los usos tradicionales de la biomasa en las industrias del azúcar, almidón y papel han actuado bajo el concepto de biorrefinerías, y en la actualidad ciertas industrias agropecuarias comienzan a explotar este potencial, ya que además de producir bienes primarios lácteos, cárnicos, harinas, fibra, cueros y textiles, generan calor, electricidad, combustibles y fertilizantes, y en menor medida proteína alimenticia o enzimática y polímeros. Un ejemplo de la integración de una industria agropecuaria a una biorrefinería se da en la producción de plásticos biodegradables por una harinera (Figura A.6). Otros ejemplos no agropecuarios de gran potencial incluyen el aprovechamiento de los residuos agrícolas (Figura A.7), las plantas de tratamiento de aguas residuales y los rellenos sanitarios.

Figura A.6. Biorrefinería basada en trigo para la producción de plásticos biodegradables

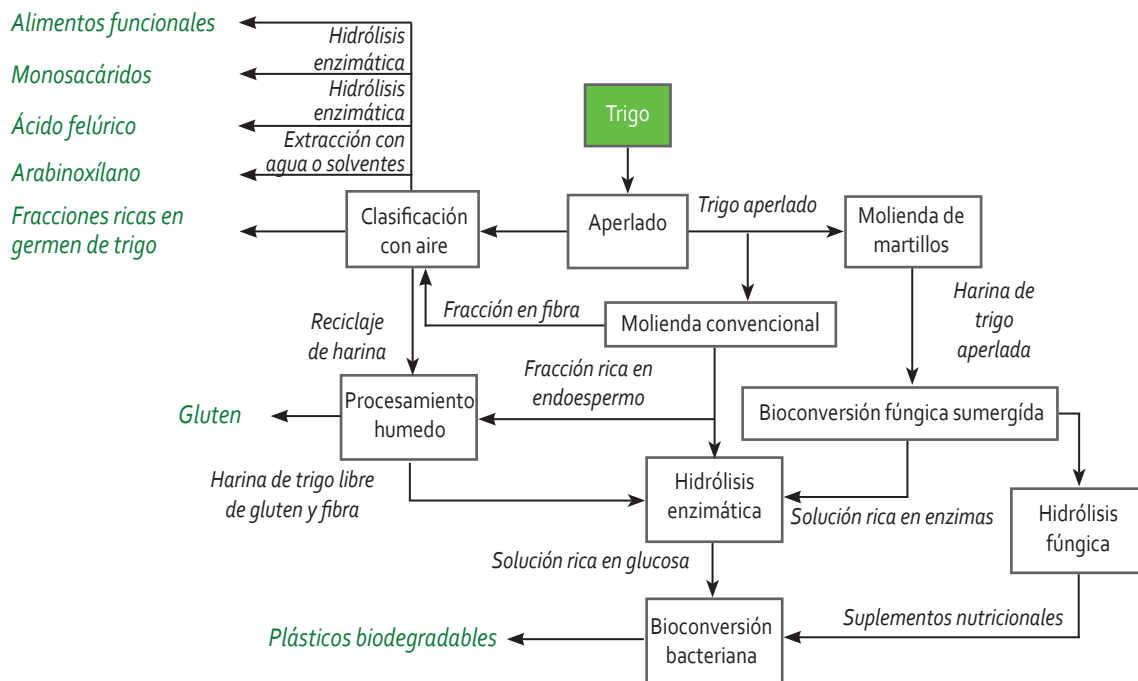
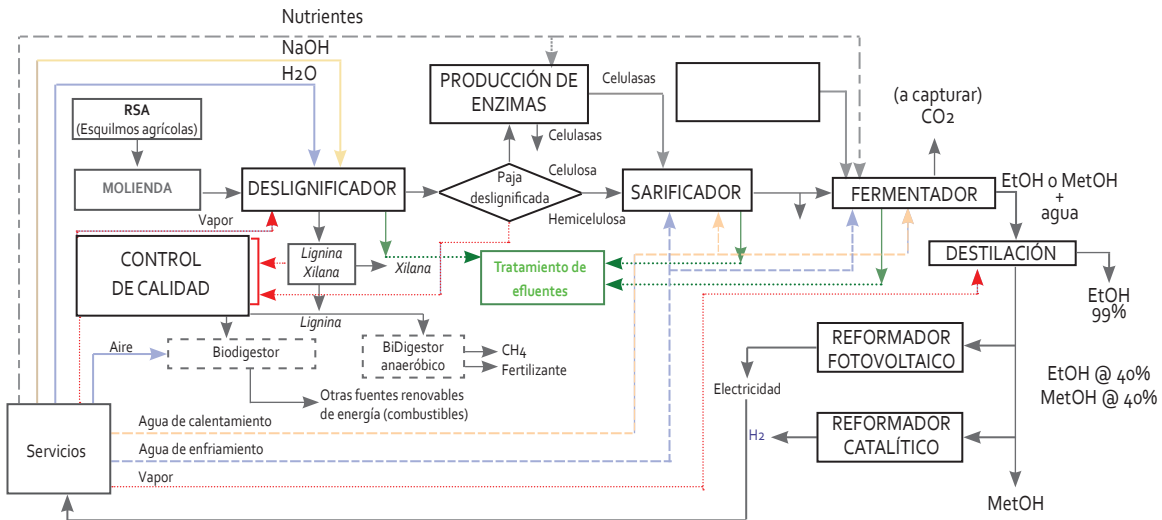


Figura A.7. Biorrefinería para el aprovechamiento de los residuos agrícolas.



