



PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL EN MÉXICO: MATERIAS PRIMAS PROMISORIAS Y SUS RENDIMIENTOS

Juan Jesús Reséndiz Luna ¹, Sergio Iván Martínez Guido ², Araceli Guadalupe Romero-Izquierdo ²,
Claudia Gutiérrez-Antonio ^{2,*}

¹ Universidad Mondragón México, Anillo Vial III Poniente No. 172, Col. Saldarriaga, 76240, El Marqués, Querétaro.

² Universidad Autónoma de Querétaro, Facultad de Ingeniería, Campus Amazcala, Carretera a Chichimequillas s/n
km 1, 76225, El Marqués, Querétaro, claudia.gutierrez@uaq.mx

Resumen

La comunidad científica internacional ha sumado esfuerzos en aras de lograr un desarrollo sostenible, que posibilite mitigar los efectos del cambio climático; en este contexto, la producción de biocombustibles se ha convertido en un aspecto clave. En particular, el diésel fósil es el combustible más utilizado en el sector transporte, por lo que producir su contraparte renovable es necesario. Tanto a nivel mundial como en México se han estudiado diversas materias primas y procesos para su producción; no obstante, para que dichos desarrollos sean factibles técnica y económicamente es necesario considerar materias primas locales de alto potencial productivo. Así, en este trabajo se estima la producción de biodiésel que puede generarse a partir de materias primas de alto potencial en México: *Jatropha curcas*, higuierilla, microalgas y aceite residual de cocina.

Palabras clave: biodiésel, *Jatropha curcas*, higuierilla, microalgas, aceite residual de cocina.



BIODIESEL PRODUCTION IN MEXICO: PROMISSORY RAW MATERIALS AND ITS YIELDS

Abstract

The international scientific community has joined forces in order to achieve sustainable development, which makes it possible to mitigate the effects of climate change; in this context, the production of biofuels has become a key aspect. In particular, fossil diesel is the most used fuel in the transport sector, so producing its renewable counterpart is necessary. Both worldwide and in Mexico, various raw materials and processes for their production have been studied; however, for these developments to be technically and economically feasible, it is necessary to consider local raw materials with high productive potential. Thus, in this work the production of biodiesel that can be generated from raw materials with high potential in Mexico, as *Jatropha curcas*, castor bean, microalgae, and residual cooking oil, is estimated.

Keywords: biodiesel, *Jatropha curcas*, castor bean, microalgae culture, waste cooking oil.



1. Introducción

En los últimos años, la comunidad científica internacional ha sumado esfuerzos para combatir el cambio climático y transitar hacia un desarrollo sostenible. Para ello, ha sido intensificada la investigación y el desarrollo tecnológico en el uso de fuentes de energía renovables, para la producción de electricidad, calor y biocombustibles; éstos últimos se consideran claves para transitar hacia procesos sustentables. Los biocombustibles se obtienen del procesamiento físico, químico, bioquímico y/o termoquímico de la biomasa, y pueden generarse en estado sólido, gaseoso y líquido; en particular, los biocombustibles líquidos han sido ampliamente investigados, ya que representan la única alternativa en el sector transporte sin cambiar la infraestructura actual. Así, se han desarrollado biocombustibles que puedan ser empleados como contrapartes renovables de la gasolina, diésel y turbosina de origen fósil en el transporte terrestre, ferroviario, marítimo y aéreo. Por otro lado, a nivel mundial el consumo de petróleo y sus derivados ascendió a 169 EJ en 2019, de los cuales el

sector transporte consume el 65.3 % distribuidos de la siguiente manera: terrestre (49.2%), aviación (8.6%), marítima (6.7%), y ferroviario (0.8%) (IEA, 2021). En el transporte terrestre se emplean principalmente gasolina y diésel, por lo que se pronostica un incremento en la demanda de sus contrapartes renovables. En particular, el diésel fósil puede ser sustituido por biodiésel o diésel verde.

El diésel de origen fósil está compuesto por hidrocarburos en el rango del C17 al C28, y se obtiene mediante la destilación fraccionada del petróleo. En contraparte, el biodiésel consta de ésteres alquílicos de ácidos grasos obtenidos mediante la transesterificación de triglicéridos, mientras que el diésel verde está integrado por hidrocarburos renovables, en el rango del C17 al C28, producidos a través del hidrotratamiento de triglicéridos. Como puede observarse, el diésel verde es equivalente en composición y en propiedades fisicoquímicas al diésel fósil; por su parte, el biodiésel se asemeja en algunas de sus propiedades, pero no es equivalente en composición. Debido a ello, el biodiésel puede usarse en mezclas con diésel de origen



fósil, mientras que el diésel verde puede emplearse al 100 %. A pesar de las ventajas que presenta el diésel verde, es el biodiésel el biocombustible que más se produce a nivel mundial. Se ha reportado que en 2019 la producción mundial de biodiésel superó en 5.85 veces a la de diésel verde (IEA, 2020). Los pronósticos de producción para el 2025 indican que se producirán 46 y 17 billones L de biodiésel y diésel verde, respectivamente (IEA, 2020). Esto se debe principalmente a que las condiciones del proceso de producción de biodiésel son más nobles, y por lo tanto la inversión requerida para implementar un proceso en escala industrial es menor. Por ello se ha investigado ampliamente la producción de biodiésel, considerando diferentes materias primas (Singh et al., 2020; Sitepu et al., 2020), alcoholes (Musa, 2016), tipos de catálisis (Kim et al., 2019; Rezanía et al., 2019; Tamjidi et al., 2021), así como procesos no catalíticos (Qadeer et al., 2021). Sin embargo, la producción de biodiésel es aún costosa (0.53-0.87 USD/L) y limitada (alrededor de 66 millones L/año) (Sosa-Rodríguez y Vázquez-Arenas, 2021), respecto del diésel fósil.

