

PERSPECTIVAS DE DISMINUCIÓN DE EMISIONES DE CARBONO EN MÉXICO POR EL USO DE LA BIOENERGÍA: PANORAMA ACTUAL

PROSPECTS FOR REDUCING CARBON EMISSIONS IN MEXICO THROUGH THE USE OF BIOENERGY: CURRENT OUTLOOK

René David Martínez-Bravo^{1†} y Omar Masera¹

¹ Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad, UNAM Campus Morelia, México.

[†] Autor para correspondencia: redamar@cieco.unam.mx

RESUMEN

Al provenir de los sumideros/reservorios de la biósfera, la bioenergía participa en el ciclo natural del carbono. Es una pieza clave para la descarbonización del sector energético y para la mitigación del cambio climático global. Al ser derivada de diferentes fuentes de biomasa, se producen bioenergéticos sólidos, líquidos y gaseosos. En este trabajo se realiza una revisión del papel de la bioenergía en la mitigación de gases de efecto invernadero en México. La aportación actual de la bioenergía en la matriz energética de México es de aproximadamente el 4.2% representada por leña y bagazo de caña; sin embargo, los sectores doméstico e industrial pueden aumentar su uso y llegar a ser ejemplos exitosos de mitigación de CO₂, si se acompañan de tecnologías de transformación eficientes. A nivel nacional, se cuenta con biomasa forestal suficiente para generar entre 1135 y 1923 PJ año⁻¹ en tareas térmicas, principalmente (mitigación de hasta 84.4 MtonCO₂ año⁻¹). La mitigación acumulada del uso de leña asociada a tecnología eficiente y al gas LP puede alcanzar los 126.3 Mt CO₂e al 2030. La reducción de emisiones de CO₂ de los biocombustibles depende en gran medida de la tecnología de transformación. A corto plazo, los biocombustibles sólidos presentan el mayor potencial de penetración en el mercado nacional; los líquidos y gaseosos aún enfrentan desafíos. La principal barrera del uso de los bioenergéticos *versus* el energético a sustituir, es demostrar que son una opción viable y sostenible de mitigación. Otros retos de los biocombustibles son de índole económico y de aceptación social, también requieren de un esquema favorable de políticas públicas en las que se muestren como una alternativa para la descarbonización del sector energético. Para superar los retos, es imprescindible validar los inventarios de provisión de materia prima y mejorar los escenarios de mitigación.

Palabras Clave: *mitigación; biocombustibles; política energética; recursos biomásicos.*

ABSTRACT

Coming from the biosphere's sinks/reservoirs, bioenergy participates in the natural carbon cycle. It is a key part of the decarbonization of the energy sector and the mitigation of global climate change. As it is derived from different sources of biomass, solid, liquid and gaseous bioenergy is produced. In this work, a review of the role of bioenergy in the mitigation of greenhouse gases in Mexico is carried out. The current contribution of bioenergy in Mexico's energy matrix is approximately 4.2% represented by firewood and bagasse; however, the domestic and industrial sectors can increase its use, and become successful examples of CO₂ mitigation if accompanied by efficient transformation technologies. At the national level, there is enough forest biomass to generate between 1135 and 1923 PJ year⁻¹, mainly for thermal purposes (mitigation of up to 84.4 MtonCO₂ year⁻¹). The accumulated mitigation of wood use associated with efficient technology and LP gas can reach 126.3 Mt CO₂e by 2030. The reduction of CO₂ emissions from biofuels depends largely on the transformation technology. In the short term, solid biofuels present the greatest potential for domestic market penetration; liquid and gaseous biofuels still face

challenges. The main barrier to the use of bioenergy versus energy to be substituted is to demonstrate that it is a viable and sustainable mitigation option. Other challenges of biofuels are of an economic nature and of social acceptance. They also require a favorable public policy framework in which they are shown to be an alternative for the decarbonization of the energy sector. To overcome these challenges, it is essential to validate inventories of raw material supply and improve mitigation scenarios.

Index words: mitigation; biofuels; energy policy; biomass resources.

INTRODUCCIÓN

El crecimiento poblacional en México lleva ligado un aumento en la demanda y el consumo de energía (INEGI 2015; SENER 2017). La fuente principal de energía nacional está basada en los combustibles fósiles (García *et al.*, 2013; Ferrari *et al.*, 2020). La bioenergía es una alternativa para la diversificación energética en conjunto con las energías renovables, además de proveer beneficios ambientales (Islas y Martínez, 2010).

En el esquema de la sustentabilidad, la bioenergía es un recurso renovable a largo plazo, construida por diversos recursos biomásicos como madera y sus residuos, residuos agroindustriales, animales y sólidos urbanos principalmente (García-Bustamante y Masera, 2016). A diferencia de otros energéticos, la bioenergía es la única que puede sustituir las emisiones de los combustibles fósiles y contribuir de manera efectiva a la descarbonización del sector energético si su producción genera menos CO₂ (Arvizu *et al.*, 2011; REN21, 2019) porque está vinculada con el ciclo biogeoquímico del carbono (Figura 1).

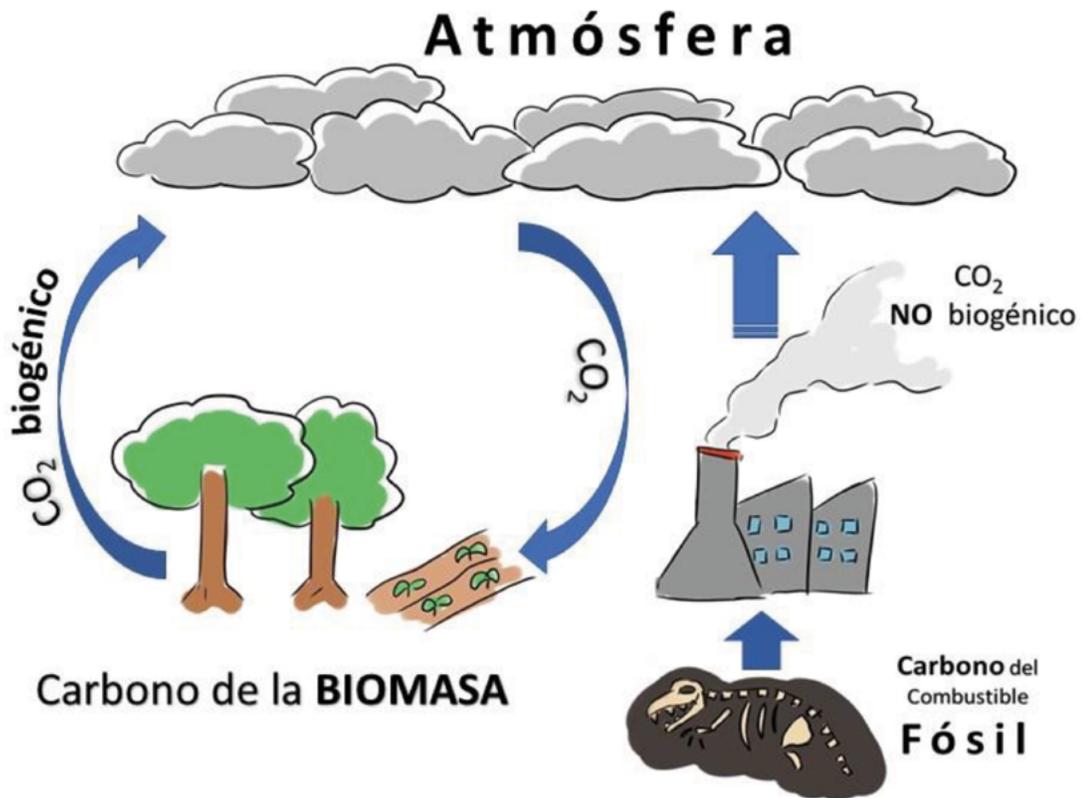


Figura 1. Ciclo del carbono proveniente de la bioenergía y emisiones de carbono derivadas del combustible fósil. Elaborado por Emilian Martínez, modificado de NCASI (2010).

Los biocombustibles pueden jugar un papel muy relevante en la estrategia de mitigación de emisiones de CO₂ sobre todo aquellos provenientes del sector forestal. Por citar una cifra, la FAO en su informe 2018 confirma que los bosques del mundo actúan como sumideros de carbono, con una captura cercana a 2000 GtC por año. En este sentido, la bioenergía proveniente del manejo forestal sustentable promueve las emisiones evitadas, reduce la deforestación y la degradación forestal (Masera, 2006; Johnson *et al.*, 2009). Aunque la participación de la bioenergía en la matriz energética global es aún incipiente; el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, por su siglas en inglés) coincide en que los diferentes biocombustibles tienen un escenario prometedor en el sector energético para mitigar las emisiones de CO₂ en el mediano plazo (Chum *et al.*, 2011).