Las biorrefinerías pueden clasificarse por un gran número de características, entre las que destacan: a) el tipo de materia prima que utilizan, donde sobresalen la basada en lignocelulosa o en aceites de plantas o algas, b) la plataforma de procesamiento que desarrollan, como la bioquímica o termoquímica, c) el tipo de producto generado, como el tipo C₁ para moléculas de un carbono como el biogás (CH₄) o el gas de síntesis (Syngas), tipo C₅ y C₆ para carbohidratos de 5 o 6 carbonos, o tipo C_n para compuestos pirolíticos reformados vía Fischer-Tropsch (International Energy Agency, 2009).

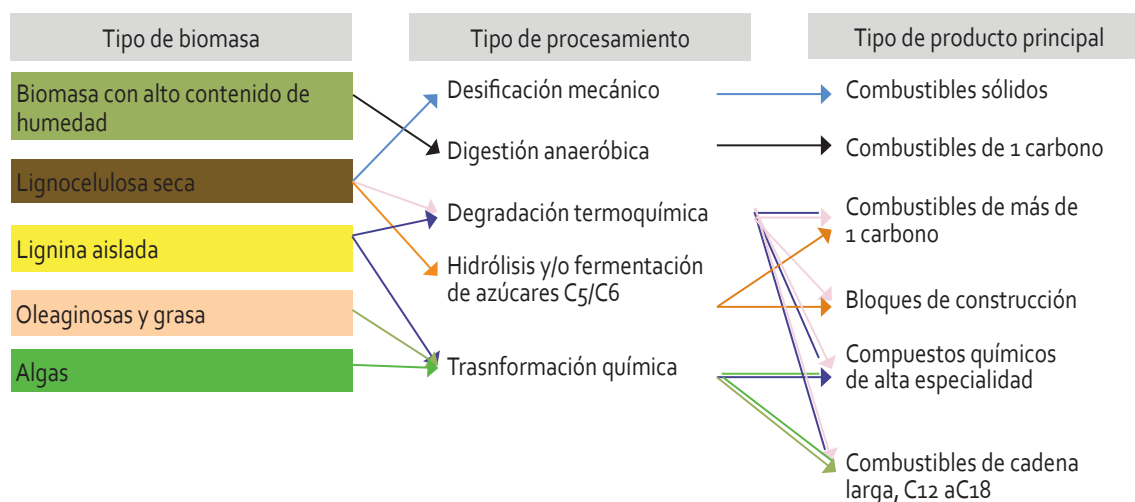
La plataforma de procesamiento es el mejor distintivo entre biorrefinerías, donde el tipo termoquímico involucra el calentamiento a altas temperaturas (> 430 °C) de biomasa con bajo contenido de humedad, en presencia de oxígeno o aire, que mediante gasificación, pirólisis, licuefacción u otras vías, produce una variedad de gases y líquidos reformables. Por otro lado, la del tipo bioquímico consiste en la degradación química o enzimática de los polisacáridos de la biomasa hasta monómeros (Demirbas, 2010).

La plataforma termoquímica permite principalmente la producción del gas de síntesis (Syngas), una mezcla compuesta principalmente por monóxido de carbono (CO) e hidrógeno (H₂), que después de ser limpiado puede ser quemado para producir potencia, puede convertirse por catálisis Fischer-Tropsch en alcoholes de cadena corta, combustibles como diésel y nafta, o fermentarse para producir alcoholes de cadena corta y amoníaco entre otras sustancias químicas. Los compuestos más prometedores obtenidos a partir del gas de síntesis son el metanol (CH₃-OH), etanol (CH₃-CH₂-OH), éter dimetílico (CH₃-O-CH₃) y el diésel tipo Fischer-Tropsch.

La plataforma bioquímica, por una parte involucra la digestión anaeróbica de biomasa con alto contenido de humedad, como excrementos, corrientes de desecho de las plantas procesadoras de alimentos o sólidos biodegradables de los sistemas de tratamiento de aguas residuales municipales. Tiene como productos principales el biogás o metano (CH₄), fertilizantes sólidos, líquidos de fácil asimilación, ricos en carbono, nitrógeno y azufre. La biomasa lignocelulósica de bajo contenido de humedad, involucra la hidrólisis de polisacáridos y la transformación química, bioquímica o biológica de los monosacáridos a una gama muy variada de productos comerciales.

La Figura A.8 describe a los principales tipos de biorrefinerías en función de la materia prima que utilizan, la plataforma que desarrollan y el tipo de producto que generan.

Figura A.8. Biorrefinerías en función de la materia prima, plataforma y producto



Fuente: Werpy et al. (2004).