En México, las materias primas residuales y no comestibles son las más promisorias, dado

que no ponen en riesgo la seguridad alimentaria; entre ellas destacan los aceites de Higuierilla y *Jatropha curcas*, así como el residual de cocina (Sosa-Rodríguez y Vázquez-Arenas, 2021). Por otra parte, las microalgas no requieren tierra para su cultivo y superan con creces la producción de aceite por hectárea, respecto de cualquier otro cultivo. Por ello, en el presente trabajo se estima la producción de biodiésel en México, considerando las materias primas más promisorias. Para ello se brindará información sobre las biomásas antes mencionadas, los métodos de producción, así como la estimación en torno a la producción de biodiésel a partir de ellas.

2. Materias primas de alto potencial en México

A nivel mundial, el 95% de la producción de biodiésel proviene de aceites comestibles, dentro los que destacan aceites de girasol, maíz, palma, canola, coco, soya y arroz; sin embargo, el uso de estos aceites en México se descarta ya que ponen en riesgo la seguridad alimentaria. En México se restringe el uso de maíz para la producción de biocombustibles sólo en casos en que exista un excedente, y se cuenta con la autorización correspondiente



(DOF, 2008). En este sentido, materias primas no comestibles (*Jatropha curcas*, higuerilla, microalgas), y residuales (aceite de cocina usado) se han considerado para la producción de biocombustibles (Sandoval, 2010; García-Bustamante y Masera-Cerutti, 2016). Es importante señalar que la composición y potencial productivo de estas biomásas depende de las condiciones de suelo y clima del lugar donde se cultiven, así como de sus modos de cultivo. Es por ello que, el costo de cada una varía dependiendo de la región de producción (Bustamante-García y Masera-Cerutti, 2016), y en el caso de las microalgas varía en función del modo de cultivo y su cosecha (Venkata Subhash et al., 2022). Se ha estimado que el 70 % del costo de producción de biodiésel se debe al costo de la materia prima (Riegelhaupt et al., 2016); por ello es necesario analizar el potencial productivo, condiciones de cultivo, y disponibilidad de *Jatropha curcas*, higuerilla, aceite usado de cocina y microalgas, para así evaluar su factibilidad de uso para la producción de biodiésel en México.

2.1 *Jatropha curcas*

Jatropha curcas es un cultivo energético originario de México, Bolivia, Perú, Paraguay, Argentina y Brasil, con un tiempo

de vida media de 50 años. Este cultivo puede crecer en zonas semiáridas, con bajo contenido de nutrientes y alta temperatura; además, esta especie presenta crecimiento rápido, fácil establecimiento y baja incidencia a problemas fitosanitarios (Inurreta-Aguirre et al., 2013). En México, *Jatropha curcas* se siembra entre mayo y julio, de acuerdo a la zona y al tipo de riego (González Ávila et al., 2011; Gómez-Mercado, 2013). La cosecha del fruto de *Jatropha curcas* se lleva a cabo hasta el segundo año de plantación, y se realiza manualmente conforme a su maduración, que además no es uniforme (Singh et al., 2008; González Ávila et al., 2011; Gómez Mercado et al., 2013). Por otra parte, el rendimiento de frutos por hectárea cultivada es variable. En promedio, los rendimientos en México se estiman desde 0.16 ton/Ha hasta 5.4 ton/Ha (González Ávila et al., 2011; Gómez Mercado et al., 2013; Inurreta-Aguirre et al., 2013), y después del quinto año se obtienen entre 4-5 kg de fruto por árbol (Singh et al., 2008); por lo que considerando que pueden cultivarse 2,200 árboles/Ha es posible cosechar durante un año hasta 11.1 ton (González Ávila et al., 2011). México cuenta con 3,138,202 Ha con alto potencial productivo y 7,779,868 Ha con potencial medio INIFAP (2012), las cuales se



encuentran en Sinaloa, Tamaulipas, Guerrero, Chiapas, Morelos, Yucatán y Michoacán, con un potencial promedio anual de 5 ton/Ha (Romero-Izquierdo, 2020). El fruto de *Jatropha curcas* está integrado por una cáscara externa (37.5 % peso) y la semilla (62.5 % peso), Figura 1. A su vez, la semilla está compuesta por cascarilla interna (42 %) y almendra (58 %), siendo ésta última donde se concentra el aceite (Singh et al., 2008). En promedio, la cantidad de aceite por semilla es de 35 % (González Ávila et al., 2011).



Figura 1. Fruto de *Jatropha curcas* y sus componentes.