A nivel global, el Renewables Global Status Report (REN21, 2018) indica que la biomasa contribuye de manera significativa con la demanda de energía final, provee cerca del 13% del consumo mundial de energía, del cual el 8% se ubica en el sector residencial para usos térmicos tradicionales y el otro 5% se consume en las nuevas aplicaciones de la bioenergía (Chum *et al.*, 2011). El panorama energético demuestra que uno de los sectores fuertes en el uso de bioenergía es el residencial (Masera, 2006); aunque tienen una menor participación en la demanda final de la energía en las áreas urbanas, donde proporcionan el 4% de la demanda de calor en la industria, el 2% de la producción de electricidad y el 3% de la energía en el transporte (Zamarripa, 2011; SENER, 2014; Ayala-Medivil y Sandoval, 2018).

El uso de la bioenergía enfrenta un doble desafío para la mitigación del CO₂. Por el lado ambiental, se debe mostrar que es una opción real de reducción de emisiones de carbono, sostenible y por debajo de las que provienen de energéticos fósiles y, por el lado económico, se debe probar que es capaz de reemplazar a la energía derivada del petróleo, con precios

competitivos. Aunado a lo anterior, no se debe perder de vista que la tecnología de transformación para aprovechar eficientemente la bioenergía juega un papel determinante y debe ser específica para cada uso final de la bioenergía.

El propósito de este trabajo es presentar, con la información disponible hasta el momento, una síntesis del panorama actual de los bioenergéticos en México. El documento analiza con cierto detalle la pertinencia de la bioenergía, en términos de: la mitigación de dióxido de carbono, de la urgencia de aumentar su oferta dentro de las energías renovables y, de la carencia de un esquema de políticas públicas que promuevan su uso, desarrollo y competitividad en el mercado nacional.

BIOENERGÍA Y BIOCMBUSTIBLES

La bioenergía está representada por diferentes tipos de biocombustibles, estos son sólidos, líquidos y gaseosos. Las fuentes de biomasa para producirlos son muy diversas; así también, los procesos para su producción son diferentes: los térmicos, la pirólisis, la gasificación y los procesos bioquímicos de la biomasa (Figura 2); este último con una fase de pretratamiento que involucra procesos enzimáticos (Ayala-Medivil y Sandoval, 2018).

En términos del uso sustentable de la bioenergía, varios autores enfatizan que la materia prima para producirla provenga en primer grado, de residuos de diferentes tipos, tales como: los de aprovechamientos forestales, de aserrío, agrícolas, pecuarios y de sólidos urbanos y, en segundo lugar, aquella que se obtenga de plantaciones y cultivos dedicados *ex profeso* (Cherubini *et al.*, 2009; McKechnie *et al.*, 2011; Rieglhaupt, 2016). Adicionalmente, al reciclar los residuos biomásicos se evita su descomposición y dejan de ser emisores directos de CH₄ y NO_x, gases que contribuyen al calentamiento global (Figura 2).

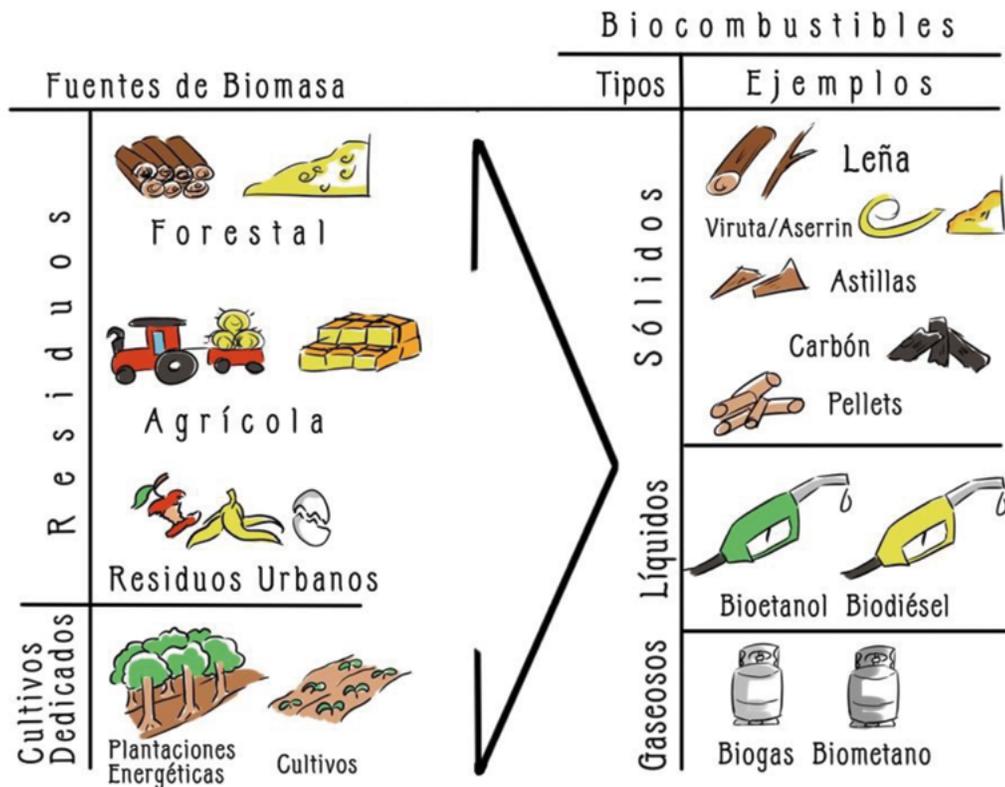


Figura 2. Fuentes de biomasa para la producción de biocombustibles. Elaborado por Emilian Martínez.

Los residuos de biomasa forestal al ser productos secundarios en la industria se clasifican como subproductos, esta condición permite vincular la producción de energía con las fuentes primarias de biomasa en bosques, selvas y plantaciones o cultivos para energía (Riegelhaupt, 2016; Ayala-Mendivil y Sandoval, 2018). De la discusión anterior se desprende que son los residuos de la industria forestal los que tienen el mayor potencial de aplicación como biocombustibles, en el corto y mediano plazo, para sustituir las tareas térmicas que realizan los derivados del petróleo. Asimismo, será posible sumar los residuos agroindustriales y de cultivos para producción de biocombustibles, una vez que se superen algunas barreras sociales y de política pública (Masera, 2006; REMBIO, 2011).

La lista de biocombustibles sólidos (BCS) incluye la leña de monte y la leña industrial (los residuos de madera como las astillas y derivados del aserrío de la madera), conocidos como tradicionales. Por otro lado, están los pellets y briquetas, que son resultado del procesamiento mecánico de residuos agrícolas, del manejo forestal, de la industria de aserrío y de algunos residuos urbanos; y finalmente está el carbón vegetal, el cual es producto de la pirólisis de la madera (Tauro *et al.*, 2018a).

Los biocombustibles líquidos (BCL) se refieren al etanol, al biodiesel y la bioturbosina; se producen por medio de procesos bioquímicos y transformaciones catalíticas de residuos agrícolas, cultivos de oleaginosas, grasas animales, residuos celulósicos, entre otros (Alemán-Nava *et al.*, 2015; Ayala-Mendivil y Sandoval, 2018). Debido al grado de procesamiento que requiere su producción, se clasifican como *biocombustibles avanzados o de segunda generación* (REMBIO, 2011).

El tercer grupo de bioenergéticos lo conforman los biocombustibles gaseosos (BCG), cuya síntesis involucra complejos procesos bioquímicos o termoquímicos, que dan como resultado la producción de biogás y biometano, principalmente; se incluye también la obtención de gas de síntesis. Con base en el proceso de transformación, se pueden definir *biocombustibles de primera, segunda y tercera generación* (García-Bustamante y Masera, 2016).

La Red Mexicana de Bioenergía (REMBIO, 2011), precisa que la bioenergía tiene las siguientes prerrogativas: a) es almacenable en la biomasa, con lo que supera la barrera de la intermitencia de otras fuentes renovables de energía, b) satisface la mayor parte de los usos finales, como renovable puede sustituir a la

mayoría de los combustibles fósiles en casi todas las aplicaciones y finalidades; c) es escalable, debido a la diversidad de fuentes y equipos, puede satisfacer bajas y altas potencias, acorde con la escala de necesidad.

BIOCOMBUSTIBLES EN MÉXICO

En México, aun es poca la participación de la biomasa en la matriz energética. Dentro del grupo de las energías renovables, los biocombustibles apenas aportaron del 3.3% al 5.7% en el periodo del 2007 al 2018 (SENER, 2009; 2019); siendo la leña para usos tradicionales la que representa el mayor porcentaje por encima del bagazo de caña utilizado para la cogeneración. De acuerdo con el gran potencial que tiene para su desarrollo (REMBIO, 2011), es importante que la política nacional, de un impulso a la Ley para el Aprovechamiento de las Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética (DOF, 2008).

