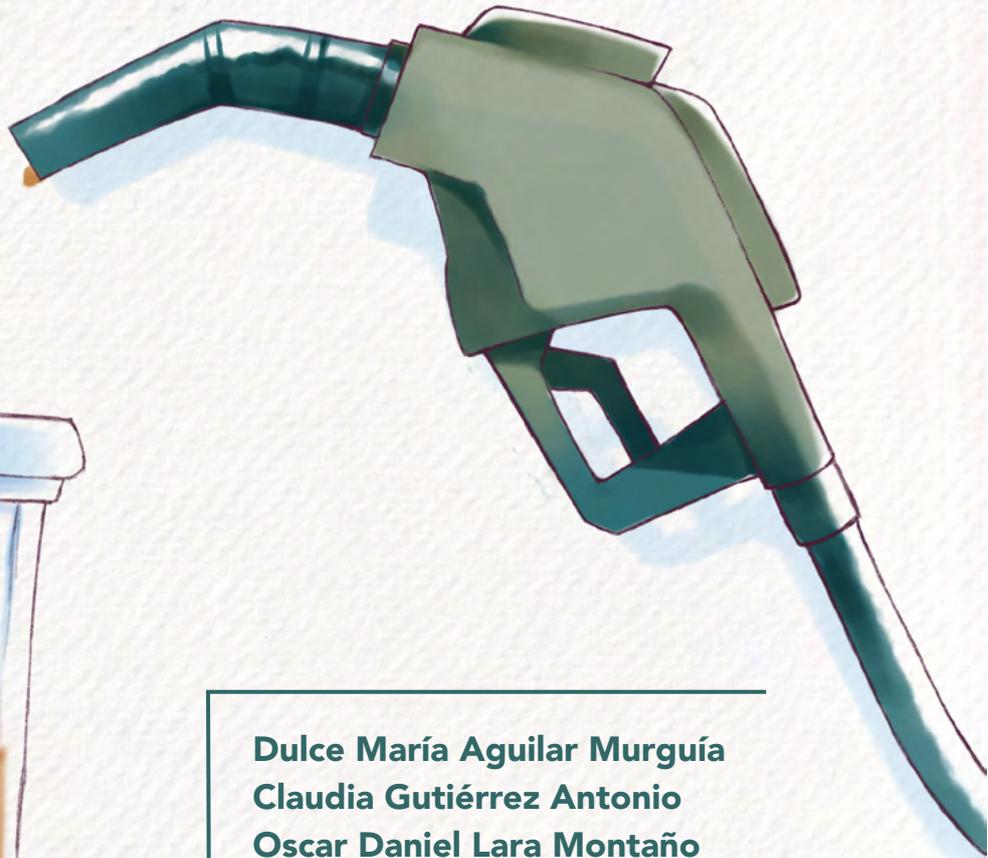




## CONFIGURACIÓN ÓPTIMA DE LA RED DE PRODUCCIÓN SOSTENIBLE DE BIODIÉSEL A PARTIR DE ACEITE DE BSFL

OPTIMAL CONFIGURATION OF THE SUSTAINABLE  
BIODIESEL PRODUCTION NETWORK FROM BSFL



**Dulce María Aguilar Murguía**  
**Claudia Gutiérrez Antonio**  
**Oscar Daniel Lara Montaña**  
**Sergio Iván Martínez Guido\***

Universidad Autónoma de Querétaro,  
Santiago de Querétaro, México

\*sergio.martinezg@uaq.mx

# Resumen

En la última década, se han propuesto alternativas de descarbonización en el sector del transporte, incluidos los biocombustibles en motores de combustión interna y el uso de vehículos eléctricos. Cabe señalar que el biodiésel ha demostrado ser una de las alternativas principales, ya que se puede utilizar en mezclas con su homólogo fósil. Sin embargo, las plantas de producción instaladas utilizan aceites animales y vegetales como materia prima; estos insumos afectan el costo total de producción, que puede ser hasta 1.5 veces el costo del diésel convencional. Como consecuencia, se ha propuesto el uso de aceite de larvas de mosca soldado negra; estos insectos pueden alimentarse de diversos tipos de residuos orgánicos que son transformados en biomasa con alto contenido de lípidos (35-40 %). El presente trabajo propone el diseño y la configuración de una cadena de suministro capaz de responder a la demanda de combustible a nivel nacional. Para lograr el propósito, se elaboró un modelo de optimización matemática que considera aspectos del suministro, el transporte, la distribución, el almacenamiento, así como la ubicación de los nodos de producción. Se establecieron como funciones objetivo la maximización del rendimiento y la minimización de las emisiones.

**Palabras clave:** biocombustibles, biodiésel, cadena de suministro, economía circular, optimización matemática, residuos orgánicos.



# Abstract

Over the past decade, decarbonization alternatives have been proposed for the transport sector, including biofuels in internal combustion engines and the use of electric vehicles. Biodiesel has proved to be one of the principal alternative biofuels since it can be used in mixtures with its fossil counterpart. However, all production plants installed use animal and vegetable oils as raw materials; these inputs rise the total production cost, up to 1.5 times the cost of conventional diesel. As a consequence, the use of black soldier fly larvae oil has been proposed; these insects can feed on diverse types of organic waste, which are transformed into biomass with a high lipid content (35-40%). This paper proposes the design and configuration of a supply chain capable of responding to the demand for fuel at the national level. To achieve the purpose, a mathematical optimization model was elaborated that considers aspects such as the location of production supply nodes, transportation, distribution, and storage. Performance maximization and emission minimization were established as target functions.