2.2 Higuierilla (*Ricinus communis* L.)

La higuierilla es un cultivo energético típico de regiones semiáridas, nativo de África tropical y la India, con alto potencial de adaptación en diversos ambientes. El aceite extraído de este cultivo es la única variedad natural soluble en alcohol, y tiene muchas aplicaciones en la industria automotriz, farmacéutica, aeronáutica, médica, química y energética (Gómez-Mercado et al., 2012). La siembra de este cultivo se recomienda en

climas cálidos y secos, precipitaciones entre los 700-1200 mm con baja humedad relativa y temperatura media superior a 20 °C, preferentemente entre el 15 de junio y el 15 de julio en temporal de lluvias (Espinoza-Paz et al., 2013). La cosecha, manual o mecanizada, de los frutos se realiza cuando éstos maduran, alrededor de los 150 a 207 días de cultivo, o cuando el 50 % de los frutos del primer racimo estén secos (Rico-Ponce et al., 2011; Espinoza-Paz et al., 2013). A partir de este punto, la cosecha debe llevarse a cabo cada 8 a 30 días. Se ha estimado que la higuierilla tiene un rendimiento de 1.41 ton/Ha de semillas (FAOSTAT, 2018). En México se cuenta con 8,001,415 Ha con potencial productivo alto, sobre la sierra madre occidental, la llanura costera del pacífico, el golfo de México, la sierra madre del sur y oriental, así como la península de Yucatán, y también 9,912,717 Ha con potencial medio (INIFAP, 2012). La planta de higuierilla está formada por tallos (38.8 %), hojas (14.4 %) y semillas (46.8 %), Figura 2. Por otro lado, la semilla está recubierta por cáscara que representa el 30 % de su peso. Finalmente, su contenido de aceite es 45 % respecto al peso total de la semilla (Rico-Ponce et al., 2011).



Figura 2. Fruto de Higuerilla y sus componentes.

2.3 Microalgas

Las microalgas son microorganismos de rápido crecimiento capaces de convertir eficientemente el CO₂ y la luz solar en biomasa y aceites intracelulares. Las microalgas no ponen en riesgo la seguridad alimentaria ya que no son utilizadas en la alimentación ni compiten con las tierras cultivables (Chisti et al., 2008; Tejeda-Benítez et al., 2015). El contenido de aceite de las microalgas varía de acuerdo con el tipo de cepa y sus condiciones de crecimiento, llegando hasta 70 % en peso, respecto al total de biomasa seca (Chisti et al., 2008). La elección de la cepa a cultivar depende de la productividad tanto de biomasa como de lípidos, ya que el contenido de aceite por sí solo no determina la productividad de biomasa, y viceversa. Cepas como la *Neochloris oleoabundans* con alrededor de 70 % en peso de aceite tienen baja productividad,

mientras que *Nannochloropsis sp* y *Chlorella* tienen menor contenido de aceite, pero alta productividad de biomasa; *Chlorella vulgaris* puede alcanzar hasta 0.75 g/L/día de biomasa y 0.20 g/L/día de lípidos (Vera-Morales, 2017). Una vez extraído el aceite, la biomasa algal residual puede convertirse en otros productos. El tipo de cepa y sus condiciones de cultivo son los factores que más influyen en el perfil de ácidos grasos y biomasa generada (Chisti et al., 2008; Tejeda-Benítez et al., 2015).

En el procesamiento de microalgas, otro aspecto importante es la cosecha de la biomasa algal, ya que esta operación representa del 20-30 % del costo total de producción, debido al tratamiento de grandes volúmenes de agua con biomasa en bajas concentraciones (Fasaei et al., 2018). La cosecha de microalgas frecuentemente se realiza en dos etapas, cosecha primaria o concentración de sólidos suspendidos totales, y cosecha secundaria o espesado. En la primera se incluyen operaciones como floculación, flotación y sedimentación, concentrando entre 2-7 % de biomasa algal; mientras que en la segunda se incluye la electrocoagulación, filtración y centrifugación, concentrando hasta 15-25 % de los sólidos suspendidos (Coward et al.,



2015). La selección de la tecnología depende del tipo de célula algal, densidad, tamaño y los productos a obtener (Brennan y Owende, 2010). En la Figura 3 se presenta el cultivo y aceite de la cepa *Chlorella vulgaris* (Vera Morales, 2017).



Figura 3. Cultivo y aceite de la cepa *Chlorella vulgaris*.

2.4 Aceite residual de cocina

El aceite residual de cocina (ARC) se genera en el proceso de fritura y/o cocción de alimentos, y es un residuo peligroso de manejo especial dado que, si es vertido al drenaje, contamina el agua. El ARC, al ser un residuo, tiene un costo reducido y es asequible; no obstante, se estima que sólo se aprovecha el 20 % del total disponible (Romero-Izquierdo, 2020). Los costos del ARC están asociados a su recolección y pretratamientos físico-químicos para eliminar los sólidos suspendidos (residuos de comida), disminuir su acidez y reducir el contenido de ácidos grasos libres que tiendan a la

formación de jabones; para ello se emplean operaciones como calentamiento, sedimentación, filtración, decantación, y esterificación. En México, en 2004 se generaron 6.17 millones de ton de residuos peligrosos, de los cuales el 21 % correspondió al ARC (SEDEMA, 2015).

3. Procesos de producción de biodiésel

El biodiésel es un biocombustible líquido producido a través de la esterificación y transesterificación de aceites extraídos de vegetales, microalgas, de desechos animales, así como de aceites usados de cocina, en presencia de un alcohol y un catalizador (Guo et al., 2015). El biodiésel consta de mono alquil ésteres de ácidos grasos, aunque su composición varía dependiendo de la materia prima. El proceso de obtención del biodiésel incluye la extracción del aceite vegetal o su recolección, la zona de reacción (esterificación/transesterificación), y la zona de purificación, Figura 4. Dentro de las materias primas se incluyen semillas con alto contenido de aceite vegetal, microalgas, o bien los aceites y grasas residuales, siendo éstas últimas recolectadas. En el caso de los aceites vegetales, éstos deben ser extraídos mediante métodos térmicos-mecánicos y/o



químicos. En el caso del ARC, sólo se requiere de un proceso de limpieza para eliminar los sólidos suspendidos, así como el acondicionamiento de su nivel de acidez y ácidos grasos libres. Los aceites vegetales están constituidos principalmente por triglicéridos, los cuales al reaccionar con alcohol, en presencia de un catalizador, se convierten en ésteres alquílicos de ácidos grasos y glicerol; a este proceso se le conoce como transesterificación (Ambat et al., 2018).