Con base en la disponibilidad de biomasa, la fuente con mayor potencial a nivel nacional son los aprovechamientos forestales y de la industria de la madera (Riegelhaupt, 2016; Tauro, 2018) Debido a la cantidad de información disponible y el nivel de participación de los BCS como energéticos a

nivel nacional, este trabajo se centra en este tipo de bioenergéticos, sin dejar de atender el panorama general de los BCL y BCG.

La CONAFOR (2019) estima la superficie forestal de México en 64.2 millones de hectáreas, lo que equivale al 46.6% del territorio nacional (Figura 3). El potencial de generación de energía a partir de la biomasa de bosques y selvas naturales en el país se estima entre 1135 y 1923 PJ año⁻¹ (REMBIO, 2011; García *et al.*, 2016;), con un promedio de 1515 PJ año⁻¹ de energía térmica (García *et al.*, 2013). Con ella, se podría reemplazar parcialmente a los energéticos fósiles y sustituir sus emisiones de CO₂ por emisiones biogénicas.

Johnson *et al.* (2009) señalan que la producción de calor y electricidad a partir de BCS podría alcanzar una mitigación de 25 Mt CO₂ año⁻¹. Los valores dejan ver el alto potencial de mitigación que puede lograrse mediante la aplicación criterios de sustentabilidad al manejo forestal con implicaciones en el ciclo del carbono forestal. Respecto a los BCS también hay prioridades de investigación, y desarrollo como son la necesidad de analizar, en forma integral y comparada, los potenciales de producción sostenible, de mitigación de emisiones de GEI, de innovación tecnológica, de generación de empleos y del valor económico (Arias, 2018).

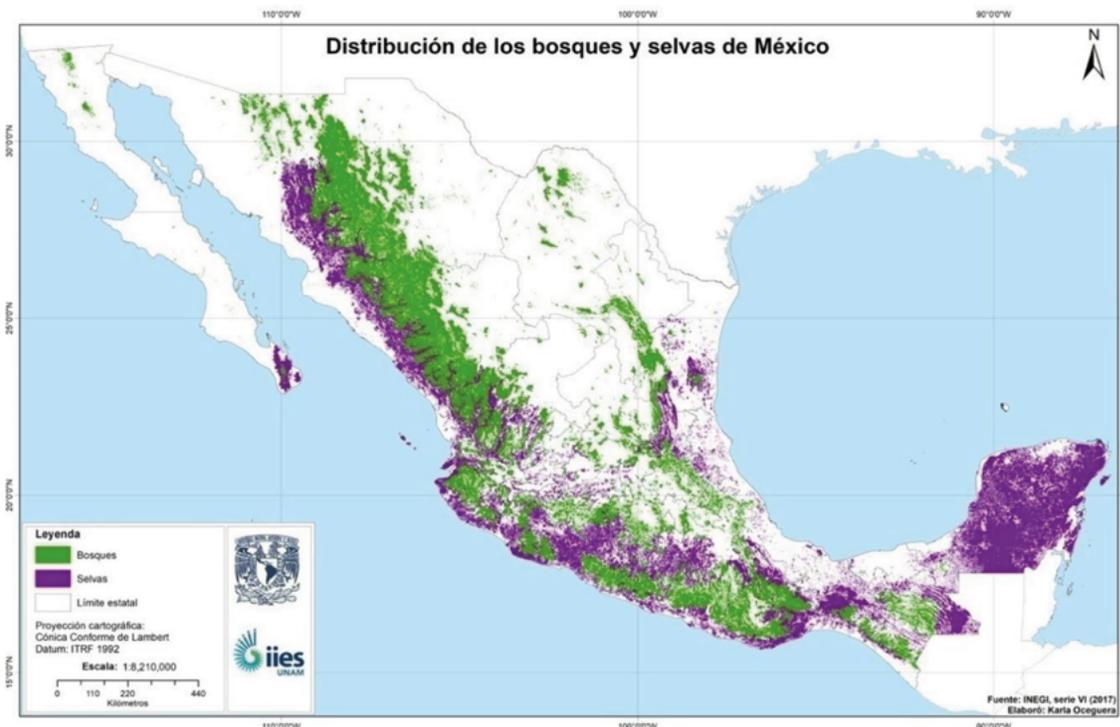


Figura 3. Distribución de bosques y selvas en el territorio nacional. Fuente: Elaboración propia con datos de INEGI

En el contexto de la investigación sobre los biocombustibles, el CONACYT y la SENER en 2016 impulsaron la creación de fondos de investigación para formar el Centro Mexicano de Innovación en Energía CEMIE-BIO, conformado por clústeres de biocombustibles sólidos, gaseosos y líquidos, cuyo objetivo común consiste en ser elementos importantes en la transición energética de México y descarbonizar la economía del sector. Como proyecto antecedente al CEMIE-Bio, en 2013 el proyecto “Estudio de viabilidad, barreras e impactos de aprovechamiento de residuos forestales para energía renovable” ENEFOR evaluó la disponibilidad de residuos de la industria forestal

y planteó la posibilidad de fabricar biocombustibles o transportadores energéticos Forestales (TEF) a nivel de empresa, demostrando que es factible producir y comercializar TEF a nivel nacional porque hay residuos forestales suficientes (CONACYT-SENER, 2016). Sobre los impactos ambientales, energéticos y sociales de los TEF para México, resalta la alta capacidad de los biocombustibles para producir energía renovable con pocos insumos fósiles. También, los bajos valores de emisiones de GEI en el ciclo de vida de los TEF confirman que pueden sustituir a los combustibles fósiles (Figura 4).

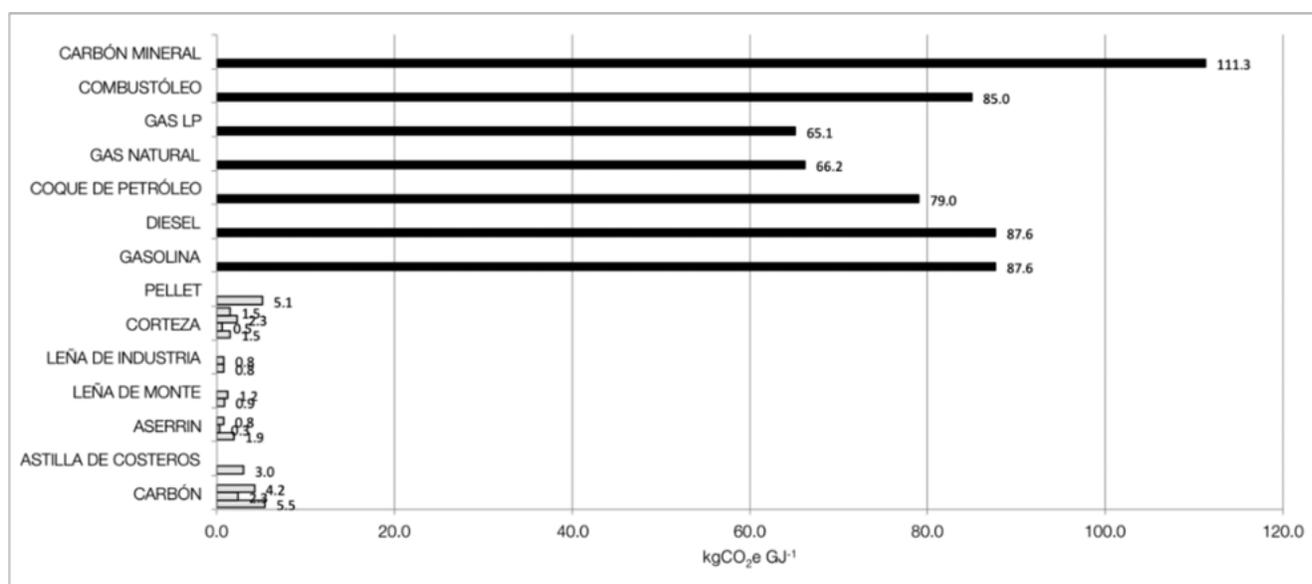


Figura 4. Emisiones de gases de efecto invernadero de los TEF y de combustibles fósiles (en kgCO₂e GJ⁻¹). Fuente: para los TEF, datos propios y, para los combustibles fósiles, de la Comisión Europea (2015) y el INECC (2014).

Biocombustibles sólidos

Leña

La leña y carbón vegetal son los principales BCS provenientes del sector forestal. Su aplicación es térmica para generar calor, principalmente, de uso doméstico y en la pequeña industria. Serrano-Medrano *et al.* (2014) estiman que aproximadamente 22.5 millones de personas localizadas en zonas rurales y periurbanas utilizan la leña como fuente de energía para cocinar, lo que representa una demanda anual de 72 Kt año⁻¹ de biomasa (Figura 5). La leña representa más del 50% de la biomasa utilizada como bioenergía y las cifras de consumo superan tres veces el volumen autorizado en los aprovechamientos forestales (Masera *et al.*, 2015; Riegelhaupt, 2016); es decir, el sector residencial es

el consumidor más importante de este biocombustible (Serrano-Medrano *et al.*, 2018).