**Keywords:** biofuels, biodiesel, supply chain, circular economy, mathematical optimization, organic waste.





## Introducción

A nivel mundial, los dos factores principales de la transformación del sistema energético actual son la seguridad energética y la mitigación del cambio climático; la cual consiste en la transición de una economía basada en energías fósiles a una en energías renovables que permita disminuir los efectos del calentamiento global. Como respuesta a la creciente demanda energética, la sustitución de los combustibles fósiles por fuentes alternas como eólica, solar y biomasa han recibido mayor atención [1].

Los biocombustibles generados a partir de biomasa se han destacado como soluciones energéticas alternativas para el sector transporte. La principal fuente de biocombustibles es la materia orgánica (biomasa), que conduce a generar procesos capaces de añadir valor a los sistemas de producción primaria y que promueve la economía circular. La biomasa puede transformarse mediante diferentes procesos de conversión para generar energía térmica, eléctrica o biocombustibles dependiendo de su naturaleza química [2].

Se ha introducido el biodiésel como una alternativa para reducir aproximadamente el 40 % de las emisiones generadas por la quema de diésel convencional y el 78 % de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) emitido [3]. El biodiésel es un biocombustible producido principalmente a partir de aceites vegetales o grasas animales [4], que puede ser usado en automotores con modificaciones mínimas. Este combustible renovable está constituido por una mezcla de ésteres monoalquílicos de ácidos grasos, obtenidos a partir de reacciones de transesterificación de aceites o grasas.

La producción de biodiésel se clasifica en cuatro generaciones, las cuales están ligadas al tipo de materia prima y a la tecnología usada [3]. Hoy en día la mayor cantidad de biodiésel producido mundialmente es de primera y segunda generación, sus principales desventajas son altos costos de producción y competitividad con el uso del suelo. Algunas investigaciones relacionadas con la producción de biodiésel a partir de aceites no comestibles, como los obtenidos a partir de la *Jatropha curcas*, microalgas y aceites residuales, han sido el centro de atención; sin embargo, todas estas rutas presentan barreras de viabilidad económica, de sostenibilidad, técnicas, o la falta de una economía circular, en menor o mayor medida para cada materia prima estudiada [5]. Ante las desventajas de las materias primas en la producción de biodiésel, algunos autores proponen el uso de aceites generados por insectos, particularmente el aceite extraído de larvas de mosca soldado negra (BSFL por sus siglas en inglés).

“...El presente trabajo propone el diseño y configuración de una cadena de suministro capaz de responder a la demanda de combustible a nivel nacional a través del uso de aceite de larvas de mosca soldado negra.



Existen muchas ventajas vinculadas al uso de aceite de BSFL, debido a su alto contenido de grasa, alta velocidad reproductiva y ciclos de vida cortos [6], [7]. Aunado a la habilidad de consumir diversos tipos de componentes orgánicos, en su mayoría desechos o residuos sin ninguna aplicación de valor. Asimismo, para la utilización de aceite de BSFL son innecesarios el uso de tierras fértiles, la competencia con otros procesos de producción alimenticia y no contribuye con la huella hídrica generada por otras materias primas (producción de algas o cultivos) [8]; además es posible generar altos volúmenes de aceite en pequeños espacios reproductivos, resultando en la producción de biomasa con un 35-40 % de contenido de grasa a través de la eliminación de diversos residuos [9].

**TABLA 1.** Trabajos reportados sobre la viabilidad de producción de biodiésel a partir de BSFL.

AUTOR	[8]	[10]	[11]	[12]	
PAÍS	COREA	TAIWÁN	CHINA	MALASIA	
STANDARD	CUMPLE MAYORÍA	CUMPLE MAYORÍA	CUMPLE	<sup>a</sup>	
FAME Yield (%)	94.10 % 93.80 %	96.20 %	95.40 %	97.00 %	98.00 %
UFA b (%)	24.70 % 25.00 %	29.00 %	44.05 %	13.00 %	13.90 %
SFA a (%)	75.20 % 74.90 %	71.00 %	55.95 %	87.00 %	86.10 %
Lípidos Content (dw c %)	84.50 %	24.97 %	31.80 %	34.23 %	25.88 %
Densidad del inoculo	3,000 larva/300 g substrate	1,200 larva/kg substrate	200 larvae/200 g substrate	20 larva/10 g	
Tipo de reacción	T. d N.T. e g(KOH)	T. (CH <sub>3</sub> OH, DBU)	T. (KOH)	E. (HCL) - T. (KOH)	
Métodos de extracción de lípidos	n-hexano Soxhlet	n-hexano Extracción solvente	Petróleo éter Soxhlet	Petróleo éter Extracción solvente	
Tipo de comida	Residuos comida	Salvado de trigo	Paja de colza	Endospermo de coco	
Especie de insecto	BSFL	BSFL	BSFL	BSFL	BSFL

El presente trabajo propone analizar la configuración óptima de la cadena de suministro de producción y distribución de biodiésel, mediante la integración de biorrefinerías a base de aceite de BSFL. Se elaboró un modelo matemático, integrando las ecuaciones que representan cada una de las etapas en la red de producción y distribución, desarrollando un estudio general del sistema real. Los datos integrados al modelo se obtuvieron de parámetros actuales de México, siendo éste el caso de estudio evaluado. El sistema analizado consideró en primera estancia la biotransformación de los residuos orgánicos generados a nivel nacional a través de la integra-



ción de larvas de mosca soldado negra. Posteriormente, el aceite obtenido de dichos insectos es usado como materia prima para la producción de biodiésel de segunda generación. Una vez obtenido el biodiésel, es integrado a la cadena convencional de distribución como mezcla B20.