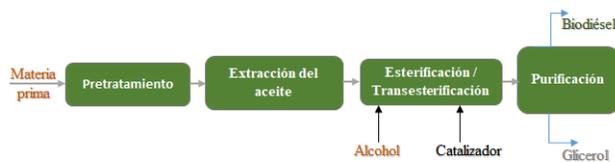


Figura 4. Diagrama de bloques de la producción de biodiésel.

De acuerdo con Athar y Zaidi (2020), las reacciones de esterificación y transesterificación son reversibles, por lo que requieren una cantidad excesiva de alcohol para desplazar la reacción de equilibrio hacia la producción de biodiésel. En la transesterificación, los triglicéridos se convierten a diglicéridos, los cuales se transforman en monoglicéridos y finalmente en glicerol, formando una molécula de éster alquílico en cada paso; estas reacciones emplean un catalizador, el cual acelera la

conversión a biodiésel, sin participar como reactivo en el proceso (Mathew et al., 2021). El metanol y el etanol son los alcoholes más utilizados en este proceso, aunque se prefiere el uso de etanol sobre el metanol. Sin embargo, el metanol es frecuentemente utilizado debido a su bajo costo, así como a sus propiedades fisicoquímicas. En la zona de purificación, los ésteres alquílicos son separados del glicerol, el agua de lavado y las trazas de glicéridos no convertidos, separando el biodiésel. Es importante señalar que la esterificación se utiliza como etapa de reacción previa a la transesterificación con el objetivo de convertir los ácidos grasos libres contenidos en el aceite vegetal en ésteres alquílicos, evitando la saponificación en la transesterificación. Los aceites vegetales de cocina usados presentan alta concentración de ácidos grasos libres, con respecto a aceites vegetales vírgenes, por lo que frecuentemente en su proceso de conversión a biodiésel se tiene una etapa de esterificación. Por otro lado, en lo que respecta a los catalizadores, en el caso de la esterificación se prefiere el uso de catalizadores ácidos, tal como el ácido sulfúrico; mientras que en el caso de la transesterificación se utilizan catalizadores básicos con el hidróxido de sodio (Athar y Zaidi, 2020). De forma general, los procesos



de producción de biodiésel se distinguen en función del tipo de catálisis en procesos homogéneos, heterogéneos, enzimáticos y no catalíticos.

3.1 Catálisis homogénea

En la catálisis homogénea, el catalizador se encuentra en la misma fase que los reactivos. Los catalizadores homogéneos pueden ser básicos o ácidos (Mathew et al., 2021). Ambat et al. (2018) señalan que los beneficios de los catalizadores homogéneos (ácidos y básicos) incluyen un menor tiempo de reacción, así como bajas condiciones de temperatura y presión. Usualmente, en términos de rendimiento e inversión de energía, la catálisis homogénea es más eficiente que la catálisis heterogénea. A su vez, la catálisis homogénea ácida es menos eficiente que la catálisis homogénea básica (Vignesh et al., 2020), pero pueden emplearse materias primas lipídicas de bajo costo (ARC), las cuales normalmente tienen un alto nivel de ácidos grasos libres. Los catalizadores homogéneos ácidos más comunes son ácido sulfúrico, ácido fosfórico, trifluoruro de boro y ácidos sulfónicos. Entre ellos, el ácido sulfúrico y los ácidos sulfónicos presentan los mayores rendimientos. Por otra parte, los catalizadores

homogéneos básicos permiten que la reacción de transesterificación ocurra a baja temperatura y presión atmosférica, obteniendo tasas de conversión altas en corto tiempo. Los catalizadores homogéneos básicos más comunes son NaOH y KOH debido a su bajo costo, así como a la conversión de los aceites en biodiésel, que puede alcanzar valores del 95 %.

3.2 Catálisis heterogénea

En la catálisis heterogénea, el catalizador se encuentra en fase sólida, lo cual permite facilitar su separación de los productos de la transesterificación (Gasca-González et al., 2018); este tipo de catalizadores no son corrosivos, se pueden reutilizar, y, además, éstos son menos susceptibles al agua y a los ácidos grasos libres, respecto de los catalizadores homogéneos. Los catalizadores heterogéneos pueden ser básicos o ácidos, y su selección depende del contenido de ácidos grasos libres presentes. El costo de los catalizadores heterogéneos es mayor que el de los homogéneos, influyendo en los costos del proceso a gran escala (Gasca-González, 2017).

3.3 Catálisis enzimática

En la catálisis enzimática, o biocatálisis, se emplean catalizadores que se producen en



medios fermentativos, a partir de microorganismos (Mohiddin et al., 2021). Actualmente, existen tres tipos de catalizadores enzimáticos aplicados para la producción del biodiésel: lipasas extracelulares, lipasas intracelulares y lipasas libres. Las lipasas extracelulares son extraídas y purificadas a partir del microorganismo huésped; posteriormente, éstas se inmovilizan en un material de soporte para ser empleadas en la transesterificación. Por otra parte, las lipasas intracelulares se usan directamente como catalizador para la transesterificación. La ventaja de este tipo de catalizadores es que no requieren extraerse o purificarse, por lo que los costos asociados con estas operaciones son eliminados, respecto a otros procesos de producción de biodiésel. Las enzimas líquidas, o enzimas libres, son de menor costo, ofrecen una mejor miscibilidad en el medio de reacción, y una mejor transferencia de masa, en comparación con las lipasas extracelulares e intracelulares.