CARTERA DE PROYECTOS ESTRATÉGICOS

Barreras/desafíos	Tema del proyecto
Falta de políticas públicas claras y sostenibles hacia los bio-combustibles líquidos	<ul style="list-style-type: none"> Fundamentos, diseños y resultados de las políticas de energía renovable y manejo sostenible de cultivos energéticos Políticas específicas para apoyar la integración de plantas de producción, basadas en el modelo de biorrefinerías
Costos de producción no competitivos (falta de incentivos gubernamentales apropiados)	<ul style="list-style-type: none"> Evaluación de criterios para subsidio a la producción de bioetanol en los diferentes estados Diseño de marcos legales que clarifiquen la situación de la producción y distribución de bioetanol combustible Fomento a la creación de empresas proveedoras de insumos (lignocelulosa, enzimas, microorganismos, equipo) Promoción de una estrategia fiscal y legal para facilitar la viabilidad económica de los biocombustibles

<p>Mercado de los biocombustibles líquidos inexistente o poco alentador</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Evaluación de capacidades regionales y locales para ofertar biocombustibles en forma sustentable y competitiva, en relación a las demandas actuales y potenciales de los estados • Desarrollo de proyectos de sostenibilidad de producción de biocombustibles en esquemas de biorrefinería • Integración de procesos de generación de bioetanol lignocelulósico en plantas de producción de etanol de primera generación • Desarrollo de sistemas de abastecimiento de los biocombustibles (logística, distribución, estandarización) con apoyo de los gobiernos estatales
<p>Percepción negativa sobre el uso de tierras de cultivo agrícola para producción de cultivos energéticos</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Selección y explotación de cultivos energéticos diferentes a los destinados para la alimentación humana • Incentivos y oportunidades para sembrar cultivos energéticos en tierras áridas no utilizadas
<p>Evaluar por zonas de la República Mexicana las especies prometedoras para la generación de biocombustibles</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Determinar las especies prometedoras para producir biocombustibles • Evaluar su potencial en cuanto a cantidad de producción • Evaluar su factibilidad técnica-económica
<p>Evaluación de los espacios disponibles para el cultivo de las especies generadoras de la materia prima</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Dividir por zonas la República Mexicana de acuerdo a las especies potencialmente prometedoras para la producción de biocombustibles • Determinar las áreas disponibles para la producción de las especies potencialmente prometedoras
<p>Aprovechamiento de insumos de bajo costo para su transformación en biocombustibles</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Investigación de las características bioenergéticas de diferentes especies nativas de cada estado del país • Determinar la disponibilidad de bioresiduos susceptibles a emplearse en la producción de biocombustibles líquidos
<p>Sustitución de los combustibles fósiles por los biocombustibles</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Evaluación de los sistemas motores para la sustitución • Realizar un plan de adaptación de los sistemas que emplean combustibles fósiles para que empleen biocombustibles
<p>Los biocombustibles deben competir con combustibles fósiles en mercados existentes, con tecnologías emergentes y bajo criterios de sostenibilidad</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Análisis tecno-económico y de ciclo de vida de propuestas de biorrefinerías integradas que maximicen el aprovechamiento de la biomasa mexicana para la producción simultánea de biocombustibles, energía, químicos y productos de alto valor agregado • Selección y mejoramiento genético de especies vegetales y microorganismos precursores de biocombustibles • Desarrollo de metodologías e indicadores que permitan la definición y evaluación de la sostenibilidad de sistemas de producción de biocombustibles, con énfasis en los impactos sociales

Lograr la viabilidad económica de los procesos de microalgas para biocombustibles	<ul style="list-style-type: none"> • Desarrollo de equipos y procesos para el cultivo de microalgas altamente productivos en medios de cultivo con nutrientes reciclados y fuentes residuales de CO₂ • Modificación genética de microalgas para la sobreproducción de lípidos y metabolitos de alto valor agregado • Análisis tecnoeconómico y de ciclo de vida de propuestas de biorrefinerías integradas que maximicen el aprovechamiento de la biomasa microalgal para la producción simultánea de biocombustibles, energía, químicos y productos de alto valor agregado.
Falta de coordinación en los eslabones de la cadena de producción y suministro de insumos	<ul style="list-style-type: none"> • Capacitación a productores e implementación de modelos de transferencia de tecnología
Empresas con alta resistencia al cambio	<ul style="list-style-type: none"> • Talleres y eventos de divulgación hacia empresas
Percepciones negativas de los consumidores industriales	