En una vivienda promedio, la mayor parte de la leña se quema en un fogón abierto o de tres piedras (FTP) (IEA, 2017), lo que resulta en emisiones de diversos contaminantes asociados a la combustión incompleta, particularmente carbono negro (CN), metano (CH₄), monóxido de carbono (CO), entre otros. Esta forma tradicional de uso de los fogones, además de ineficiente, causa importantes problemas ambientales, de salud y socioeconómicos (Masera *et al.*, 2015). Una medida de mitigación que soluciona todos los problemas citados es la adopción de estufas de leña con cámara de combustión cerrada y chimenea para alejar los humos del contacto humano (Berrueta *et al.*, 2008; Díaz *et al.*, 2011).

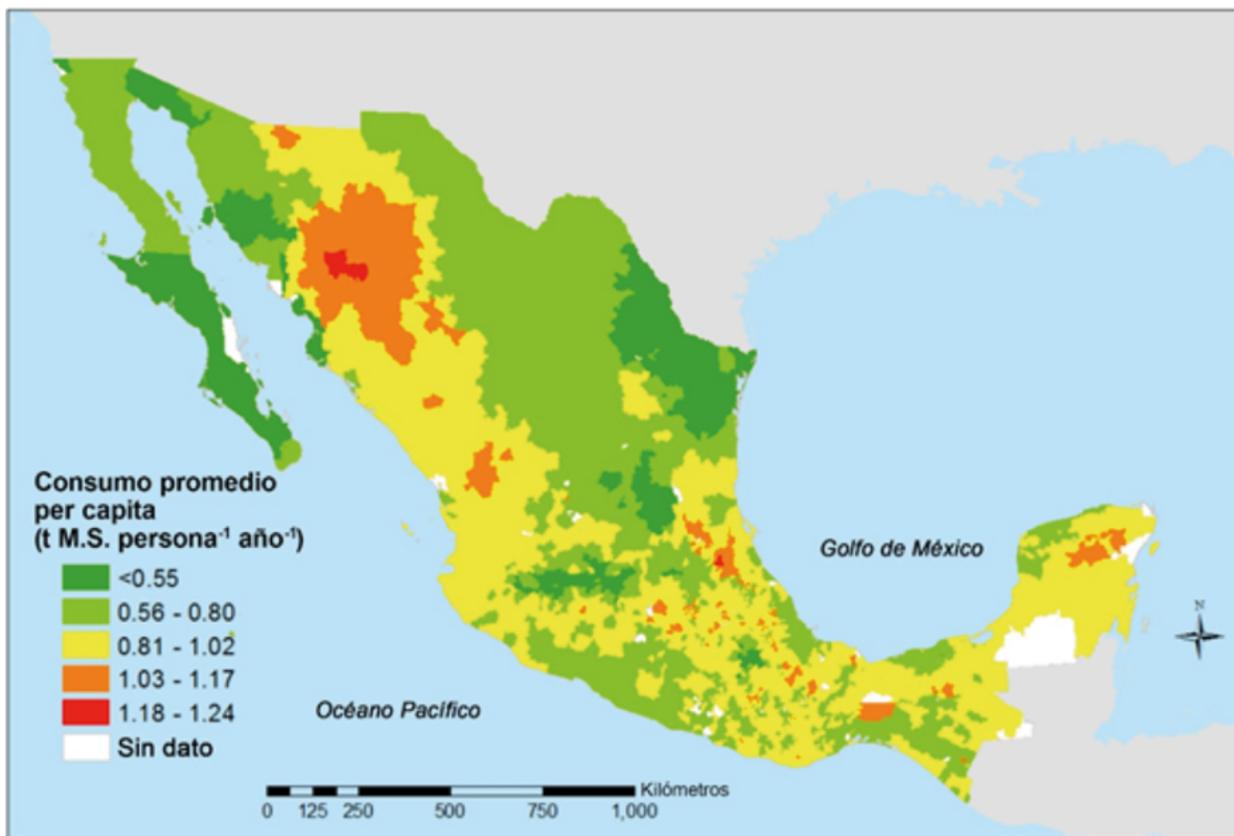


Figura 5. Distribución del consumo de leña *per cápita* a nivel nacional. Fuente: Serrano-Medrano *et al.* (2014).

Dispositivos para el aprovechamiento de leña. La mitigación efectiva de CO₂ que la leña provee, requiere de escenarios en los cuales la tecnología o el reemplazo del combustible fósil demuestren emisiones totales menores a las que genera el combustible fósil con el que se compara (García-Bustamante y Masera, 2016). En el caso de la tecnología las estufas de leña deben sustituir al FTP. Por otro lado, algunos autores señalan que las emisiones de carbono provenientes del uso de la leña se consideran neutras cuando el volumen que se cosecha es menor o igual al crecimiento anual del bosque de donde proviene la biomasa, lo que se conoce como el factor de No renovabilidad de la biomasa (fNRB) (Masera *et al.*, 2006; Ghilardi *et al.*, 2007; Jonhson *et al.*, 2009).

Serrano-Medrano *et al.* (2018) muestran los resultados del papel de la leña en un escenario de mitigación de GEI entre los años 2014-2030 donde la combinación de las estufas de leña, el fNRB y el uso de gas LP, permite alcanzar un ahorro entre 60 y 111.6 Mt M.S. de leña, lo que equivale a una mitigación acumulada de 50.4 a 126.3 Mt CO_{2e}, dependiendo de la combinación de las tecnologías (Figura 6).

Del resultado total de mitigación, destaca que el CO₂ representa entre el 49% y el 57% del total, mientras que el restante es aporte de otros gases (CO, CH₄ y CN). El porcentaje muestra que la tecnología que se utiliza como reemplazo del fogón (FTP) mejora la combustión de la leña. Se constata que, las ganancias en la mitigación de GEI, se dan una vez que el biocombustible se une a la estrategia de adopción de estufas de leña. Sin embargo, el escenario puede disminuir hasta 60% en el mejor de los casos, debido a la penetración del gas LP en los hogares a nivel nacional y como un sustituto de FTP (Serrano-Medrano *et al.*, 2018).

Respecto a la importancia de la gestión de la leña, los escenarios estiman que la demanda tendrá poca variación al menos hasta el 2030. Por lo tanto, las necesidades de investigación y desarrollo (I+D) deben enfocarse en: a) mejorar el diseño de los dispositivos por parte de los institutos de investigación y universidades, b) certificación de fogones bajo la norma mexicana NMX-Q-001-NORMEX 2017 y, c) mejoramiento de las estufas de leña con esquemas múltiples.