3.4 Proceso no catalítico en condiciones supercríticas

Un fluido supercrítico es aquel que se encuentra en condiciones de presión y temperatura por arriba de su punto crítico; esto ocasiona un comportamiento peculiar en

el fluido exhibiendo propiedades tanto de líquidos como de gases (Athar y Zaidi, 2020). En el proceso no catalítico en condiciones supercríticas, los triglicéridos son fácilmente solubles en la fase del metanol supercrítico, permitiendo una rápida transformación a biodiésel sin requerir un catalizador. Además, este tipo de reacción no es sensible al contenido de ácidos grasos libres ni de humedad de los aceites; además, este proceso simultáneamente promueve la hidrólisis y reacción de esterificación junto con la reacción de transesterificación, por lo que se logran conversiones cercanas al 100 % en menos tiempo (Gómez-Castro et al., 2013). La reacción en condiciones supercríticas, o no catalítica, requiere de condiciones de presión y temperatura superiores al punto crítico del alcohol a utilizar. Esta condición permite el procesamiento en una etapa de reacción de la conversión a biodiésel de cualquier aceite vegetal, incluso aquellos cuyo contenido de ácidos grasos sea alto; por lo que se considera un excelente proceso a pesar de la inversión energética para acondicionar el alcohol (Gómez-Castro et al., 2017).

4. Potencial de producción de biodiésel en México



Como se mencionó previamente, la producción de biodiésel puede realizarse a partir de diferentes tipos de fuentes lipídicas, ya sean de origen animal o vegetal. En esta sección se presenta un análisis sobre el potencial de producción de biodiésel asociado a *Jatropha curcas*, higuierilla, aceite residual de cocina, y microalgas.

Para estimar el potencial de producción de biodiésel en México, se considera una disponibilidad de 18,611,822 Ha y 20,137,480 Ha con potencial para cultivar *Jatropha curcas* e higuierilla, respectivamente (INIFAP, 2012; SAGARPA, 2015). Además, se estima por cada Ha cultivada se producen 0.66 ton y 1.41 ton de semillas de *Jatropha curcas* e higuierilla, respectivamente. Con base en los trabajos de Singh et al. (2021) para el caso de la *Jatropha curcas* e Ijaz et al. (2016) para el caso de higuierilla, y utilizando las extensiones de tierra previamente señaladas, sería posible la producción de 4,363,207 ton/año y 13,083,885 ton/año de biodiésel de *Jatropha curcas* e higuierilla, respectivamente. La producción de biodiésel a partir de ambas materias primas no comestibles permitiría satisfacer en ambos casos la demanda nacional, si se emplea en una mezcla B20 (20% biodiésel/80% diésel fósil). Adicionalmente sería posible la venta

o distribución hacia otros sectores de 2,223,230 ton de biodiésel a partir de *Jatropha curcas*, y 10,943,908 ton de biodiésel producido a partir de higuierilla.

En el caso de la producción de biodiésel a partir del aceite residual de cocina, se considera una tasa promedio de generación, en México, de hasta 0.31 ton/año por cada 1,000 habitantes (Pascacio et al., 2016); tomando en cuenta el total de población mexicana en 2020 (INEGI, 2020) sería posible recolectar hasta 39,064,347 ton de aceite anualmente. Por lo que se podrían producir 33,790,661 ton de biodiésel por año, de acuerdo con los rendimientos reportados por Cong et al. (2020). En este sentido, de acuerdo a la demanda considerada, sería posible satisfacer la mezcla B20 a nivel nacional, y comercializar o distribuir a otros sectores 31,650,684 ton de biodiésel. Es importante mencionar que esta opción representa más beneficios ambientales, ya que convierte al ARC, que es un residuo peligroso, en energía, evitando así su mala disposición. De igual manera, la conversión de ARC en biodiésel presenta ventajas económicas, ya que se podrían generar empleos al abrirse un mercado de recolección y revalorización de este aceite. A su vez, esto implica la necesidad de implementar una



nueva cadena de suministro que involucre no sólo la recolección, sino también su tratamiento, previo a su revalorización.

Por otro lado, el cultivo de microalgas se ha convertido en una opción atractiva para la producción de biodiésel de tercera generación, ya que este tipo de microorganismo puede cultivarse en aguas residuales, las cuales al mismo tiempo son tratadas. En este contexto, en México se producen aproximadamente 150 L de aguas residuales urbanas diariamente (SEDEMA, 2020), las cuales mediante un acondicionamiento podrían servir como medio de cultivo para la especie *Nannochloropsis sp* (Sánchez-Torres et al., 2008). A su vez, esta especie puede ser utilizada como fuente de proteína para la producción de alimentos, así como para la generación de aceites a revalorizar en biodiésel. Bajo esta premisa, si este flujo de aguas residuales es considerado para el cultivo de *Nannochloropsis sp* podrían generarse 46,032 ton/año de biodiésel, con base en los rendimientos reportados por Van-Lal-Chhandama et al. (2021); el volumen producido permitiría satisfacer el 2.15% de la demanda nacional empleando una mezcla B20. Sin embargo, es necesario tener en cuenta que sólo se consideraron aguas

residuales domésticas, por lo que adicionar aguas residuales provenientes de actividades agrícolas podría aumentar la producción, así como la economía de procesamiento de este biocombustible.