REFERENCIAS

- Alvira, P. et al., 2010. Pretreatment technologies for an efficient bioethanol production process based on enzymatic hydrolysis: A review. *Bioresource Technology*, 101(13), pp.4851-4861.
- Aransiola, E.F. et al., 2014. A review of current technology for biodiesel production: State of the art. *Biomass and Bioenergy*, 61, pp.276-297.
- Atabani, A.E. et al., 2012. A comprehensive review on biodiesel as an alternative energy resource and its characteristics. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(4), pp.2070-2093.
- Barbosa, M. de F.S., Yomano, L.P. & Ingram, L.O., 1994. Cloning, sequencing and expression of stress genes from the ethanol-producing bacterium *Zymomonas mobilis*: the groESL operon. *Gene*, 148(1), pp.51-57.
- Behera, S., Mohanty, R.C. & Ray, R.C., 2010. Comparative study of bio-ethanol production from mahula (*Madhuca latifolia* L.) flowers by *Saccharomyces cerevisiae* and *Zymomonas mobilis*. *Applied Energy*, 87(7), pp.2352-2355.
- Bouaid, A. et al., 2005. Pilot plant studies of biodiesel production using *Brassica carinata* as raw material. *Catalysis Today*, 106(1-4), pp.193-196.
- Bournay, L. et al., 2005. New heterogeneous process for biodiesel production: A way to improve the quality and the value of the crude glycerin produced by biodiesel plants. *Catalysis Today*, 106(1-4), pp.190-192.
- Brennan, L. & Owende, P., 2010. Biofuels from microalgae—A review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(2), pp.557-577.
- Castro, P. et al., 2006. *Producción de biodiésel a pequeña escala a partir de aceites usados en la ciudad de Lima*, Lima, Perú: Intermediate Technology Development Group (ITDG) y la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM).
- CEPAL, 2007. *Anuario estadístico de América Latina y el Caribe*, CEPAL.
- Chen, H. et al., 2015. Microalgal biofuel revisited: An informatics-based analysis of developments to date and future prospects. *Applied Energy*, 155, pp.585-598.
- Cheng, K.-K. et al., 2008. Sugarcane bagasse hemicellulose hydrolysate for ethanol production by acid recovery process. *Biochemical Engineering Journal*, 38(1), pp.105-109.

- Chisti, Y., 2007. Biodiesel from microalgae. *Biotechnology Advances*, 25(3), pp.294-306.
- Chouhan, A.P.S. & Sarma, A.K., 2011. Modern heterogeneous catalysts for biodiesel production: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(9), pp.4378-4399.
- Demirbas, A., 2010. *Green Energy and Technology. Biorefineries For Biomass Upgrading Facilities*, London: Springer-Verlag.
- Dogaris, I., Mamma, D. & Kekos, D., 2013. Biotechnological production of ethanol from renewable resources by *Neurospora crassa*: an alternative to conventional yeast fermentations? *Applied Microbiology and Biotechnology*, 97(4), pp.1457-1473.
- Emond, S. et al., 2008. Cloning, purification and characterization of a thermostable amylosucrase from *Deinococcus geothermali*s. *FEMS Microbiology Letters*, 285(1), pp.25-32.
- Erdei, B. et al., 2010. Ethanol production from mixtures of wheat straw and wheat meal. *Biotechnology for Biofuels*, 3(1), pp.1-9.
- Fernández-Linares, L. et al., 2012. Producción de biocombustibles a partir de microalgas. *Ra Ximhai*, 8(3b), pp.101-115.
- Galbe, M. & Zacchi, G., 2007. Pretreatment of Lignocellulosic Materials for Efficient Bioethanol Production. En L. Olsson, ed. *Biofuels SE - 70. Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology*. Springer Berlin Heidelberg, pp. 41-65.
- Gámez, S. et al., 2006. Study of the hydrolysis of sugar cane bagasse using phosphoric acid. *Journal of Food Engineering*, 74(1), pp.78-88.
- Garibay Hernández, A. et al., 2009. Biodiésel a partir de microalgas. *BioTecnología*, 13(3), pp.38-61.
- Gerardo, M.L. et al., 2015. Harvesting of microalgae within a biorefinery approach: A review of the developments and case studies from pilot-plants. *Algal Research*, 11, pp.248-262.
- Gerpen van, J. et al., 2004. *Biodiesel Production Technology*, Golden, CO.
- Halim, R., Danquah, M.K. & Webley, P.A., 2012. Extraction of oil from microalgae for biodiesel production: A review. *Biotechnology Advances*, 30(3), pp.709-732.
- Haven, M.Ø. et al., 2015. Continuous recycling of enzymes during production of lignocellulosic bioethanol in demonstration scale. *Applied Energy*, 159, pp.188-195.
- Hernández-Salas, J.M. et al., 2009. Comparative hydrolysis and fermentation of sugarcane and agave bagasse. *Bioresource Technology*, 100(3), pp.1238-1245.
- IATA, 2013. *Report on alternative fuels. 8th Edition*, Montreal-Géneva: International Air Transportation Association.
- Ibrahim, M.M. et al., 2011. Comparison of alkaline pulping with steam explosion for glucose production from rice straw. *Carbohydrate Polymers*, 83(2), pp.720-726.
- International Energy Agency, 2009. *Bio-based Chemicals. Value added Products from Biorefineries*, Paris: OECD/IEA.
- Ishikura, C., 2005. *Relatório de estágio produção de biodiesel a partir de óleos usados de fritura*, Brasil: Departamento de Engenharia Química e Alimentos, Universidade Federal de Santa Catarina.
- Jeffries, T.W. et al., 2007. Genome sequence of the lignocellulose-bioconverting and xylose-fermenting yeast *Pichia stipitis*. *Nat Biotech*, 25(3), pp.319-326.
- Jovanović-Malinovska, R. et al., 2010. Immobilization of *Saccharomyces cerevisiae* in novel hydrogels based on hybrid networks of poly(ethylene oxide), alginate and chitosan for ethanol production. *Macedonian Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, 29(2), pp.169-179.
- Kim, C.H. et al., 1988. Immobilization of *Zymomonas mobilis* and amyloglucosidase for ethanol production from sago starch. *Enzyme and microbial technology*, 10(7), pp.426-430.
- Kim, Y.-H. et al., 2012. Ionic liquid-mediated extraction of lipids from algal biomass. *Bioresource Technology*, 109, pp.312-315.
- Lee, D. et al., 1994. Evaluation of the enzymatic susceptibility of cellulosic substrates using specific hydrolysis rates and enzyme adsorption. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 45-46(1), pp.407-415.
- Lee, J.-Y. et al., 2010. Comparison of several methods for effective lipid extraction from microalgae. *Bioresource Technology*, 101(1, Supl.), pp.575-577.
- Leung, D.Y.C., Wu, X. & Leung, M.K.H., 2010. A review on biodiesel production using catalyzed transesterification. *Applied Energy*, 87(4), pp.1083-1095.
- Ma, F., Clements, L.D. & Hanna, M., 1998. The effects of catalyst, free fatty acids, and water on transesterification of beef tallow. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 41(5), pp.1261-1264.