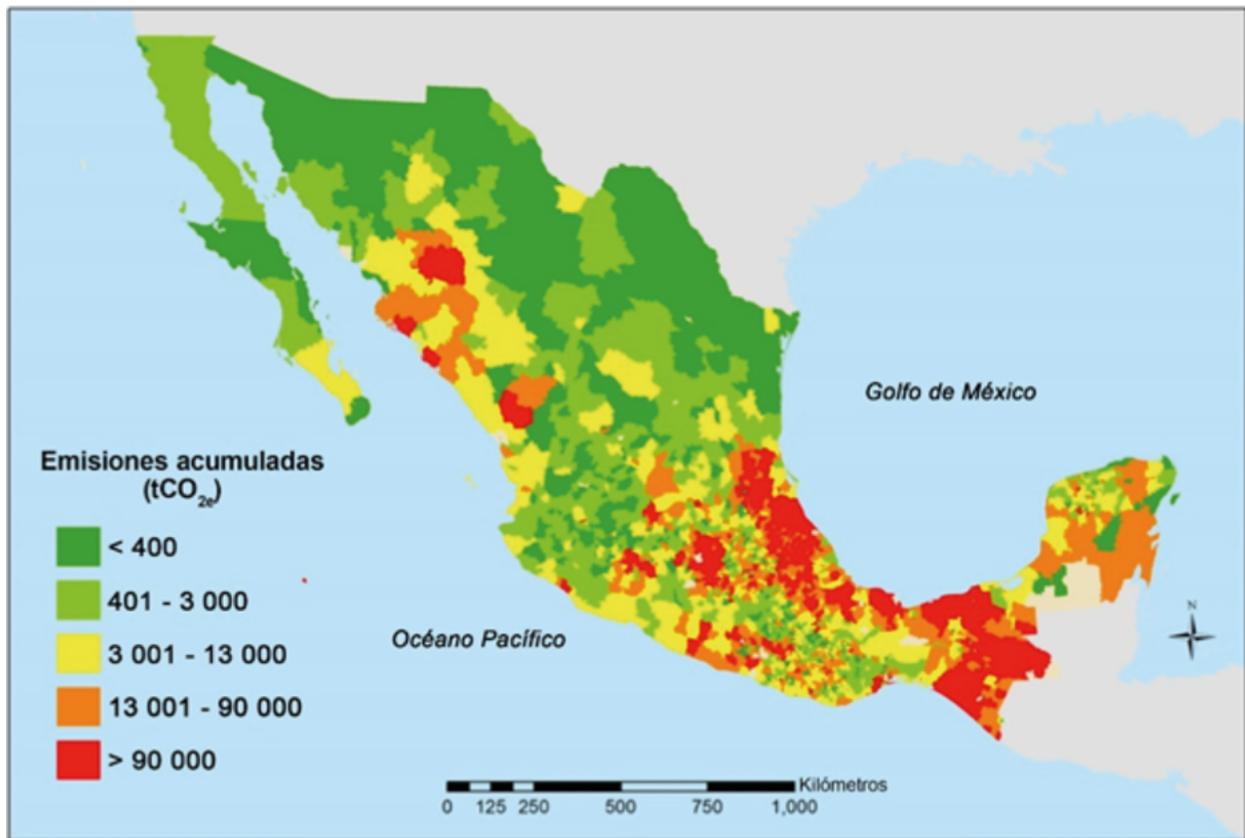


Figura 6. Distribución espacial de la mitigación de GEI acumulados por el uso de leña en el sector residencial; escenario al 2030. Fuente: Serrano-Medrano *et al.* (2018).

Astillas y aserrín

Dentro de los BCS, la producción actual de astillas y aserrín se lleva a cabo en los aserraderos y durante los aprovechamientos forestales. Se disponen como coproductos de la industria forestal y se comercializan por empresas especializadas. Los volúmenes de producción de aserrín a nivel nacional aún no han sido determinados. Sin embargo, existe una demanda industrial de astilla para usos diferentes a los energéticos, de la cual se tiene un potencial de 760 mil toneladas anuales (Riegelhaupt, 2016). Por lo tanto, la demanda como TEF puede aumentar como política corporativa *verde* en la industria: tequilera, de destilados, azucarera y tabacalera, favoreciendo la sustitución parcial del diésel, gas LP y combustóleo, y disminuyendo las emisiones de CO₂ fósil (García *et al.*, 2016; Arias, 2018; Tauro, 2018).

Residuos agrícolas

México cuenta con un potencial de uso de residuos agrícolas para producir biocombustibles procesados, especialmente en las regiones donde los esquilmos

de cosecha son quemados por no cumplir con características de uso forrajero (Valdez-Vazquez *et al.*, 2010). Actualmente, el uso más común de los residuos agrícolas es forrajero; sin embargo, el sector energético ha comenzado a reconocer su potencial como fuente de materia prima para producir BCS densificados como pellets y briquetas, bioetanol y también Biogás (BG) (Alemán-Nava *et al.*, 2015). El reuso de los residuos como bioenergéticos cumple varios propósitos: 1) reducir las emisiones de GEI por la quema a cielo abierto, 2) sustituir tareas térmicas de los combustibles fósiles y, 3) aprovecharlos como alternativa de energía térmica en la industria.

En la actualidad existen pocas aproximaciones sobre el potencial de uso de los residuos agrícolas para el aprovechamiento energético. Valdez-Vazquez *et al.* (2010) señalan que en 2006 se produjeron 75.73 Mt M.S. (materia seca) de residuos provenientes de 20 cultivos en México. Este estudio considera que el 50% de ellos podría utilizarse con propósitos energéticos, para producir entre 100 y 127 PJ año⁻¹ (Cuadro 1).

Cuadro 1. Potencial energético de los residuos agrícolas y agroindustriales.

Cultivo	Tipo de Residuo	Generación de Residuos (Mt M.S. año ⁻¹)	Potencial mínimo (PJ año ⁻¹)	Potencial máximo (PJ año ⁻¹)
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 - 6.0	32	45
Total de Residuos Agrícolas (BCS)		24.8 - 60.1	372	470
Caña de azúcar	Bagazo	3 - 7.6	45	57
Maíz	Olole	2.8 - 6.6	42	50
Magüey	Bagazo	0.6 - 1.5	8	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	100.5	127
Cultivo		Tierras marginales disponibles (Mha)		
Caña de azúcar	Jugo	2.9	226	338
Sorgo	Grano	2.9	2.6	84
Total (BCL-etanol)		5.8	228.6	422
Jatrofa	Grano	3.2	66	36
Palma de aceite	Fruto	1.8		120
Total (BCL-biodiesel)		5.0	66	156
Recurso				
Residuos municipales			35	305
Residuos ganaderos			148	190
Total (BCG-biogás)			183	495

Fuente: Valdez-Vazquez *et al.* (2010).

Además de los residuos de cultivos, existe en México una disponibilidad regionalizada de residuos agroindustriales como el bagazo de caña y agave, olotes, cascarilla de arroz y trigo, cáscaras de café, cacahuete y de cítricos, entre otros. Por su parte, la mayor producción de paja de sorgo se localiza en Guanajuato, Sinaloa y Tamaulipas (Valdez-Vazquez *et al.*, 2010; Reyes-Muro *et al.*, 2013).

Los residuos agrícolas y agroindustriales podrían sustituir de 57.82 a 140.36 Mt CO_{2e} año⁻¹, si el carbono contenido en la biomasa se convirtiera totalmente a bióxido de carbono. Sin embargo, la emisión final de CO₂ depende, en gran medida, de las características intrínsecas de la biomasa y de la tecnología de transformación. Además, la emisión puede ser cero si se aplican criterios de sustentabilidad en la producción de los cultivos, lo que favorece su incorporación para satisfacer la demanda futura de energía como lo establece el escenario de IRENA (2015), que estima una demanda de energía de los biocombustibles para el 2030 de 810 PJ para sustituir el 32% de combustibles en el sector transporte, el 28% en el sector comercial, el 15% en la generación de energía eléctrica y el 25% en la industria.

El aprovechamiento de los rastrojos y otros residuos de biomasa como una fuente de bioenergía muestra cierta inseguridad por parte de los usuarios respecto a su adopción o al cambio tecnológico. La disponibilidad de la materia prima es una de las principales barreras a superar, derivado de ello, la productividad es una pieza clave para generar confianza. Los costos de adquisición, las reglas de mercado, gestión y la logística de transporte y accesibilidad deben estar sujetos a una normatividad (Arias, 2018). En el rubro del aprovechamiento de los residuos municipales y ganaderos, la principal barrera es de índole sociopolítica, por lo que a pesar del alto potencial energético y que la mitigación de GEI es una medida necesaria, no se pueden plantear alternativas sin resolver todos los puntos previos.

Respecto a las prioridades I+D+T para la producción de bioenergía a partir de los residuos agrícolas, se requiere: a) la generación de análisis espaciales del potencial técnico de producción de biocombustibles y la proyección de escenarios de disponibilidad la materia prima; b) la elaboración de estrategias para hacer competitivos los precios respecto a los combustibles de petróleo, así como marcos de apoyo y subsidio para el cambio tecnológico y, c) mayor investigación en la innovación tecnológica para mejorar la eficiencia de transformación y aprovechamiento de la energía en

los dispositivos de uso final que usan biocombustibles avanzados hechos con residuos agrícolas.

Pellets

Los pellets son biocombustibles procesados (densificados de biomasa) y clasificados como BCS. Se elaboran principalmente a partir de los residuos biomásicos forestales y agrícolas (Tauro, 2018). Al ser producidos con residuos, los pellets ayudan a resolver problemas ambientales, principalmente de la agroindustria, donde por ejemplo en 2006 se produjeron 75.73 Mton de materia seca de rastrojos (Valdez-Vazquez *et al.*, 2010). El mercado de pellets en México es incipiente, pero se espera su comercialización sea en el corto plazo porque son una alternativa energética con aplicaciones en la industria y en la generación de energía eléctrica (Tauro *et al.*, 2018).

El tema de los pellets requiere ser abordado con información internacional. La estimación de emisiones de GEI es un tema relevante a nivel global, y es impulsado internacionalmente mediante esquemas de apoyos económicos y políticas públicas del Estado. Los resultados demuestran que la producción de 1 MJ de energía térmica por medio de pellets de madera implica la emisión de 13.1 g CO_{2e}, incluyendo en los cálculos su transporte en barco (que genera más del 40% de las emisiones) (Sjølie y Solberg, 2011). La emisión puede rebasar los 20 g CO_{2e} MJ⁻¹, dependiendo del tipo de materia prima utilizada y de las condiciones de humedad y tamaño de partícula. Estas emisiones son casi despreciables, si se comparan con las emisiones de los combustibles fósiles, que son entre 6 (gas natural) y 20 (carbón mineral) veces mayores.