Ahora bien, sin importar cuál sea la materia prima a usar para la producción de biodiésel, basados en los resultados generados por diversos autores, es necesario destacar que las cadenas de suministro deben establecerse de manera estatal o regional; lo anterior dado que, al considerar una cadena de suministro nacional, el transporte de cualquier materia prima o producto impacta en el costo total, así como en las emisiones de CO₂. Por ello, se deben proponer sistemas de manejo a nivel nacional en los cuales sea posible evaluar la configuración óptima tanto de las materias primas como de los procesos de producción; esto permitiría generar procesos factibles tanto económica como ambientalmente. Adicionalmente, la información generada con los sistemas de manejo constituye una base sólida para la formulación de políticas públicas, en la que se beneficie o incentive el uso de este tipo de tecnologías con miras a lograr el desarrollo sostenible a nivel internacional.

5. Conclusiones



El biodiésel puede emplearse en mezclas con diésel de origen fósil, para comenzar así la transición energética en el sector transporte sin cambios en la infraestructura actual. El proceso de producción de este biocombustible es relativamente simple, y permite la generación de un producto de valor agregado (glicerol). En México, el uso de biomasa de alto potencial productivo y bajo costo son las mejores alternativas, entre las que destacan los aceites de *Jatropha curcas*, higuera, microalgas y el aceite residual de cocina. Se observa que empleando estos aceites es posible satisfacer el total de la demanda nacional de diésel con una mezcla B20, para el caso de los aceites de *Jatropha curcas*, higuera y residual de cocina; mientras que con la cepa *Nannochloropsis sp* sería satisfecha el 21 % de la demanda nacional, y al mismo tiempo es posible tratar las aguas residuales domésticas. Así, la producción de biodiésel en México se ve favorecida al emplear las cuatro materias primas con mayor potencial, sin poner en riesgo la seguridad alimentaria y solucionando las problemáticas asociadas a la inadecuada disposición del ARC, así como el tratamiento de aguas residuales como medio de cultivo algal. Por ello, es necesario poner especial énfasis en el desarrollo de procesos

eficientes de producción de biodiésel, considerando su inserción dentro de cadenas óptimas de recolección y suministro.

Agradecimientos

Se agradece el apoyo económico brindado por Exxerpro Solutions, CONACyT y PRODEP mediante las becas de Juan Jesús Reséndiz-Luna, Araceli Guadalupe Romero-Izquierdo, y Sergio Iván Martínez-Guido, respectivamente.

Referencias

- Inurreta Aguirre, H.D., García Pérez, E., Uresti Gil, J., Martínez Dávila, J.P., Ortíz Laurel, H. (2013). Potencial para producir *Jatropha curcas* L. como materia prima para biodiésel en el estado de Veracruz. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 16, 325–339.
- Ambat, I., Srivastava, V., Sillanpää, M. (2018). Recent advancement in biodiesel production methodologies using various feedstock: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 90(April), 356–369.
- Athar, M., Zaidi, S. (2020). A review of the



- feedstocks, catalysts, and intensification techniques for sustainable biodiesel production. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(6), 104523.
- 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), 557–577.
- Bustamante-García, C., & Masera-Cerutti, O. (2016). ESTADO DEL ARTE DE LA BIOENERGÍA EN MÉXICO.
- Bwapwa, J.K., Anandraj, A., Trois, C. (2017). Possibilities for conversion of microalgae oil into aviation fuel: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80(May), 1345–1354.
- Chisti, Y. (2008). Biodiesel from microalgae beats bioethanol. *Trends in Biotechnology*, 26(3), 126–131.
- Cong, W.J., Wang, Y.T., Li, H., Fang, Z., Sun, J., Liu, H.T., Liu, J.T., Tang, S., Xu, L. (2020). Direct production of biodiesel from waste oils with a strong solid base from alkalized industrial clay ash. *Applied Energy*. 264, 114735.
- Gerardo, M.L., Hende, S.V.D., Vervaeren, H., Coward, T., Skill, S.C. (2015). Harvesting of microalgae within a biorefinery approach: A review of the developments and case studies from pilot-plants. *Algal Research*, 11, 248–262.
- Espinoza-Paz, H., Rodríguez Hernández, R., Bravo Mosqueda, E. (2013). Guía para cultivar higuierilla en condiciones de temporal, en los Valles Centrales de Oaxaca. INIFAP.
- FAOSTAT. (2018). Datos de higuierilla en México. Retrieved February 28, 2020, from <http://www.fao.org/faostat/es/#data/QC>
- Fasaei, F., Bitter, J.H., Slegers, P.M., van Boxtel, A.J.B. (2018). Techno-economic evaluation of microalgae harvesting and dewatering systems. *Algal Research*, 31(February), 347–362.
- Gasca-González, R. (2017). Diseño de un proceso de bajo costo para la producción de biodiésel a partir de aceites de re-uso. Universidad de Guanajuato.
- Gasca-González, R., Gómez-Castro, F.I., Romero-Izquierdo, A.G., Zenón-Olvera, E., Gutiérrez-Antonio, C. (2018). Design of a low-cost process for the