## Planteamiento del problema

De acuerdo con el Atlas Nacional de Biomasa [13], México genera 278 millones de toneladas de residuos orgánicos al año, con un potencial energético estimado de 2980 PJ. En los países en desarrollo, los residuos se queman o se depositan en vertederos, lo que tiene consecuencias negativas para el medio ambiente [14]. La Secretaría de Energía [15] espera una demanda nacional de diésel de 405 millones de barriles diarios (Mbd) en 2021, con un crecimiento anual de 1.57 %; el 30 % de la demanda total de diésel se produce en México, mientras que el 70 % es importado. México se encuentra posicionado en el decimotercer lugar de los países emisores de  $\text{CO}_2$ , con casi 737 millones de toneladas; 64 % proviene del sector de transporte, 7 % es generado por la gestión de residuos y 3.9 % por los sitios de disposición final [16]. En consecuencia, en la COP26, México se propone reducir el 25 % de las emisiones de gases de efecto invernadero y del sector industrial mediante la generación del 35 % de energía limpia para 2024 y el 43 % para 2030; estas acciones buscan alcanzar el objetivo de mantener el aumento de la temperatura por debajo de 1.5 °C.

Frente a este problema, han surgido alternativas para cubrir la demanda de biocombustibles, como el biodiésel y reducir las emisiones que generan. Sin embargo, la materia prima utilizada a escala industrial proviene de cultivos alimentarios y/o residuos de aceite, por lo que, el uso de este tipo de materia prima genera un aumento de costos. De tal modo, se planea implementar alternativas de materias primas para la producción de biodiésel, como es el caso del aceite generado a partir de la biotransformación de las larvas BSFL.

Se expuso una cadena de suministro que atiende la demanda de diésel a través del aceite de larva. Revaloriza los residuos orgánicos generados por la población y la reducción de emisiones de  $\text{CO}_2$  provocadas por estos en los vertederos o rellenos sanitarios. Se plantea que la materia prima para la obtención final de biodiésel parta de dar uso a dichos residuos; ayudando a la crianza de las larvas para su transformación a biodiésel mediante procesos industriales.



## Metodología

Se diseñó una superestructura de cadena de suministro para la producción de biodiésel a partir de larvas de mosca soldado negra. Se consideró la recolección de materias primas (residuos orgánicos), centros de recolección, distancias, ubicación de centros de biotransformación y líneas de distribución. En primera instancia, se contemplan los lugares donde se recogen los desechos orgánicos, los cuales son los 32 estados de México. Si el flujo de residuos es representativo en un sitio, una planta de biotransformación (PB) de larvas de mosca soldado negra se instalará allí y servirá como centro de gestión biológico de residuos, por lo cual, solo se tienen en cuenta los residuos de pérdida alimenticia (aproximadamente 1 840 853 ton/año).

Luego, en cada PB instalada se extrae todo el aceite de las larvas cultivadas y con él se produce biodiésel puro a través del proceso de transesterificación. El sector de transporte mexicano es el consumidor final de biodiésel; para suministrar estos biocombustibles, se considera una mezcla B20 para evitar costos adicionales por modificaciones a los motores. En la Figura 1 los subíndices  $i$ ,  $j$ ,  $k$  y  $l$  tienen la posibilidad de tomar valores del 1 al 32, mientras que  $s$  sólo puede tomar valores del 1 al 6 (considerando las refinerías convencionales actuales).