El potencial de mitigación de los pellets de manera teórica requiere de un combustible al cual reemplazar, en el caso de México los pellets de aserrín son competitivos con los precios actuales del combustóleo y su potencial de mercado, calculado en 10 PJ año⁻¹, pudiendo cubrir el 64% de la demanda actual. Dentro del sector eléctrico, los pellets tienen el mayor potencial de mitigación, con un máximo del 18% de las 127 Mt CO_{2e} emitidas en la actualidad (Molina Center for Strategy Studies in Energy and Environment, 2013).

Dado el elevado precio actual del gas LP, este podría suplirse por cualquier tipo de pellet, sustituyendo el 73% de todo el gas LP utilizado en los sectores comercial y residencial. Bajo estas premisas, el escenario de mitigación de los pellets cambiaría, lo que representa un gran potencial en estos sectores.

A pesar de que actualmente no es económico

reemplazar algunos combustibles fósiles por pellets, es importante incluir el potencial de mitigación en la planeación. De acuerdo con Arias (2018), los pellets tienen algunas barreras de índole diversa, que se deben superar por el hecho de ser un producto de reciente ingreso al mercado nacional: carece de una demanda residencial e industrial; depende de equipos novedosos para su producción y uso; hay pocas empresas centradas en su producción; el precio de venta sólo le permite competir con hidrocarburos baratos. Respecto a la investigación, desarrollo y tecnología (I+D+T) aún se requiere de investigación para innovar en el diseño y fabricación de los dispositivos.

Si se aplican incentivos, tales como impuestos sobre el carbono y se superan los vacíos normativos, fiscales y de certificación de calidad, los pellets podrían sustituir a todos los combustibles fósiles que se utilizan en el sector industrial, siempre y cuando se alcance la máxima producción de pellets calculada en 233 PJ año⁻¹ (Tauro, 2018).

Escenario MEDEC

Como ya se mencionó, la situación actual de la mitigación de gases de efecto invernadero (GEI) a través del uso de biocombustibles se apuntala fuertemente en los BCS. A partir de los estudios entorno a la leña se abrió el panorama de investigación sobre otros biocombustibles. El estudio base para estimar la mitigación de los GEI provenientes de los biocombustibles es el denominado *escenarios MEDEC* (México: Estudio sobre la Disminución de Emisiones de Carbono). Este proyecto diseñó un escenario de reducción de emisiones de GEI, de 2010 a 2030 en los que incluyó a los sectores con mayores emisiones de CO₂ a nivel nacional. En materia de bioenergía, se enfocaron los biocombustibles sólidos y líquidos, mismos que están incluidos en los sectores agrícola y forestal. El resultado de la mitigación por el uso de biocombustibles se estimó en 84.4 Mt CO₂e año⁻¹ (Johnson *et al.*, 2009).

Biocombustibles líquidos

El conjunto de los biocombustibles líquidos y gaseosos (avanzados) han tenido poca penetración en el país. Actualmente y, pese a los impactos negativos, a nivel mundial existe una dependencia energética muy marcada hacia los hidrocarburos. En México, por ejemplo, cerca del 90% de la energía total consumida y casi el 100% de la energía para el sector transporte

proviene de los hidrocarburos (2485 PJ) (SENER, 2017). La producción BCL ha sufrido diversos tropiezos, por lo que aún se encuentra en fase I+D en los institutos y centros de investigación nacionales.

De acuerdo con Sandoval (2010), en México, hasta el año 2012, el consumo de bioetanol no supera los 0.3 miles de barriles por día, mientras que para el biodiesel y la bioturbosina, no hay cifras oficiales. Aunque en México es aún incipiente y actualmente no existe producción industrial de bioetanol, de biodiesel y de bioturbosina, hay una estrategia nacional para incorporar estos bioenergéticos al sector productivo.

Anteriormente, se mencionó que el CEMIE-BIO incluye los clústeres de bioetanol, biodiesel avanzado y de bioturbosina en los que se espera que los frutos de las investigaciones marquen la ruta para transitar a la implementación de programas de producción y comercialización de estos biocombustibles principalmente en el sector transporte, conforme a los lineamientos para las especificaciones de calidad y características de los BCL (DOF, 2018). Con ello, se espera que el transporte deje de ser uno de los más importantes emisores nacionales de GEI y transite hacia escenarios de mitigación del cambio climático global.

En muchos países de Europa, así como en Brasil y EUA, los biocombustibles líquidos avanzados son una fuente de energía desde hace más de 30 años. Estos países han superado diversas barreras como la controversia de la competencia con la producción de alimentos, la disponibilidad de los lignocelulósicos y de los criterios de sustentabilidad aplicables a la producción de carburantes como el etanol (Sandoval, 2010).

Respecto a la producción de biodiesel en México, varios estados del país participaron en proyectos de producción con semillas de jatrofa (*Jatropha spp.*) y de higuera (*Ricinus communis*), el cual no tuvo los resultados esperados por problemas en la fase agronómica principalmente. En el sureste del país se introdujo la palma de aceite, la cual, aunque con producción limitada, es el proyecto que continúa con el objetivo de producir biodiesel.

El estudio prospectivo sobre el potencial de producción de microalgas en México de Lozano-García *et al.* (2019), muestran que un poco más del 26% del territorio nacional tiene condiciones propicias para esta actividad, con un potencial de producción cercano a 9 millones de toneladas anuales de biomasa seca, lo que representaría una mitigación de 16.2 MtCO₂ año⁻¹ (Chisti, 2007). Como estrategia biológica de

captura de CO₂, el cultivo de microalgas es una opción debido a que las tasas de crecimiento son mayores que las plantas terrestres al absorber entre 10 y 50 veces más carbono (Costa *et al.*, 2000; Tredici, 2010).

Ante el panorama actual de producción, la única información respecto al biodiesel es la internacional. Mendes-Souza *et al.* (2015), señalan que hasta 2011, se habían cultivado 11.2 Mha con oleaginosas para producir biodiesel en varias partes del mundo, de las cuales se espera obtener aproximadamente 1300 L/ha. También se está investigando la producción de biodiesel a partir de algas marinas. A este respecto, la I+D+T utiliza un esquema de bioenergía con captura y almacenamiento de carbono (BECCS, por sus siglas en inglés). Los resultados reportados hasta ahora se plantean a nivel de biorreactores, los cuales pueden ser instalados en diversos lugares. Sin embargo, la producción de biodiesel aún presenta grandes retos como es mejorar el balance de energía, porque actualmente este sistema consume mayor cantidad de energía que la que produce, por el lado económico, es más barato cultivar microalgas para el consumo humano que para producir biodiesel (Petkov *et al.*, 2011). Aunado a los costos de producción de los BCL, se deben añadir mayores estudios acerca de la logística de producción y la eficiencia de uso final, para poder estimar el potencial de mitigación que pueden proporcionar.

Biogás

El metano e hidrógeno biogénicos son los gases que sobresalen en la producción de biogás. Las fuentes de biomasa son: residuos orgánicos, sedimentos y estiércol. Su producción se realiza en un reactor anaerobio donde se produce biogás como primer producto y este se puede refinar para producir biometano. En el ámbito internacional, Buitrón *et al.* (2016) determinaron que la tecnología para la obtención de biogás es madura para el caso del biometano, mientras que la del biohidrógeno continúa en el estatus de I+D+T. Por su parte, Eaton (2010) describe a México como uno de los países líderes en la producción de biogás a partir de la digestión anaerobia durante el periodo de 2002 a 2005; sin embargo, acota que su crecimiento se detuvo y la producción se frenó, a causa de problemas técnicos y de mercado. No obstante, se mantiene el potencial de producción de metano biogénico proveniente principalmente de residuos agrícolas, estimado entre 5 y 7 MtCO₂e.

Es necesario superar algunas de las barreras que limitan la producción de biogás entre ellas destaca: la carencia de un inventario espacialmente explícito sobre la producción de desechos; la insuficiencia de estudios de factibilidad económica para la implementación de centrales productoras de biogás; la incipiente difusión social sobre las ventajas de la producción de biogás; la ausencia de un portafolio y plan de incentivos económicos que fomenten la inversión en la producción de biogás; la falta de redes de distribución y abasto a escala local y regional; el desacoplamiento de tecnologías para el uso combinado de gas, así como los altos costos de producción.

DISCUSIÓN

La bioenergía es una alternativa renovable y sostenible, con gran potencial para aumentar su participación en la matriz energética de México, y con ello, mostrar su efecto real sobre la mitigación de CO₂ y otros GEI. Sin embargo, hasta la fecha no hay un inventario completo que incluya a todos los biocombustibles con sus respectivos potenciales.

La mitigación de CO₂ que pueden ofrecer los biocombustibles depende de los siguientes factores; de las características de la biomasa que conforma al bioenergético, del manejo sustentable de la materia prima, del combustible fósil con el que se le compara, pero sobre todo depende de la eficiencia de la tecnología de transformación, porque si no es la apropiada, la bioenergía puede dejar de ser la mejor alternativa energética, tal como lo señalan Masera *et al.* (2012).