- production of biodiesel using waste oil as raw material. In A. Friedl, J. J. Klemeš, S. Radl, P. S. Varbanov, & T. Wallek (Eds.), 28th European Symposium on Computer Aided Process Engineering (pp. 1529–1534).
- Gómez-Castro, F. I., Aldana-González, M.G., Conde-Mejía, C., Gutiérrez-Antonio, C., Romero-Izquierdo, A.G., Morales-Rodríguez, R. (2017). Process integration for the supercritical production of biodiesel and the production of lignocellulosic bioethanol. In A. Espuña, M. Graells, & L. Puigjaner (Eds.), 27th European Symposium on Computer Aided Process Engineering (pp. 931–936).
- Gómez-Castro, F. I., Segovia-Hernández, J.G., Hernández-Castro, S., Rico-Ramírez, V., Gamiño-Arroyo, Z., Cano-Rodríguez, I. (2013). Alternatives for the Production of Biodiesel by Supercritical Technologies: A Comparative Study. In A. Kraslawski & I. Turunen (Eds.), 23rd European Symposium on Computer Aided Process Engineering (pp. 7–12).
- Gómez-Mercado, R., Gómez Mercado, R., Martínez Cruz, E., Zarazúa Delgadillo, M.A. (2012). Tecnología de Producción de Higuierilla en el Estado de Hidalgo. Retrieved February 11, 2022, from INIFAP website: www.inifap.gob.mx
- Gómez Mercado, R., Hernández Martínez, M., Morales Díaz, P., Gómez Mercado, R., Martínez Cruz, E., Zarazúa Delgadillo, M.A. (2013). Tecnología para la producción de Jatropha en el estado de Hidalgo. Retrieved from <http://biblioteca.inifap.gob.mx:8080/jsp/ui/handle/123456789/3913>
- González Ávila, A., García Mariscal, K.d.l.P., Hernández García, M.A., Teniente Oviedo, R., Solís Bonilla, J.L., Zamarripa Colmenero, A. (2011). Guía para Cultivar Piñón Mexicano (*Jatropha curcas* L.) en Jalisco. Editorial INIFAP. ISBN 978-607-425-644-4.
- Gouveia, J. D., Ruiz, J., van den Broek, L.A.M., Hesselink, T., Peters, S., Kleinegris, D.M.M., Smith, A.G., van der Veen, D., Barbosa, M.J., Wijffels, R.H. (2017). *Botryococcus braunii* strains compared for biomass productivity, hydrocarbon and carbohydrate content. *Journal of Biotechnology*, 248, 77–86.
- Guo, M., Song, W., Buhain, J. (2015).



- Bioenergy and biofuels: History, status, and perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, 712–725.
- Hadiyanto, H., Soetrinanto, D., Silviana, S., Mahdi, M.Z., Titisari, Y.N. (2017). Evaluation of growth and biomass productivity of marine microalga *Nannochloropsis* sp. cultured in palm oil mill effluent (POME). *Philippine Journal of Science*, 146(4), 355–360.
- IEA, International Energy Agency, 2021, Key World Energy Statistics 2021 – Final consumption. Disponible en: <https://www.iea.org/reports/key-world-energy-statistics-2021/final-consumption>. Consultado en 16.12.2021.
- IEA, International Energy Agency, 2020, Renewables 2020 – Transport biofuels. Disponible en: <https://www.iea.org/reports/renewables-2020/transport-biofuels>. Consultado en 17.12.2021.
- Ijaz, M., Bahtti, K.H., Anwar, Z., Dogar, U.F., Irshad, M. (2016). Production, optimization and quality assessment of biodiesel from *Ricinus communis* L. oil. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*. 9, 180-184.
- INIFAP. (2012). Potencial productivo de especies agrícolas de importancia socioeconómica en México. INIFAP, México.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía "INEGI". (2020). Demografía y Sociedad: Población. Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/temas/estructura/>
- Kim, B., Heo, H.Y., Son, J., Yang, J., Chang, Y.K., Lee, J.H., Lee, J.W. (2019). Simplifying biodiesel production from microalgae via wet in situ transesterification: A review in current research and future prospects. *Algal Research*. 41, 101557.
- Kraiem, T., Hassen, A.B., Belayouni, H., Jeguirim, M. (2017). Production and characterization of bio-oil from the pyrolysis of waste frying oil. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(11), 9951–9961.
- DOF, Diario Oficial de la Federación (2008). Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos.
- Ludevese-Pascual, G., Dela Peña, M., Tornalejo, J. (2016). Biomass



- production, proximate composition and fatty acid profile of the local marine thraustochytrid isolate, *Schizochytrium* sp. LEY7 using low-cost substrates at optimum culture conditions. *Aquaculture Research*, 47(1), 318–328.
- Mathew, G. M., Raina, D., Narisetty, V., Kumar, V., Saran, S., Pugazhendi, A., Sindhu, R., Pandey, A., Binod, P. (2021). Recent advances in biodiesel production: Challenges and solutions. *Science of the Total Environment*, 794, 148751.
- Mohiddin, M.N.B., Tan, H.Y., Seow, Y.X., Kansedo, J., Mubarak, N.M., Abdullah, M.O., Chan, Y.S., Khalid, M. (2021). Evaluation on feedstock, technologies, catalyst and reactor for sustainable biodiesel production: A review. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 98, 60–81.
- Musa, I.A. (2016). The effects of alcohol to oil molar ratios and the type of alcohol on biodiesel production using transesterification process. *Egyptian Journal of Petroleum*. 25(1), 21-31.
- Qadeer, M.U., Ayoub, M., Komiyama, M., Daulatzai, M.U.K., Mukhtar, A., Saqib, S., Ullah, S., Qyyum, M.A., Asif, S., Bokhari, A. (2021). Review of biodiesel synthesis technologies, current trends, yield influencing factors and economical analysis of supercritical process. *Journal of Cleaner Production*. 309, 127388.
- REOIL. (2009). Normatividad de Residuos en México. <http://www.reoil.net/legal.html>
- Rezania, S., Oryani, B., Park, J., Hashemi, B., Yadav, K.K., Kwon, E.E., Hur, J., Cho, J. (2019). Review on transesterification of non-edible sources for biodiesel production with a focus on economic aspects, fuel properties and by-product applications. *Energy Conversion and Management*. 201, 112155.
- Rico-Ponce, H.R., Tapia Vargas, L.M., Teniente Oviedo, R., González Ávila, A., Hernández Martínez, M., Solís Bonilla, J.L., Zamarripa Colmenero, A. (2011). Guía para cultivar higuierilla (*Ricinus communis* L.) en Michoacán. INIFAP.
- Riegelhaupt, E., Odenthal, J., Janeiro, L. (2016). Diagnóstico de la situación actual del biodiésel en México y escenarios para su aprovechamiento (pp. 1–129). pp. 1–129.