- Ma, F. & Hanna, M.A., 1999. Biodiesel production: a review. *Bioresource Technology*, 70(1), pp.1-15.
- Mao, Y., 2010. Enzyme immobilization on nanoparticles for reuse in cellulosic ethanol conversion. En *10AIChE - 2010 AIChE Annual Meeting, Conference Proceedings*.
- Mata, T.M., Martins, A.A. & Caetano, N.S., 2010. Microalgae for biodiesel production and other applications: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(1), pp.217-232.
- Matas-Güell, B. et al., 2012. *Benchmark of conversion and production technologies for synthetic biofuels for aviation*, Norway.
- Mier, M.A.M., Vargas, F.E.S. & Fajardo, C.A.G., 2012. Producción y caracterización de biodiésel a partir de aceite de pollo. *Revista Informador Técnico*, (76), pp.62-71.
- Naseeruddin, S. et al., 2013. Selection of the best chemical pretreatment for lignocellulosic substrate *Prosopis juliflora*. *Bioresource Technology*, 136, pp.542-549.
- Ndaba, B. et al., 2014. Effect of *Saccharomyces cerevisiae* and *Zymomonas mobilis* on the co-fermentation of sweet sorghum bagasse hydrolysates pretreated under varying conditions. *Biomass and Bioenergy*, 71, pp.350-356.
- Peng, F. et al., 2009. Comparative Study of Hemicelluloses Obtained by Graded Ethanol Precipitation from Sugarcane Bagasse. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 57(14), pp.6305-6317.
- Pragya, N., Pandey, K.K. & Sahoo, P.K., 2013. A review on harvesting, oil extraction and biofuels production technologies from microalgae. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 24, pp.159-171.
- Rawat, I. et al., 2013. Biodiesel from microalgae: A critical evaluation from laboratory to large scale production. *Applied Energy*, 103, pp.444-467.
- Reipen, I.G. et al., 1995. *Zymomonas mobilis* squalene-hopene cyclase gene (shc): cloning, DNA sequence analysis and expression in *Escherichia coli*. *Microbiology*, 141(1), pp.155-161.
- Reis dos, L. et al., 2013. Increased production of cellulases and xylanases by *Penicillium echinulatum* S1M2g in batch and fed-batch culture. *Bioresource Technology*, 146, pp.597-603.
- Sills, D.L. & Gossett, J.M., 2011. Assessment of commercial hemicellulases for saccharification of alkaline pretreated perennial biomass. *Bioresource Technology*, 102(2), pp.1389-1398.
- Singh, A. et al., 2013. Comparative study on ethanol production from pretreated sugarcane bagasse using immobilized *Saccharomyces cerevisiae* on various matrices. *Renewable Energy*, 50, pp.488-493.
- Taher, H. et al., 2014. Supercritical carbon dioxide extraction of microalgae lipid: Process optimization and laboratory scale-up. *The Journal of Supercritical Fluids*, 86, pp.57-66.
- Tao, F. et al., 2005. Ethanol fermentation by an acid-tolerant *Zymomonas mobilis* under non-sterilized condition. *Process Biochemistry*, 40(1), pp.183-187.
- Torres, C.M. et al., 2013. Microalgae-based biodiesel: A multicriteria analysis of the production process using realistic scenarios. *Bioresource Technology*, 147, pp.7-16.
- Werpy, T. et al., 2004. *Top value added chemicals from biomass*, United States Department of Energy.
- Yanase, S. et al., 2010. Ethanol production from cellulosic materials using cellulase-expressing yeast. *Biotechnology Journal*, 5(5), pp.449-455.
- Yang, L. et al., 2012. Effects of sodium carbonate pretreatment on the chemical compositions and enzymatic saccharification of rice straw. *Bioresource Technology*, 124, pp.283-291.
- Zampieri, D. et al., 2013. Secretion of endoglucanases and β -glucosidases by *Penicillium echinulatum* gA02S1 in presence of different carbon sources. *Industrial Crops and Products*, 50, pp.882-886.
- Zerva, A. et al., 2014. Evaluation of *Paecilomyces variotii* potential in bioethanol production from lignocellulose through consolidated bioprocessing. *Bioresource Technology*, 162, pp.294-299.
- Zhang, F. et al., 2011. Cloning, expression and characterization of an alkaline thermostable GH9 endoglucanase from *Thermobifida halotolerans* YIM 90462T. *Bioresource Technology*, 102(21), pp.10143-10146.
- Zhu, X. et al., 2013. Metabolic Adaptation of Ethanol-Tolerant *Clostridium thermocellum*. *PLoS ONE*, 8(7), p.e70631.