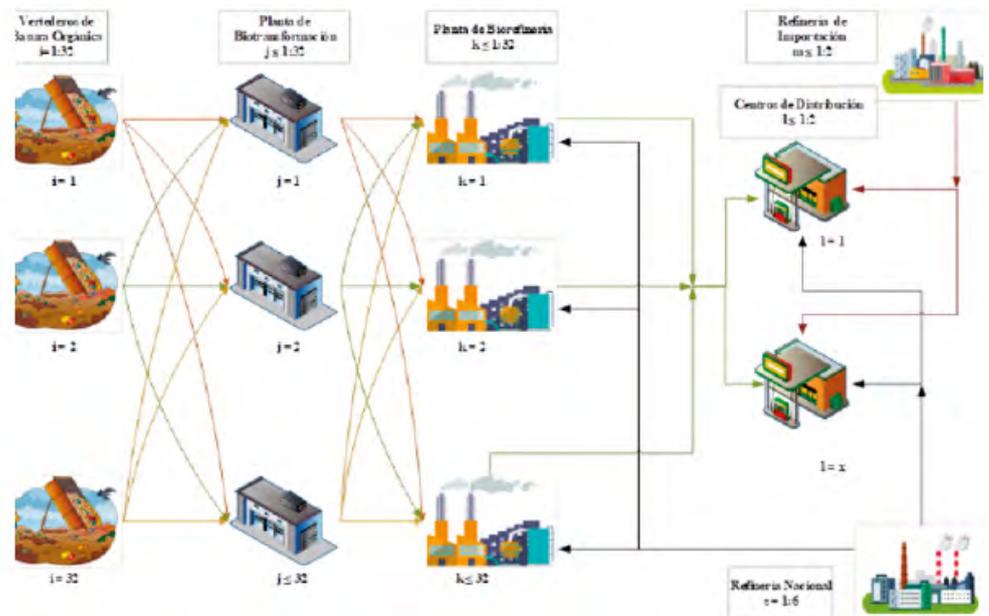


FIGURA 1.  
Superestructura de  
biodiésel de BSFL.

Se elaboró el modelo de optimización matemática para la cadena de suministro de biodiésel de acuerdo con la superestructura generada. Luego se investigaron los parámetros necesarios para generar las bases de datos que se requerirán en el modelado del programa. A continuación, se codificó el modelo propuesto en la plataforma del Sistema General de Modelado Algebraico (GAMS). La codificación previamente descrita se utilizó



para analizar diferentes escenarios propuestos y se evaluaron los impactos ambientales y económicos en cada una de las prueba. Finalmente, se llevó a cabo el análisis y la elaboración del reporte de resultados obtenidos a través de diagramas de flujo de la cadena de suministro.

## Modelo Matemático

El enfoque propuesto considera la situación actual de los residuos orgánicos en México y la demanda de diésel. El flujo de residuos orgánicos en cada sitio ( $FRO_{i,t}$ ) tiene posibilidad de ser desechado en un sitio de eliminación final ( $RF^{dump}_{i,j,t}$ ) o ser utilizado como alimento en las plantas de producción de larvas de mosca soldado negra ( $RFS^{oil}_{i,j,t}$ ). En la Ecuación (1), se describe que la suma de ambos flujos, flujo desechado y flujo como alimento, es igual al flujo total de residuos orgánicos producidos en cada sitio (i) por semana (t). En la Ecuación (2), se calcula el flujo de aceite extraído ( $OF^{Ext}_{j,t}$ ) por cada tonelada de larvas producidas ( $\beta$ ), utilizando los residuos orgánicos recibidos ( $RFR_{j,t}$ ) como alimento para la mosca soldado negra en cada planta de producción instalada.

$$FR^0_{j,t} = \sum_j RFS^{oil}_{i,j,t} + \sum_j RF^{dump}_{i,j,t}, \forall i \in I, t \in T \quad (1)$$

$$OF^{Ext}_{j,t} = RFR^0_{j,t} * \beta, \forall j \in J, t \in T \quad (2)$$

Después, el flujo recolectado de aceite de larvas ( $OF^{sent}_{j,k,t}$ ) es enviado a la biorrefinería (k) como se muestra en la Ecuación (3). En la Ecuación (4), el flujo de biodiésel producido ( $FP^{Bio}_{k,t}$ ) semanalmente en cada biorrefinería se calcula mediante la multiplicación del flujo de aceite de larva recibido ( $LO^{rece}_{k,t}$ ) por un respectivo factor de conversión ( $\mu$ ), dado en toneladas de biodiésel puro producido por toneladas de aceite de larva.

$$LO^{rece}_{k,t} = S_j OF^{sent}_{j,k,t}, \forall k \in K, t \in T. \quad (3)$$

$$FP^{Bio}_{k,t} = LO^{rece}_{k,t} * \mu, \forall k \in K, t \in T \quad (4)$$

Asimismo, con el biodiésel puro producido en cada planta es posible obtener la mezcla B20 (20 % biodiésel puro [ $FP^{Bio}_{k,t}$ ] y 80 % diésel convencional [ $FD^{Conv}_{k,t}$ ]). Con la Ecuación (5), se calcula el flujo esperado de B20 ( $BIO^{Mix}_{k,t}$ ), en toneladas de cada planta instalada. Ahora bien, con la Ecuación (6) se calcula el flujo B20 transportado ( $BIO^{Mix-s}_{k,l,t}$ ) al sitio de consumo (l). La Ecuación (7) describe que la demanda actual de combustible ( $FD^F_{l,t}$ ) en cada sitio es menor a la suma del flujo B20 ( $BIO^{Mix-al,t}$ ) disponible más



el flujo de diésel convencional ( $CD^{use}_{l,t}$ ). El consumo de éste último se considera cuando no es posible satisfacer con B20 la demanda de combustible.

$$Bio^{Mix}_{k,t} = FP^{Bio}_{k,t} + FD^{Conv}_{k,t}, \forall k \in K, t \in T \quad (5)$$

$$Bio^{Mix-d}_{l,t} = \sum_k Bio^{Mix-s}_{k,l,t}, \forall l \in L, t \in T \quad (6)$$

$$FD^F_{l,t} \leq Bio^{Mix-d}_{l,t} + CD^{use}_{l,t}, \forall l \in L, t \in T \quad (7)$$

