



PRODUCCIÓN DE COMBUSTIBLE SUSTENTABLE DE AVIACIÓN A PARTIR DE BIOMASAS RESIDUALES Y ACEITE DE INSECTOS: UNA REVISIÓN

Sustainable aviation fuel production from waste biomass and insect oil:
a review

Juan Jesús Reséndiz Luna
Claudia Gutiérrez Antonio
Valeria Caltzontzin Rabell*

Universidad Autónoma de Querétaro,
Querétaro México

*valeria.caltzontzin@uaq.mx

03



Resumen

En el sistema de transporte, la industria de la aviación ha tomado el liderazgo en la búsqueda de nuevas alternativas que atenúen su impacto en el cambio climático, y ha puesto en marcha iniciativas para impulsar su desarrollo sostenible, dentro de las cuales destaca el combustible sustentable de aviación (SAF). El SAF se obtiene de la biomasa a través de diversas rutas de procesamiento; la más directa es el hidrotreamiento de grasas y aceites. Empero, la disponibilidad global de materias primas ricas en triglicéridos es baja, respecto de los materiales lignocelulósicos. Estos últimos son atractivos debido a su abundancia y asequibilidad, pero no son hidropcesables de

forma directa por causa de su bajo contenido de lípidos. Por tanto, se ha explorado un tratamiento biológico que permite transformar a parcialidad la materia lignocelulósica en grasas hidrotreatables. Así mismo, la conversión biológica de residuos lignocelulósicos por medio de la cría de la mosca soldado negra (LMSN) actúa como una alternativa para generar grasas útiles en la producción de combustible sustentable de aviación. El presente trabajo expone una revisión sobre la producción de combustible sustentable de aviación a partir de materias primas residuales, enfatizando el uso de grasas de LMSN.

Palabras clave: biocombustible, biomasa, combustible sustentable de aviación, *Hermetia illucens*, larva de mosca soldado negra, residuos.

Abstract

In the transportation sector, the aviation industry has taken the lead in the search for alternatives to help mitigate the impact on climate change, and has launched initiatives to promote its sustainable development, among which sustainable aviation fuel (SAF) stands out. SAF is distilled from biomass through several processing routes, the most direct of which is the hydrotreating of fats and oils. Nevertheless, global availability of triglyceride-rich feedstocks is lower, respect to lignocellulosic materials. The latter are attractive because of their abundance and low

cost, but are not directly hydroprocessable because of their low lipid content. Therefore, a biological treatment has been explored to partially transform lignocellulosic material into hydroprocessable fats. Likewise, the biological conversion of lignocellulosic residues through the breeding of the black soldier fly (BSFL) represents an alternative to generate fats useful in the production of sustainable aviation fuel. This article presents a review on the production of sustainable aviation fuel from waste feedstocks, with special emphasis on BSFL fats.

Keywords: biomass, biofuel, sustainable aviation fuel, *Hermetia illucens*, black soldier fly larvae, waste.



Introducción

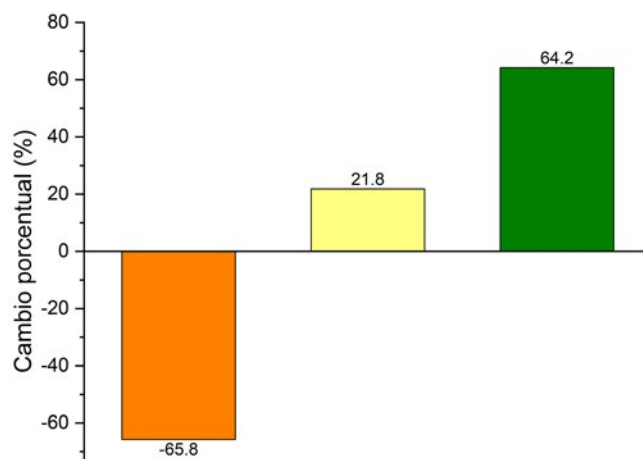
En décadas recientes, más del 80 % de la energía necesaria para la sociedad se ha extraído de combustibles fósiles [1]. La agencia internacional de energía estadounidense (IEA) propone el Escenario de políticas declaradas (Stated Policies Scenario o STEPS), donde exhibe las directrices que han de implementarse para mitigar el cambio climático; tal esquema prevé que los combustibles fósiles representarán el 75 y el 60 % del consumo de energía en los años 2030 y 2050 [2]. Otro modelo presentado por la IEA es el denominado Cero emisiones netas en 2050 (Net Zero Emissions by 2050 o NZE): un plan para estabilizar el aumento de la temperatura mundial en 1.5 °C, así como abrir el acceso universal a la electricidad y los sistemas modernos de energía para 2023 [2]. Se contemplan proyectos de descarbonización por medio de tecnologías energéticas limpias basados en costos, condiciones del mercado y preferencias políticas. Ese panorama refleja las circunstancias particulares de los distintos países en términos de disponibilidad de recursos, infraestructura e influencia política [2].

El sector transporte acapara una cuarta parte del consumo energético total y es responsable del 40 % de emisiones de gases de efecto invernadero, principalmente debido a los combustibles derivados del petróleo que predominan en dicha industria. En 2021, las emisiones de CO₂ globales para este sector disminuyeron de 7.7 Gt a 7.1 respecto de 2020, gracias a las restricciones de movilidad impuestas por la pandemia de covid-19 [2]. La descarbonización en este sector, de acuerdo con el NZE, depende de dos cambios principales: uno es el uso prioritario de vehículos eléctricos y celdas de hidrógeno para la movilidad por carretera; el otro, la mezcla y aprovechamiento de combustibles de bajas emisiones, tales como los biocombustibles.