Los biocombustibles sólidos, a excepción de los pellets, son los que cuentan con más información acerca de la madurez teórica, de las tecnologías de conversión, de aceptación social y de mercado, con respecto a los otros tipos de bioenergéticos. Por lo tanto, son estos biocombustibles los que cuentan con los valores de mitigación de CO₂ más reales.

Los biocombustibles líquidos y gaseosos aún deben superar una serie de barreras de investigación y de desarrollo tecnológico, además de sociopolíticas para posicionarse como alternativas de oferta viables en el mercado energético mexicano. Para ello serán determinantes los resultados de los clústeres del CEMIE-BIO.

Los resultados de cada tipo de biocombustibles muestran diferentes potenciales de mitigación de CO₂, mismos que responden al grado de madurez y de interés científico en ellos. Los resultados deberán

servir para facilitar las condiciones nacionales de aplicación y proveer de herramientas al sector energía en el tránsito para operar con bajas emisiones de carbono en el mediano y largo plazo. El cumplimiento de este mandato abre un nicho de oportunidad para la bioenergía, alineando su desempeño al Acuerdo de París que precisa la descarbonización de la economía de todos los sectores productivos para el 2050.

En el contexto de la política ambiental, para lograr una verdadera transición energética es necesario diseñar políticas públicas más agresivas y ambiciosas en las que la mitigación de GEI se refuerce a partir del desarrollo de un marco regulatorio que fomente el uso sustentable de la bioenergía (Islas *et al.*, 2007; García *et al.*, 2016).

CONCLUSIONES

Los resultados de los estudios sobre bioenergía muestran que los mayores avances están en los biocombustibles sólidos, los otros energéticos (líquidos y gaseosos) presentan adelantos importantes, pero todavía carecen de información de campo contextualizada para México.

La leña es un biocombustible sólido que se ha mantenido como fuente de energía térmica y los escenarios muestran que en el futuro seguirá vigente, por lo tanto, es necesario acompañarla de tecnología moderna para favorecer su consumo de manera eficiente.

Los sectores transporte, industrial y generación de energía, de acuerdo a los reportes de emisiones de GEI, son los que más emisiones originan, sin embargo, los biocombustibles adecuados para ellos son los menos maduros tecnológicamente, por lo que la descarbonización de sus procesos en el corto plazo no podrá realizarse, hasta que se superen las barreras de índole técnico-económicas para la producción de biocombustibles avanzados como son los líquidos.

En síntesis, los distintos estudios muestran que los bioenergéticos pueden ser una opción efectiva de mitigación de GEI, solo que para obtener grandes impactos es indispensable un escenario político favorable en el que las diferentes leyes como la de la transición energética y la del fomento del uso de los biocombustibles, generen instrumentos de política favorables a los biocombustibles y que estos estén acoplados a un fuerte apoyo económico gubernamental para hacer competitivas todas las opciones bioenergéticas.

RECOMENDACIONES

Es prudente insistir en, sin reparar en los detalles, que cualquier estrategia de política pública próxima a desarrollarse, debe entender que la bioenergía no solo es sobresaliente por su carácter renovable y sostenible, sino porque su participación es indispensable en los futuros escenarios de desarrollo nacional. El mensaje claro, es que los biocombustibles constituyen quizá la única fuente de energía que es compatible a su vez, con el objetivo de mitigar parte de los graves impactos generados por el uso de combustibles fósiles y la urgente necesidad de preservar los ecosistemas por medio del manejo sustentable de los recursos naturales, entre otros. Consideramos que las necesidades mínimas y urgentes que cimentan la esperanza de que en el futuro inmediato la bioenergía aumente su participación en la oferta energética nacional son:

Desarrollar información confiable para fortalecer los instrumentos de política pública que faciliten la incorporación de los biocombustibles a la matriz energética nacional.

Superar las barreras sociopolíticas para ser un energético confiable.

Buscar alternativas para posicionarse en la industria como un biocombustible capaz de desplazar a los derivados del petróleo.

Fortalecer su presencia en la Ley de Energías Renovables y en la Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos, para tener mayor impulso.

Solicitar apoyo para establecer modelos de competencia con precios favorables.

Por lo tanto, la bioenergía debería ser reconsiderada y revalorada dentro del contexto socioambiental de México porque contribuye a lograr varios Objetivos de Desarrollo Sustentable como co-beneficios del servicio energético.

RECONOCIMIENTOS

Los autores agradecemos a la Dra. Yolanda Nava-Cruz por su valioso aporte editorial en la revisión del artículo y a Emilian Martínez por el trabajo de diseño de imágenes.

LITERATURA CITADA

- Alemán-Nava, G., A. Meneses-Jácome, D. Cárdenas-Chávez, R. Díaz-Chávez, N. Dallemand, N. Ornelas-Soto, R. García-Arrazola and R. Parra. 2015. Bioenergy in Mexico: Status and Perspectives. *Biofuels, Bioproducts & Biorefining* 9:8-20. DOI:10.1002/bbb.1523.
- Arias, C. T. 2018. Situación actual y escenarios para el desarrollo de biocombustibles sólidos en México hacia 2024 y 2030. REM-BIO/RTB. México.
- Arvizu, D., T. Bruckner, H. Chum, O. Edenhofer, S. Estefen, A. Faaij, M. Fishedick, G. Hansen, G. Hiriart, O. Hohmeyer, K. G. T. Hollands, J. Huckerby, S. Kadner, A. Kumar, A. Lewis, O. Lucon, P. Matschoss, L. Maurice, M. Mirza, C. Mitchell, W. Moomaw, J. Moreira, L. J. Nilsson, J. Nyboer, R. Pichs-Madruga, J. Sathaye, J. Sawin, R. Schaeffer, T. Schei, S. Schlmer, K. Seyboth, R. Sims, G. Sinden, Y. Sokona, C. von Stechow, J. Steckel, A. Verbruggen, R. Wiser, F. Yamba and T. Zwickel, 2011. Technical Summary. *In* IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation. Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, K. Seyboth, P. Matschoss, S. Kadner, T. Zwickel, P. Eickemeier, G. Hansen, S. Schlmer and C. von Stechow (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Ayala-Mendivil, N. y G. Sandoval. 2018. Bioenergía a partir de residuos forestales y de madera. *Madera y Bosques* 24(e2401877):1-14. DOI:10.21829/myb.2018.2401877 24.
- Berrueta, V., R. Edwards and O. Masera. 2008. Energy performance of wood-burning cooks stoves in Michoacan, Mexico. *Renewable Energy* 33:859-870.
- Buitrón, G., J. Camarillo, F. Alatríste y E. Razo. 2016. Biocombustibles gaseosos. pp. 55-63. En: García-Bustamante, C. y O. Masera (eds.). Estado del Arte de la Bioenergía en México. Red Temática de Bioenergía (RTB), CONACYT, Imagia comunicación. México.
- Chisti, Y. 2007. Biodiesel from microalgae. *Biotechnology Advances* 25:294-306.
- Chum, H., A. Faaij, J. Moreira, G. Berndes, P. Dhamija, H. Dong, B. Gabrielle, A. Goss-Eng, W. Lucht, M. Mapako, O. Masera Cerutti, T. McIntyre, T. Minowa and K. Pingoud. 2011: Bioenergy. *In*: Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, K. Seyboth, P. Matschoss, S. Kadner, T. Zwickel, P. Eickemeier, G. Hansen, S. Schlmer and C. von Stechow (eds). IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Comisión Europea. 2015. Harmonized greenhouse gas (GHG) emissions calculations for electricity, heat and cooling from biomass throughout the European Union (BioGraceII). <http://biograce.net/app/webroot/biograce2/>
- CONACYT-SENER. 2013. Estudio de viabilidad, barreras e impactos de aprovechamiento de residuos forestales para energía renovable. 2013-219797.
- CONAFOR. 2019. El sector forestal mexicano en cifras 2019. SEMARNAT-CONAFOR, México.
- Costa, J. A. V., G. A. Linde, D. I. P. Atala, G. M. Mibielli and R. T. Krüger. 2000. Modelling of growth conditions for cyanobacterium *Spirulina platensis* in microcosms. *World Journal of Microbiology and Biotechnology* 16:15-18.
- Cherubini, F., N. Bird, A. Cowie, G. Jungmeier, B. Schlamadinger and S. Woess-Gallasch. 2009. Energy and greenhouse gas-based LCA of biofuel and bioenergy systems: Key issues, ranges and recommendations. *Resources, Conservation and Recycling* 53(8):434-447.
- Díaz, R., V. Berrueta y O. Masera. 2011. Estufas de leña. Cuadernos Temáticos sobre Bioenergía. REMBIO A.C. México.
- DOF. 2018. Lineamientos por los que se establecen las especificaciones de calidad y características para etanol anhidro (bioetanol), biodiesel y bioturbosina puros. 22 de octubre de 2018. SEGOB. México.
- DOF. 2013. Diario Oficial de la Federación. 30 de mayo 2013. SEGOB. México, DF.
- DOF. 2008. Ley para el Aprovechamiento de las Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética. SEGOB. México, D.F.
- Eaton, A. 2010. Mexico biodigester development program sustainable agriculture, renewable energy and emissions reduction in the Lerma-Chapala watershed. International Renewable Resources Institute.
- FAO. 2018. El estado de los Bosques del Mundo 2018. Las vías forestales hacia el desarrollo sostenible. Roma. Licencia: CC BY-NC_SA 3.0 IGO.
- Ferrari, L., O. Masera y A. Staffron. 2020. Hacia una transición energética sustentable en México. Programa Nacional de Transición Energética, Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.
- Fuentes, A. y R. Martínez-Bravo. 2018. Análisis de ciclo de vida de la producción de biodiesel incorporando el cambio de uso de suelo. RTB/REMBIO. Morelos, México.
- Fuentes, A., C. García, A. Hennecke and O. Masera. 2018. Life cycle assessment of *Jatropha curcas* biodiesel production: a case study in Mexico. *Clean Technologies and Environmental Policy* 20:1721-1733.
- García, C., E. Riegelhaupt y O. Masera. 2016. Introducción. pp. 9-14. En: García-Bustamante, C. y O. Masera. Estado del Arte de la Bioenergía en México (eds.). Red Temática de Bioenergía (RTB) del Conacyt. Imagia comunicación. México.
- García-Bustamante, C y O. Masera. 2016. Estado del Arte de la Bioenergía en México. Red Temática de Bioenergía (RTB) del Conacyt. Imagia comunicación. México.
- García, C., E. Riegelhaupt y O. Masera. 2013. Escenarios de bioenergía en México: potencial de sustitución de combusti-