La Ecuación (8) calcula el costo total, se suman todos los correspondientes al transporte generados ( $C^{Tra}$ ), el costo por el consumo de diésel convencional ( $C^{uso_{dc}}$ ), el costo por la gestión de residuos ( $C^{wm}$ ) y la producción de B20 ( $CPB20$ ). La gestión de residuos y el coste de producción B20 incluye costos fijos y variables para cada planta instalada. La Ecuación (9) muestra las emisiones de  $CO_2$  ( $E^t$ ), se suman las emisiones del transporte ( $E^{tra}$ ), el uso de diésel convencional ( $E^{uso_{dc}}$ ), el uso de B20 ( $E^{uso_{B20}}$ ), la producción B20 ( $E^{PB20}$ ) y las liberadas por las estrategias de gestión de residuos ( $E^{wm}$ ).

$$TC = C^{Tra} + C^{uso_{DC}} + C^{wm} + C^{PB20} \quad (8)$$

$$TE = E^{Tra} + E^{uso_{DC}} + E^{Uso_{B20}} + E^{wm} + E^{PB20} \quad (9)$$

La Ecuación (10) muestra el balance de rendimiento, se suman las ventas generadas por B20 ( $Sales$ ) más la ganancia económica por la gestión de residuos de alimentos ( $Pr^{wast}$ ) y los costos totales se restan. Esta última ganancia toma en consideración los residuos enviados a la planta de biotransformación; por lo tanto, se elimina el costo actual del sitio de disposición final. Por último, la Ecuación (11) da como resultado una función multiobjetivo (O.F) para la maximización del rendimiento económico (Max profit) y la minimización de emisiones (Min  $CO_2$ ).

$$Profit = Sales + Pr^{wast} - tc \quad (10)$$

$$O.F. = Max profit; Min CO_2 \quad (11)$$

## Resultados y discusión

Mediante la plataforma de GAMS® se codificó el modelo matemático propuesto, incluyendo 47 558 restricciones, 272 069 variables libres y 192 variables discretas. La resolución fue el Modelo Mixto Entero Lineal usando CPLEX como resolvidor. Cada ensayo se ejecutó en una AMD® A10 con 2.60 ghz de CPU y 8 GB de RAM y el tiempo de resolución entre cada ejecución fue de 2.360 segundos.



Posterior al análisis sobre la maximización del rendimiento económico y la minimización del impacto ambiental, se obtuvieron los extremos del sistema (rendimiento máximo e impacto ambiental mínimo). Se generaron dos escenarios más, que representan soluciones de compromiso entre ambas funciones objetivas, puntos que son los escenarios analizados en el presente trabajo.

Aunque no es posible cubrir el 100 % de la demanda interna de diésel convencional con la mezcla propuesta, se puede observar una disminución en la generación de  $\text{CO}_2$ . En los escenarios reportados disminuye la cantidad de emisiones producidas; sin embargo, hay un impacto en el rendimiento económico debido a la diferencia en el beneficio económico que conlleva la menor cantidad de plantas instaladas. En ambos escenarios se produce la misma cantidad de biodiésel puro (561 976 ton/año) y de B20 (2 809 878 ton/año); esto se debe a que se utilizan todos los residuos producidos en los 32 estados, independientemente del número de plantas instaladas en cada escenario.