ANEXO B

IMPACTOS A LA SUSTENTABILIDAD DE LA BIOENERGÍA

EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO (GEI)

En las Tablas A.3 y A.4 se presentan ejemplos de emisiones de gases de efecto invernadero para biocombustibles líquidos y para generación eléctrica respectivamente. En general, la bioenergía tiene menores emisiones que la energía fósil, además de que las aplicaciones para generación eléctrica tienen una mayor mitigación de GEI que la lograda con los biocombustibles líquidos, principalmente debido a que se evitan el uso de insumos, energía y emisiones del suelo durante la producción de la materia prima (Cherubini & Strømman, 2011; Chum et al., 2011; García et al., 2011).

Tabla A.3. Emisiones de gases de efecto invernadero de diferentes biocombustibles líquidos

Combustible/materia prima	Emisiones gCO ₂ e/MJ
Etanol	
Caña de azúcar	21.3 (36.8) ^a
Maíz	52.6 (30-59)
Etanol de segunda generación	10-38
Referencia fósil	83.8^b
Biodiésel	
Soya	45.7
Canola	74.6
Diesel sintético (BTL)	0-20
Referencia fósil	83.8^b

Fuente: Elaboración propia con datos de García et al. (2011); García, 2012; Mendes et al. 2015). ^aLos datos entre paréntesis corresponden a valores calculados para México. ^bvalor adoptado por la Directiva Europea de Energía Renovable.

Tabla A.4. Emisiones de gases de efecto invernadero de diferentes opciones de generación eléctrica con biomasa

Combustible	Emisiones gCO ₂ e/kWh
Residuos de aserraderos y de bosques	23-30 ^a ; 27 a 80 ^b
Residuos agrícolas	42-26 ^a ; 50-151 ^b
Cultivos leñosos de rotación corta	31-40 ^a ; 37-109 ^b
Cultivos herbáceos	10-38
Referencia fósil	550 ^c -1000 ^d

Fuente: Elaboración propia con datos de Mendes et al. (2015). ^aValor para potencias mayores a 10 MWe; ^bValores para potencias de entre 0.01 a 10 MWe. ^cValor para Gas Natural. ^dValor para carbón mineral.

Se ha identificado que las emisiones por cambio de uso de suelo, debidas al cambio en los almacenes de carbono en la vegetación y el suelo al sustituir algún tipo de vegetación natural por cultivos bioenergéticos, pueden ser determinantes en cuanto al balance positivo o negativo de emisiones de GEI de tecnologías bioenergéticas. Las emisiones por cambio en el uso de suelo se pueden diferenciar en emisiones directas e indirectas.

Las emisiones por el cambio en el uso de suelo directo son debidas a las variaciones de almacenes de carbono en la biomasa aérea (la que sobresale de la superficie), la biomasa subterránea (rizomas y raíces) y el carbono orgánico en el suelo. Estas emisiones tienen una influencia negativa en los balances de GEI cuando se cultivan suelos con un alto contenido de carbono almacenado, como en los bosques o praderas, resultando en emisiones netas de CO₂ para algunas opciones de bioenergía, principalmente en biocombustibles líquidos de primera generación (Fargione et al., 2008; Searchinger et al., 2008).

Estimaciones para etanol de caña de azúcar en condiciones de México señalan que las emisiones de GEI, en caso de ocurrir cambios directos en el uso de suelo, estarían entre 97-116, 28-32, y 24-41 g CO₂e/MJ si los cultivos tuvieran lugar en selva alta, selva baja y pastizales respectivamente (García et al., 2011). Algo similar ocurriría en la producción de *Jatropha curcas* en Yucatán (Skutsch et al., 2011).

Las emisiones por el cambio indirecto en el uso de suelo ocurren cuando la expansión del área de cultivos para la producción de biocombustibles tiene como resultado el desplazamiento de cultivos o pastos sobre áreas que no eran cultivadas previamente (Mendes et al., 2015). Estas emisiones indirectas no pueden ser atribuidas individualmente a procesos de producción específicos ya que dependen también de la demanda del mercado, de los precios y de la disponibilidad de productos sustitutos, sin embargo, pueden ser bastante importantes, al grado de resultar en emisiones netas para algunas opciones de bioenergía. Sin embargo, debido a su complejidad no existen metodologías consensuadas en la comunidad científica (Kim & Dale, 2011). Hasta el momento no existen evaluaciones de las posibles emisiones por el cambio en el uso de suelo por la producción de bioenergía en México.