- bles fósiles y mitigación de GEI. *Revista Mexicana de Física* 59(2):93-103.
- Ghilardi, A., G. Guerrero, O. Masera. 2007. Spatial analysis of residential fuelwood supply and demand patterns in Mexico Using the WISDOM approach. *Biomass and Bioenergy* 3(7):475-491.
- IEA. 2017. Energy Access Outlook 2017: From poverty to prosperity. World Energy Outlook Special Report. International Energy Agency. www.iea.org/publications/freepublications/publication/WEO2017SpecialReport_EnergyAccessOutlook.pdf.
- INECC. 2014. Factores de emisión para los diferentes tipos de combustibles fósiles y alternativos que se consumen en México. Informe. INECC/IMP, México.
- INEGI. 2015. Encuesta Intercensal de Población 2015. <https://www.inegi.org.mx/temas/estructura>. (Consulta: noviembre 15, 2020).
- IRENA. 2015. Renewable energy prospects: Mexico, REmap 2030 analysis Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency.
- Islas, J., F. Manzini y A. Martínez. 2010. Bioenergía. *Ciencia* 30-39.
- Islas, J., F. Manzini and O. Masera. 2007. A prospective study of bioenergy use in Mexico. *Energy* 32:2306-2320.
- Johnson, T. M., C. Alatorre, Z. Romo y F. Liu. 2009. México: Estudio sobre la disminución de emisiones de carbono. The World Bank.
- Lozano-García, D. F., S. P. Cuellar-Bermúdez, E. del Rio-Hinojosa, F. Betancourt, G. S. Alemán-Nava and R. Parra-Saldívar. 2019. Potential land microalgae cultivation in Mexico: From food production to biofuels. *Algal Research* DOI:10.1016/j.algal.2019.101459.
- McKechnie, J., S. Colombo, J. Cheen, W. Mabee and H. Machelean. 2011. Forest Bioenergy or Forest Carbon? Assessing Trade - Off in Greenhouse Gas Mitigation with Wood-Based Fuels. *Environmental Science Technology* 45(2):789-795. DOI:10.1021/es1024004
- Masera, O., R. Ballis, R. Drigo, A. Ghilardi and I. Ruiz-Mercado. 2015. Environmental burden of traditional bioenergy use. *Annual Review on Environmental Resources* 40:21-50.
- Masera, O., V. Berrueta, C. García, M. Serrano y R. Martínez. 2012. Escenarios de Mitigación de gases efecto invernadero, carbono negro y otros forzadores climáticos de vida corta, mediante el uso de biocombustibles sólidos. GIRA/UNAM/INE.
- Masera, O. 2006. La Bioenergía en México: Un catalizador del desarrollo sustentable. CONAFOR. México.
- Mendes-Souza, G., R. Victoria, C. Joly, L. Verdade. 2015. Bioenergy & sustainability: bridging the gaps. *Scope* 72. Brazil. ISBN:9778-2-9545557-0-6.
- Molina Center for Strategy Studies in Energy and Environment. 2013. Apoyo a la iniciativa de planificación nacional sobre contaminantes climáticos de vida corta en México. Reporte Final. INECC. México.
- NCASI (National Council for Air and Stream Improvement). 2010. Biomass carbon neutrality in the context of forest-based fuels and products. NC. USA.
- Petkov, G., A. Ivanova, I. Iliev, I. Vaseva. 2011. A critical look at the microalgae biodiesel. *European Journal of Lipid Science and Technology* 114(2):103-111. doi.org/10.1002/ejlt.201100234
- REMBIO. 2011. La Bioenergía en México, Situación Actual y Perspectivas. Red Mexicana de Bioenergía, A. C. México.
- REN21. 2018. Renewables 2018 Global Status Report (GSR). IRENA, IEA. PNUMA. París.
- REN21. 2019. Renewables 2019 Global Status Report. IRENA, IEA. PNUMA. París.
- Reyes-Muro, L., T. C. Camacho-Villa y F. Guevara-Hernández. 2013. Rastrojos: Manejo, Uso y Mercado en el Centro y Sur de México. Cuaderno técnico. México.
- Riegelhaupt, E. 2016. Biocombustibles sólidos. pp. 23-34. En: García-Bustamante, C. y O. Masera. Estado del Arte de la Bioenergía en México (eds.). Red Temática de Bioenergía (RTB) del Conacyt. Imagia comunicación. México.
- Ríos-Badrán, I., I. Luzardo-Ocampo, J. García-Trejo, J. Santos-Cruz and C. Gutriérrez-Antonio. 2020. Production and characterization of fuel pellets from rice husk and wheat straw. *Renewable Energy* 145:500-507. doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.048
- Sandoval, G. 2010. Biocombustibles avanzados en México, Estado actual y perspectivas. Cuadernos Temáticos sobre Bioenergía. REMBIO, A.C., México.
- SENER. 2009. Programa de Introducción de Bioenergéticos. SENER. México.
- SENER. 2014. Balance Nacional de Energía 2013. SENER. México.
- SENER. 2019. Balance Nacional de Energía 2018. SENER. México.
- Serrano-Medrano, M., C. García-Bustamante, V. M. Berrueta, R. Martínez-Bravo, V. M. Ruíz-García, A. Ghilardi and O. Masera. 2018. Promoting LPG, clean wood burning cook stoves or both? Climate change mitigation implications of integrated household energy transition scenarios in rural Mexico. *Environmental Research Letters* DOI:10.1088/1748-9326/aad5b8.
- Serrano-Medrano, M., T. Arias-Chalico, A. Ghilardi and O. Masera. 2014. Spatial and temporal projection of fuelwood and charcoal consumption in Mexico. *Energy for Sustainable Development* 19:39-46.
- Sjølie, H. K. and B. Solberg. 2011. Greenhouse gas emission impacts of use of Norwegian wood pellets: a sensitivity analysis. *Environmental Science and Policy* 14:1028-1040.
- Tauro, R., M. Serrano-Medrano and O. Masera. 2018. Solid biofuels in Mexico: a sustainable alternative to satisfy the increasing demand for heat and power. *Clean Technologies*

and Environmental Policy. ISSN: 1618-9558. DOI:10.1007/s10098-018-1529-z- (SCI: IF 2.3).

Tauro, R. J. 2018. Pellets de residuos agroindustriales y forestales : evaluación de factibilidad para la generación de energía térmica. Tesis de Doctorado. Universidad Nacional Autónoma de México, México. Recuperado de <https://repositorio.unam.mx/contenidos/85811>.

Tredici, M. R. 2010. Photobiology of microalgae mass cultures: understanding the tools for the next green revolution. *Biofuels* 1:143–162.

Valdez-Vazquez, I., J. A. Acevedo-Benítez and C. Hernández-Santiago. 2010. Distribution and potential of bioenergy resources from agricultural activities in Mexico. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14:2147-2153.