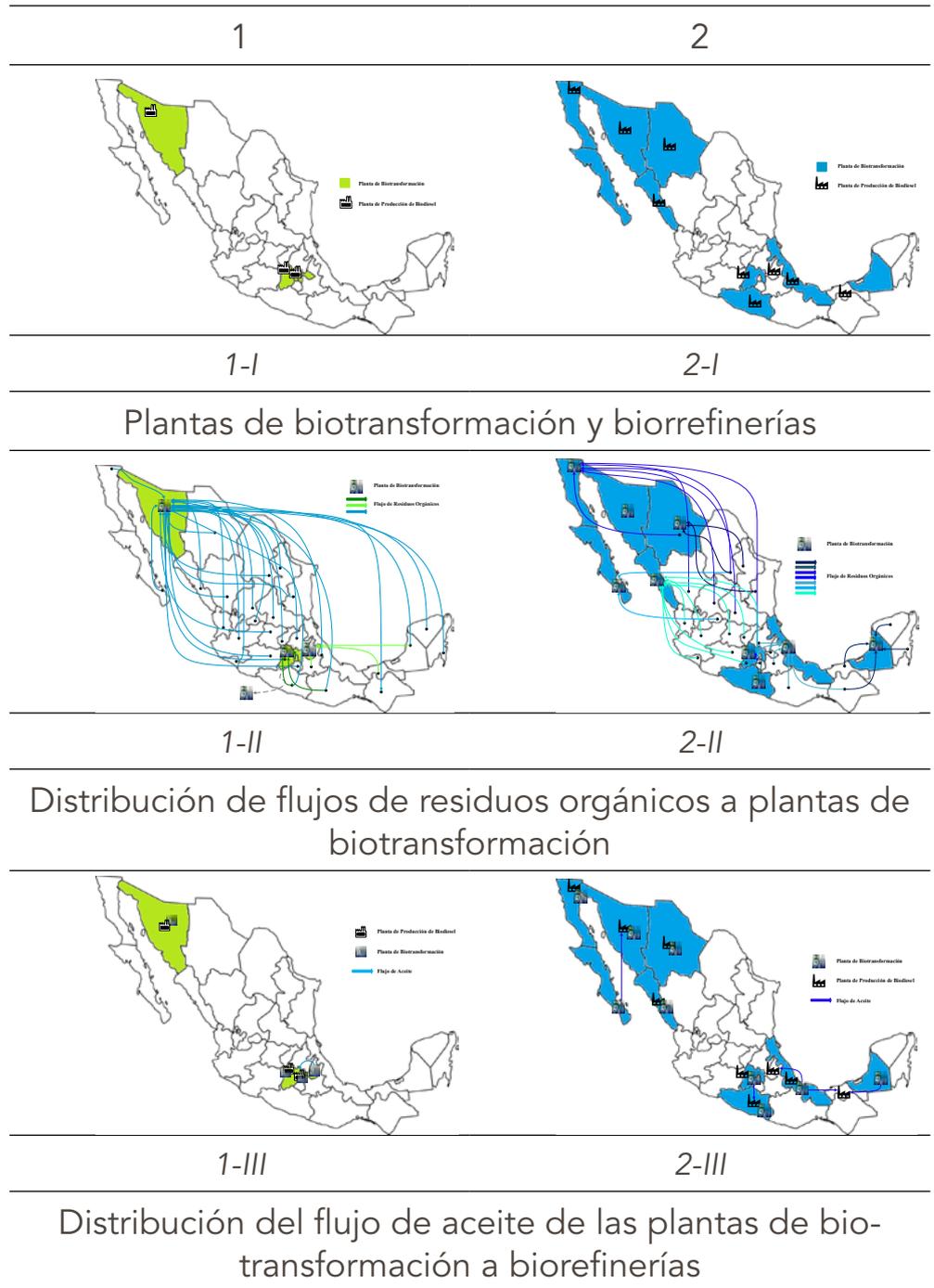
La primera solución genera aproximadamente 15 millones 397 mil 449 toneladas/año de  $\text{CO}_2$  y un rendimiento económico de 3 272 millones 605 mil USD/año. En este punto se instaló una planta de biotransformación en los estados de CDMX, Estados de México, Sonora y Tlaxcala. Estas plantas reciben los residuos orgánicos producidos por los otros estados como se muestra en la Tabla 2, figura 1-I. Por otro lado, la instalación de plantas de producción de biodiésel (biorrefinerías) sólo ocurre en los estados de CDMX, Estado de México y Sonora (Tabla 2, figura 1-II), mientras que otros estados tienen que cubrir la demanda con diésel convencional. Según los beneficios generados por las ventas, el estado con mayor remuneración económica es CDMX, seguido por el Estado de México y Sonora, siendo el mismo orden para el número de empleos generados.

Por otra parte, el rendimiento económico obtenido en la segunda solución alcanza los 3 175 480 793 USD/año, y generando aproximadamente 15 395 686 toneladas/año de  $\text{CO}_2$ . En este escenario, se instalaron nueve plantas de biotransformación (Tabla 2.2-I) en los estados de Baja California, Baja California Sur, Campeche, Chihuahua, Estado de México, Guerrero, Sinaloa, Sonora y Veracruz. Éstas tienen como alimento los desechos orgánicos que producen los 32 estados (Tabla 2, figura 2-II). Sólo ocho de los cuáles fueron seleccionados para la instalación de plantas de producción de biodiésel: Baja California, Chihuahua, Estado de México, Guerrero, Sinaloa, Sonora, Tabasco, Tlaxcala y Veracruz (Tabla 2, figura 2-III); el resto



cubren su demanda con diésel convencional. El estado con mayor tasa de ganancias por ventas y generación de mano de obra es el Estado de México.

**TABLA 2.**  
Figuras representativas de cada escenario.



### Impacto Ambiental

Se consideraron únicamente las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), que intervienen desde la recolección de materias primas (residuos orgánicos) hasta el uso del producto final (biodiésel) para este fin, se empleó la herramienta computacional “Modelo de gases de efecto invernadero, emisiones reguladas y uso de energía en tecnologías por el laboratorio nacional Argonne” (GREET) versión 2020 [17], se consultaron datos para



cada fase contemplada del modelo, además de la misma base de datos proporcionada por el estado. De acuerdo con el cálculo de emisiones de  $\text{CO}_2$ , realizado en GREET, el 39 % representa la producción de materias primas y su conversión al biodiésel para cultivos energéticos y el 8 % se refiere a los materiales de desecho de las emisiones totales de  $\text{CO}_2$  generadas en la cadena de suministro de biodiésel.

La transformación de cada tonelada de residuos alimentarios genera aproximadamente 0.88 kg de  $\text{CO}_2$  [17]. La Tabla 3 muestra la comparación de las cantidades de emisiones de  $\text{CO}_2$  generadas para cada caso; por cada tonelada generada de aceite de BSFL se producen 12 kg de  $\text{CO}_2$ , teniendo un valor inferior de 98.8 % en comparación con la generación de emisiones de cada tonelada de cultivo energético. Al distinguir las emisiones de cada tonelada de aceite de larvas son 83.3 % menores en comparación con las emisiones generadas por cada tonelada de aceite u otras grasas de desecho.