- Romero-Izquierdo, A. G. (2020). Diseño, modelado y simulación de un esquema de biorefinería para el aprovechamiento integral de mezclas de materias primas renovables. Universidad de Guanajuato, PhD Thesis.
- SAGARPA (2015). Planeación Agrícola Nacional 2017-2030, Bioenergéticos. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/257070/Potencial-Bioenerg_ticos.pdf
- Sandoval, G. (2010). Biocombustibles Avanzados en México. Red Mexicana de Bioenergía.
- Sánchez-Torres, H., Juscamaita-Morales, J., Vargas-Cárdenas, J., Oliveros-Ramos, R. (2008). Producción de la microalga *Nannochloropsis oculata* (Droop) Hibberd en medios enriquecidos con ensilado biológico de pescado. *Ecología Aplicada*. 7(1-2), 149-158.
- Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México "SEDEMA". 2020. Cuidar el agua es de tod@s. Disponible en: <http://www.cuidarelagua.cdmx.gob.mx/volumen.html>
- SEDEMA. (2015). Inventario de Residuos Sólidos, CDMX.
- SEDEMA. (2017). Centros de acopio de residuos sólidos urbanos en la CDMX. Página Web. http://data.sedema.cdmx.gob.mx/nadf24/images/infografias/planes_de_manejo_autorizados.pdf
- Sialve, B., Bernet, N., Bernard, O. (2009). Anaerobic digestion of microalgae as a necessary step to make microalgal biodiesel sustainable. *Biotechnology Advances*, 27(4), 409–416.
- Sitepu, E.K., Heimann, K., Raston, C.L., Zhang, W. (2020). Critical evaluation of process parameters for direct biodiesel production from diverse feedstock. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 123, 109762.
- Singh, R.N., Vyas, D. K., Srivastava, N.S.L., Narra, M. (2008). SPRERI experience on holistic approach to utilize all parts of *Jatropha curcas* fruit for energy. *Renewable Energy*, 33(8), 1868–1873.
- Singh, D., Sharma, D., Soni, S.L., Sharma, S., Sharma, P.K., Jhalani, A. (2020). A review on feedstocks, production processes, and yield for different generations of biodiesel. *Fuel*. 262, 116553.



- Singh, D., Sharma, D., Soni, S.L., Inda, C.S., Sharma, S., Sharma, P.K., Jhalani, A. et al (2021). A comprehensive review of physicochemical properties, production process, performance and emissions characteristics of 2nd generation biodiesel feedstock: *Jatropha curcas*. *Fuel*. 285, 119110.
- Sosa-Rodríguez, F.S., Vazquez-Arenas, J. (2021). The biodiesel market in Mexico: Challenges and perspectives to overcome in Latin-American countries. *Energy Conversion and Management*: X. 12, 100149.
- Tacias-Pascacio, V.G., Rosales Quintero, A., Torrestiana Sánchez, B. (2016). Evaluación y caracterización de grasas y aceites residuales de cocina para la producción de biodiésel: un caso de estudio. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. 32(3), 303-313.
- Tamjidi, S., Esmaili, H., Moghadas, B.K. (2021). Performance of functionalized magnetic nanocatalysts and feedstocks on biodiesel production: A review study. *Journal of Cleaner Production*. 305, 127200.
- Tejeda-Benítez, L., Hernao-Argumedo, D., Alvear-Alayón, M., Castillo-Saldarriaga, C.R. (2015). Caracterización y perfil lipídico de aceites de microalgas Characterization and lipid profile of oil from microalgae Caracterização e perfil lipídico de azeites de microalgas. *Revista Facultad de Ingeniería*, Mayo-Agosto, 24(39), 43–54.
- Van-Lal-Chhandama, M., Satyan, K.B., Changmai, B., Vanlalveni, C., Rokhum, S.L. (2021). Microalgae as a feedstock for the production of biodiesel: A review. *Bioresource Technology Reports*. 15, 100771.
- Venkata Subhash, G., Rajvanshi, M., Kumar, G.R.K., Sagaram, U.S., Prasad, V., Govindachary, S., Dasgupta, S. (2022). Challenges in microalgal biofuel production: A perspective on techno economic feasibility under biorefinery stratagem. *Bioresource Technology*, 343, 126155.
- Vera Morales, J. (2017). Obtención de aceite a partir de microalgas mediante métodos de bajo consumo energético. Universidad Autónoma de Querétaro.
- Vignesh, P., Kumar, A.R.P., Ganesh, N.S., Jayaseelan, V., Sudhakar, K. (2020). A



Naturaleza y Tecnología
Septiembre Diciembre 2022
ISSN 2007-672X
Universidad de Guanajuato

review of conventional and renewable
biodiesel production. Chinese Journal of
Chemical Engineering. 40, 1-17.