IMPACTOS EN LA CALIDAD DEL AIRE

Las principales fuentes de emisiones al aire son la combustión incompleta de leña, carbón vegetal, residuos agrícolas, residuos agroindustriales, y en algunos casos la combustión de mezclas de etanol y biodiésel en motores de combustión interna (Jones et al., 2014; Niven, 2005; Winebrake et al., 2001).

El uso tradicional de leña en fogones abiertos en los hogares rurales tiene un impacto importante principalmente en la salud de las mujeres y los niños debido a la combustión incompleta e incontrolada en intramuros (donde se generan partículas, hidrocarburos aromáticos policíclicos, óxido nitroso y monóxido de carbono) y a los largos tiempos de exposición a estos contaminantes (Mäser et al., 2005; REMBIO, 2011).

Los trabajadores de pequeñas industrias como las productoras de carbón vegetal y ladrilleras, también están expuestos a emisiones contaminantes debido a tecnologías ineficientes e incontroladas que emplean biomasa como combustible o materia prima (Blackman et al., 2000; Pennise et al., 2001), lo mismo que ocurre en poblaciones aledañas a cultivos de caña cuando ésta se quema para su cosecha manual y la combustión de biomasa como el bagazo o chips de madera en calderas para la generación de calor y electricidad (Jones et al., 2014; Mugica-Alvarez et al., 2015).

En cuanto a los impactos en el aire por la mezcla de etanol con gasolina en automóviles ligeros, se tienen resultados variados y en ocasiones contradictorios entre sí (García et al., 2010; Schifter et al., 2011). Un estu-

dio sobre los impactos de mezclar etanol con gasolina en una flota de vehículos ligeros con las características de la zona metropolitana de la Ciudad de México reporta que la mezcla gasolina etanol (en 6%) disminuiría las emisiones de CO y NOx por el uso de etanol, sin embargo, aumentarían las emisiones de hidrocarburos totales, y sobre todo de formaldehído y acetaldehído (Schifter et al., 2011).

IMPACTOS SOBRE LA DISPONIBILIDAD DE AGUA

En México la disponibilidad de agua puede limitar en gran medida el desarrollo de cultivos energéticos, debido a que dos terceras partes del territorio nacional son consideradas áridas o semiáridas, (CONAGUA, 2013; Delgado, 2014). Existe además una sobreexplotación de 106 de los 653 acuíferos totales, y 32 acuíferos con intrusión marina (CONAGUA, 2013).

Con el objeto de evaluar el impacto que pueden tener las formas de energía en la disponibilidad de agua, se han propuesto algunos indicadores. La metodología más empleada es la huella hídrica (Gerbens-Leenes et al., 2007). Resultados de este indicador muestran que las tecnologías bioenergéticas en general tienen un mucho mayor uso de agua en comparación a otras tecnologías energéticas (ver Tabla A.5). En México se tienen pocas evaluaciones de huella hídrica para opciones de bioenergía, reportándose casos principalmente para biocombustibles líquidos con valores de 101 m³/GJ para etanol de caña (cálculos propios basados en (Haro et al., s. f.) y alrededor de 50 m³/GJ para etanol de maíz (García, 2012) (Tabla 6.3).

La producción de bioenergía también podría afectar la calidad del agua (p. ej., contribuir a la eutrofización de cuerpos de agua superficiales debido al uso de fertilizantes o vinazas), en tanto que la contaminación del agua con nitratos y plaguicidas puede representar un problema importante de salud para los humanos y los ecosistemas.

Tabla A.5. Huella hídrica de diferentes fuentes energéticas

Fuente energética	Huella hídrica (m ³ /GJ)
Etanol de caña	99 (101.5) ^a
Etanol de maíz	78 (≈50)
<i>Chips</i> de madera	42
<i>Miscanthus</i>	37
Solar fotovoltaica	0.042
Eólica (en tierra)	0.001
Carbón mineral	0.15-0.58
Petróleo	4.29-8.6
Gas natural	0.1

Fuente: varias fuentes compiladas en Hadian & Madani (2015).

^a Los valores entre paréntesis son cálculos propios para México basados en García (2012) y Haro et al. (s. f.).

IMPACTOS ECONÓMICOS

La viabilidad económica de las opciones de bioenergía es un elemento fundamental para lograr su sustentabilidad. Existen varias aplicaciones tecnológicas de la bioenergía que son costo-eficientes y competitivas en el mercado, principalmente para la generación de calor a nivel residencial e industrial; en tanto que para los biocombustibles líquidos sólo los países con bajos costos o con rendimientos agrícolas muy altos pueden competir en la actualidad contra los derivados del petróleo en los mercados internacionales (p. ej., Brasil con etanol de caña de azúcar, Estados Unidos de América con etanol de maíz) (Tabla A.6). En México existen evaluaciones para la producción de etanol. La Secretaría de Energía reporta costos de producción de 8.768 pesos para el litro de etanol de caña de azúcar, 10.875 pesos para etanol de sorgo grano y 6.566 pesos para etanol de sorgo dulce (SENER, 2014).