**TABLA 3.**  
Comparación de  
emisiones de  $\text{CO}_2$ .

TIPOS DE RESIDUOS		PRODUCCIÓN DE MATERIA PRIMA (KG <sub>2</sub> /TON MATERIA PRIMA)	EMISIONES TOTALES (KG <sub>2</sub> /TON BIODIESEL)
Residuos	Manteca de cerdo + grasa de pollo	72	956 <sup>o</sup>
	Aceite de cocina	72	956 <sup>o</sup>
	Sebo	72	956 <sup>o</sup>
Producción anual	Aceite de ricino	1,031	2,654 <sup>o</sup>
Producción mecanizada	Aceite de soya	1,031	2,654 <sup>o</sup>
Cultivos perenes	Aceite de palma	1,031	2,654 <sup>o</sup>
Uso de larva BSFL	Aceite de larva	12	562 <sup>e</sup>

<sup>o</sup>Valores reportados en [18]

<sup>e</sup>Valores calculados en  
greet<sup>®</sup> [19]

El tratamiento de una proporción de residuos orgánicos, que representan alrededor del 33 % de los residuos totales en México, ayuda a reducir una gran cantidad de emisiones causadas por su acumulación; por otro lado, si los residuos de alimentos se desecharan en su sitio de disposición final, generarían aproximadamente 11 497 200 toneladas de  $\text{CO}_2$ /año, calculadas a partir de las propuestas de [18]. Sin embargo, si en lugar de enviar estos residuos a vertederos se transforman en biodiésel mediante el uso de la mosca soldado negra, las emisiones resultantes mostrarían que es posible reducir anualmente un 86 % dichas emisiones.

La Tabla 3 muestra la cantidad de emisiones de  $\text{CO}_2$  generadas por tonelada de biodiésel puro producido. Al hacer uso de aceite de larvas como materia prima se emite un 41 % menos de emisiones que cuando se utiliza aceite residual de cocina, y un 78 % menos que cuando el aceite de soya se utiliza como materia prima para la producción de biocombustible.



## Impacto económico

Se consideró el costo de capital de cada planta de biotransformación, el costo de capital de cada biorrefinería, el costo por diésel convencional utilizado, el generado por el transporte de petróleo, por el transporte de biodiésel mezclado, de transporte de biodiésel puro, de residuos orgánicos y el generado por la eliminación de residuos orgánicos en vertederos.

El valor predominante se obtuvo generando diésel convencional, cuyo valor se sitúa entre el 81.8 y el 86.69 % del total de costos de cada escenario; dentro de los costos en el análisis, sólo el de capital para las plantas de biotransformación continúa en magnitud. Conforme se reduce la cantidad de emisiones de  $\text{CO}_2$ , aumenta el costo del diésel convencional utilizado, ya que conforme cambia el escenario, el número de plantas instaladas aumenta, teniendo un impacto directo en el valor. En cada estado se utiliza la misma cantidad de biodiésel, pero se requieren cantidades iguales de diésel para generar la mezcla; considerando el transporte, los costos varían del valor debido al aumento de la distancia entre los estados, ya que se eleva la tarifa de viaje.

---

## Conclusiones

El presente trabajo ilustra un panorama general sobre la revalorización de los residuos orgánicos, que puede aportar no sólo beneficios económicos, sino también sociales y ambientales, a través de herramientas biológicas. Todos los beneficios que se registraron se muestran en cada una de las soluciones de compromiso evaluadas y presentadas. Los biocombustibles son una solución atractiva a problemáticas económicas y ambientales que puede ayudar a lograr la transición a la energía renovable que tanto se busca.

Se observó que es necesario invertir para lograr la revalorización de los residuos que hoy se desechan en vertederos, causando un problema medioambiental más grave. Esta estrategia también puede ser beneficiosa para entorno, evita emisiones por el vertido de residuos que dejan atrás y coadyuva a crear productos que se integran en la generación de energía sostenible. Por otro lado, es posible identificar que las cadenas de suministro evaluadas a nivel nacional contribuyen al aumento de las emisiones ambientales, por lo que proponer cadenas estatales, ayuda a evitar el impacto ambiental.



El modelo generado puede aplicarse a diferentes estudios de caso, sean municipales, estatales o nacionales, que pueden ser una herramienta capaz de generar soluciones atractivas para las personas responsables de tomar este tipo de decisiones.

## Agradecimientos

Se agradece al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología por los recursos de la beca postdoctoral otorgada a Sergio Iván Martínez Guido.

## Referencias

- [1] K. Im-orb, A. Arpornwichanop y L. Simasatitkul, "Process intensification approach for design and optimization of biodiesel production from palm fatty acid distillate", *Biotechnology Reports*, vol. 30, 2021, DOI: 10.1016/j.btre.2021.e00622
- [2] D. M. Matos-Ríos, J. M. Ponce-Ortega y C. Gutiérrez-Antonio, "Cadena de suministro para la producción de biocombustibles", *Ciencia*, vol. 72, pp. 10-17, 2021.
- [3] A. Syafiuddin, J. H. Chong, A. Yuniarto y T. Hadibarata, "The current scenario and challenges of biodiesel production in Asian countries: A review", *Bioresource Technology Reports*, vol. 12, p. 100608, 2020, DOI:10.1016/j.biteb.2020.100608
- [4] J. M. Fonseca, J. G. Teleken, V. de Cinque Almeida y C. da Silva, "Biodiesel from waste frying oils: Methods of production and purification", *Energy Conversion Management*, vol. 184, pp. 205-218, 2019, DOI:10.1016/j.enconman.2019.01.061
- [5] H. C. Nguyen, S. Liang, T. Doan, C. Su y P. Yang, "Lipase-catalyzed synthesis of biodiesel from black soldier fly (*Hermetica illucens*): Optimization by using response surface methodology", *Energy Conversion Management*, vol. 145, pp. 335-342, 2017, DOI: 10.1016/j.enconman.2017.05.010
- [6] K. C. Surendra, R. Olivier, J. K. Tomberlin, R. Jha y S. K. Khanal, "Bioconversion of organic wastes into biodiesel and animal feed via insect farming", *Renewable Energy*, vol. 98, pp. 197-202, 2016, DOI: 10.1016/j.renene.2016.03.022.
- [7] H. C. Nguyen, S.-H. Liang, S.-S. Chen, C.-H. Su, J.-H. Lin y C.-C. Chien, "Enzymatic production of biodiesel from insect fat using methyl aceta-



- te as an acyl acceptor: Optimization by using response surface methodology," *Energy Conversion Management*, vol. 158, pp. 168-175, 2018, DOI: 10.1016/j.enconman.2017.12.068.
- [8] S. Jung, J.-M Jung, Y. F. Tsang, A. Bhatnagar, W.-H. Chen, K.-Y. Andrew Lin y E. E. Kwon, "Biodiesel production from black soldier fly larvae derived from food waste by non-catalytic transesterification", *Energy*, vol. 238, p. 121700, 2022, DOI: 10.1016/j.energy.2021.121700
- [9] C. Wang, L. Qian, W. Wang, T. Wang, Z. Deng, F. Yang, J. Xiong y W. Feng, "Exploring the potential of lipids from black soldier fly: New paradigm for biodiesel production (ii)–Extraction kinetics and thermodynamic", *Renewable Energy*, vol. 119, pp. 12-18, 2018, DOI: 10.1016/j.renene.2017.04.063.
- [10] H. C. Nguyen, M. L. Nguyen, S. Liang, C. Su y F. Wang, "Switchable Solvent-Catalyzed Direct Transesterification of Insect Biomass for Biodiesel Production", *Bio-Energy Research*, vol. 13, no. 2, pp. 563-570, 2020, DOI: 10.1007/s12155-019-10085-8
- [11] M. Elsayed, Y. Ran, P. Ai, M. Azab, A. Mansour, K. Jin, Y. Zhang y A. Abomohra, "Innovative integrated approach of biofuel production from agricultural wastes by anaerobic digestion and black soldier fly larvae", *Journal of Cleaner Production*, vol. 263, p. 121495, 2020, DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.121495.
- [12] C. Wong, S. Rosli, Y. Uemura, Y. C. Ho, A. Leejeerajumnean, W. Kiatkittipong, C. Cheng, M. Lam y J. Lei, "Potential Protein and Biodiesel Sources from Black Soldier Fly Larvae: Insights of Larval Harvesting Instar and Fermented Feeding Medium", *Energies (Basel)*, vol. 12, no. 8, p. 1570, 2019, DOI: 10.3390/en12081570
- [13] Secretaría de Energía. "Atlas Nacional de Biomasa". Gobierno de México. <https://www.gob.mx/sener/articulos/atlas-nacional-de-biomasa> (consultado el 29 de abril de 2023).
- [14] P. Pradhan, P. Gadkari, A. Arora y S. M. Mahajani, "Economic feasibility of agro waste pelletization as an energy option in rural India", *Energy Procedia*, vol. 158, pp. 3405-3410, 2019, DOI: 10.1016/j.egypro.2019.01.936
- [15] Secretaría de Energía. "Prospectiva de Energías Renovables 2016-2030," [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/177622/Prospectiva\\_de\\_Energias\\_Renovables\\_2016-2030.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/177622/Prospectiva_de_Energias_Renovables_2016-2030.pdf). (Consultado el 29 de abril de 2023).
- [16] Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. "Inventa-



rio Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero". Gobierno de México. <https://www.gob.mx/inecc/acciones-y-programas/inventario-nacional-de-emisiones-de-gases-y-compuestos-de-efecto-invernadero> (consultado el 28 de abril de 2023).

- [17] W. Pang, D. Hou, J. Ke, J. Chen, M. T. Holtzapple, J. K. Tomberlin, H. Chen, J. Zhang y Q. Li, "Production of biodiesel from  $\text{CO}_2$  and organic wastes by fermentation and black soldier fly", *Renewable Energy*, vol. 149, pp. 1174-1181, 2020, DOI: 10.1016/j.renene.2019.10.099
- [18] J. Suckling, A. Druckman, R. Small, F. Cecelja y M. Busse-
- maker, "Supply chain optimization and analysis of *Hermetia illucens* (black soldier fly) bioconversion of surplus foodstuffs", *Journals of Cleaner Production*, vol. 321, p. 128711, 2021, DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.128711.
- [19] Bioenergy Technologies Office. "GREET: The Greenhouse Gases, Regulated Emissions, and Energy Use in Transportation Model | Department of Energy", <https://www.energy.gov/eere/bioenergy/articles/greet-greenhouse-gases-regulated-emissions-and-energy-use-transportation> (consultado el 29 de abril de 2023).