Tabla A.6. Costos de producción de la energía con diferentes tecnologías

Electricidad	UScentavos/kWh
Co-combustión en carboeléctricas	2.9-5.5
Combustión directa (residuos de aserradero, <i>chips</i>)	7.2-9.2
Gasificación a pequeña escala (residuos)	10-14
Biocombustibles líquidos	USD/GJ
Etanol de maíz	17.5-34.8
Biodiésel de canola	28.5-41.5
Etanol de trigo	22.8-40.7
Etanol de caña	14.8-31.8
Etanol de melaza	16-21
Etanol lignocelulósico (con sacarificación y fermentación simultáneas)	6-28

Fuente: Chum et al. (2011).

REFERENCIAS

- Blackman, A. et al., 2000. *The Benefits and Costs of Informal Sector Pollution Control: Mexican Brick Kilns*, Washington DC: Resources for the Future.
- Cherubini, F. & Strømman, A.H., 2011. Life cycle assessment of bioenergy systems: State of the art and future challenges. *Bioresource Technology*, 102(2), pp.437-451.
- Chum, H. et al., 2011. Bioenergy. En O. Edenhofer et al., eds. *IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation*. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press.
- CONAGUA, 2013. *Estadísticas del agua en México, edición 2013*, México, DF: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales y Comisión Nacional del Agua.
- Delgado, G. ed., 2014. *Apropiación de agua, medio ambiente y obesidad. Los impactos del negocio de bebidas embotelladas*, México: Centro de Investigaciones Interdisciplinarias en Ciencias y Humanidades, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Fargione, J. et al., 2008. Land Clearing and the Biofuel Carbon Debt. *Science*, 319(5867), pp.1235-1238.
- García, C.A., 2012. *Etanol de primera generación, estudio de la sustentabilidad de su producción considerando el ciclo de vida y análisis económico-ambiental de su introducción en el sector transporte Mexicano*. Tesis de Doctorado. Universidad Nacional Autónoma de México.
- García, C.A. et al., 2011. Life-cycle greenhouse gas emissions and energy balances of sugarcane ethanol production in Mexico. *Applied Energy*, 88(6), pp.2088-2097.
- García, C.A., Manzini, F. & Islas, J., 2010. Air emissions scenarios from ethanol as a gasoline oxygenate in Mexico City Metropolitan Area. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(9), pp.3032-3040.
- Gerbens-Leenes, W., Hoekstra, A. & Meer, T., 2007. The water footprint of energy consumption: an assessment of water requirements of primary energy carriers. *ISESCO Science and Technology Vision*, 4(5), pp.38-42.
- Hadian, S. & Madani, K., 2015. A system of systems approach to energy sustainability assessment: Are all renewables really green? *Ecological Indicators*, 52, pp.194-206.
- Haro, M.E., Navarro, I. & Jimenez, B., Estimation of water footprint of sugarcane in Mexico: is ethanol production and environmentally feasible fuel option? Recuperado de http://www.pincc.unam.mx/INFORMES PROYECTOS/5_Informe_final_ingles.pdf.
- Jones, J.M. et al., 2014. *Pollutants Generated by the Combustion of Solid Biomass Fuels*, Springer.
- Kim, S. & Dale, B.E., 2011. Indirect land use change for biofuels: Testing predictions and improving analytical methodologies. *Biomass and Bioenergy*, 35(7), pp.3235-3240.
- Masera, O.R., Díaz, R. & Berrueta, V., 2005. From cookstoves to cooking systems: the integrated program on sustainable household energy use in Mexico. *Energy for Sustainable Development*, 9(1), pp.25-36.
- Mendes, G. et al. eds., 2015. *Bioenergy & Sustainability: bridging the gaps*, Sao Paulo: Scientific Committee on Problems of the Environment.
- Mugica-Alvarez, V. et al., 2015. Emissions of PAHs derived from sugarcane burning and processing in Chiapas and Morelos México. *Science of The Total Environment*, 527-528, pp.474-482.
- Niven, R.K., 2005. Ethanol in gasoline: environmental impacts and sustainability review article. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 9(6), pp.535-555.
- Pennise, D.M. et al., 2001. Emissions of greenhouse gases and other airborne pollutants from charcoal making in Kenya and Brazil. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106(D20), pp.24143-24155.
- REMBIO, 2011. *La Bioenergía en México: Situación actual y perspectivas*, México: Red Mexicana de Bioenergía.

- Schifter, I. et al., 2011. Oxygenated transportation fuels. Evaluation of properties and emission performance in light-duty vehicles in Mexico. *Fuel*, 90(2), pp.779-788.
- Searchinger, T. et al., 2008. Use of U.S. Croplands for Biofuels Increases Greenhouse Gases Through Emissions from Land-Use Change. *Science*, 319(5867), pp.1238-1240.
- SENER, 2014. *Análisis y propuesta para a introducción de etanol anhidro en las gasolinas que comercializa*, México: Secretaría de Energía.
- Skutsch, M. et al., 2011. Jatropha in Mexico: environmental and social impacts of an incipient biofuel program. *Ecology and Society*, 16(4), p.11.
- Winebrake, J., Wang, M.Q. & He, D., 2001. Toxic emissions from mobile sources : A Total fuel- cycle analysis for conventional and alternative fuel vehicles Toxic Emissions from Mobile Sources : A Total Fuel-Cycle Analysis for Conventional and Alternative Fuel Vehicles. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 51, pp.1073-1086.