En específico, la aviación depende en gran parte del petróleo, ya que la turbosina, el combustible de los aviones, es de origen fósil. Como ocurrió en su contraparte terrestre, las emisiones aeronáuticas de CO₂ disminuyeron tras las restricciones sanitarias de movilidad; aunque, también hubo un aumento de actividad en el tráfico de pasajeros, del 21.8 en 2021 a 64.2 % en 2022 (Figura 1) [3].



FIGURA 1.
Tráfico anual
de pasajeros a nivel
mundial. Adaptado
de [3].



De acuerdo con la IEA, el crecimiento de la actividad del sector aviación se mantendrá alrededor del 2.5 % anual hasta 2050, tendencia que se ha observado desde 2019. En este contexto, el combustible sustentable de aviación (SAF), también conocido como bioturbosina, es una alternativa para satisfacer las necesidades energéticas resultantes [2], [4]. En contraste, la turbosina convencional, destilada a partir del petróleo, se estructura por cadenas de hidrocarburos del C_8 a C_{16} y tiene como principales componentes químicos a los alcanos, isoalcanos, naftenos y aromáticos. La bioturbosina consta también de cadenas de hidrocarburos en el rango de puntos de ebullición del C_8 a C_{16} , pero se produce a partir de biomasa, contiene menos azufre (por lo que genera menos emisiones contaminantes) y puede o no contener compuestos aromáticos, dependiendo de la materia prima y la ruta de procesamiento [5]. Además, las emisiones de dióxido de carbono relacionadas con la producción y uso de combustibles sustentables de aviación son entre 12 y 56 % menores que las reportadas para el combustible de aviación convencional [5].

El uso del SAF se acelerará en 2030; de hecho, se estima que en ese año más del 10 % del combustible de aviación será sustentable [2]. Además, se prevé que, para 2050, el SAF cubrirá casi el 45 % de la demanda, y los combustibles sintéticos con base en hidrógeno otro 25 %. En la actualidad se cuenta con inversiones en instalaciones, políticas, normas y créditos fiscales para favorecer la producción de SAF bajo criterios sustentables. Sin embargo, existen condicionantes para la viabilidad de los biocombustibles de aviación: deben ser producidos de recursos renovables no comestibles, reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y ser compatibles con los combustibles convencionales [6]. Otro aspecto por atender acerca del SAF es el costo de producción, el cual depende de las rutas de procesamiento empleadas.



Rutas de procesamiento

Existen diferentes métodos para la producción de bioturbosina. De acuerdo con la iniciativa de combustibles alternativos para la aviación comercial (CAAFI) las rutas certificadas se basan en la normativa ASTM D4054 [7] (Tabla 1). La producción de bioturbosina contempla procesos biológicos, químicos, bioquímicos y termoquímicos [6], [8]. Asimismo, la composición del SAF puede variar su contenido de aromáticos, debido a las propiedades de las materias primas y el método empleado. El contenido de los compuestos aromáticos no afecta las propiedades del biocombustible; sin embargo, la norma ASTM D7566 determina que el volumen máximo permisible de bioturbosina depende del contenido de aromáticos, dado que debe tenerse un contenido mínimo de 8.4 % vol. en el tanque [7], [9], [10]. Bajo esta perspectiva, de todas las rutas de procesamiento listadas en la Tabla 1, el hidrotreamiento de aceites y grasas es la más directa, económica y competitiva en el mercado.

TABLA 1.

Rutas de producción certificadas. Adaptado de [7]

RUTA DE PRODUCCIÓN	MATERIA PRIMA	MEZCLA MÁXIMA CON TURBOSINA CONVENCIONAL	AÑO DE APROBACIÓN
Keroseno parafínico sintético obtenido por síntesis de Fischer-Tropsch (FT-SPK)	Residuos de cultivos y sólidos	50 %	2009
Keroseno parafínico sintético obtenido por ácidos grasos y ésteres hidroprocesados (HEFA-SKP)	Lípidos	50 %	2011
Isoparafina sintética obtenida por azúcares fermentados hidroprocesados (HFS-SIP)	Azúcares y almidones fermentados	10 %	2014
Keroseno parafínico sintético con aromáticos obtenido por síntesis de Fischer-Tropsch (FT-SPK/A)	Residuos de cultivos y sólidos	50 %	2015
Keroseno parafínico sintético obtenido por alcohol (ATJ-SPK)	Azúcares y almidones fermentados	50 %	2016
Keroseno sintético obtenido por hidrotermólisis catálisis (CH-SK)	Lípidos	50 %	2020



RUTA DE PRODUCCIÓN	MATERIA PRIMA	MEZCLA MÁXIMA CON TURBOSINA CONVENCIONAL	AÑO DE APROBACIÓN
Keroseno parafínico sintético obtenido por hidrocarburos, ácidos grasos y ésteres hidroprocesados (HHC-SPK o HC-HEFA-SPK)	Algas	10 %	2020
Keroseno sintético con aromáticos obtenidos a partir de alcohol (ATJ-SKA)	Azúcares y almidones fermentados	50 %	2023

Por otro lado, las materias primas para la producción de SAF se clasifican por generaciones [8]. La primera comprende los productos comestibles como el maíz y la canola, pero su uso compite con la seguridad alimenticia y no se consideran viables por cuestiones éticas y legislativas en México. En adición, el aceite está compuesto por triglicéridos y ácidos grasos libres [11]. La segunda incluye materias con alto contenido de ácidos grasos que pueden convertirse en biocombustibles por medio del hidrotratamiento: biomasa lignocelulósica (como restos de cultivos), aceites residuales (de cocina o grasas animales) y aceites de cultivos no comestibles (como el de *Jatropha curcas* o *Ricinus communis*) que, aunque no entran en competencia directa con la industria alimenticia, sí requieren uso de suelo y agua para las cosechas; cabe añadir que también se procesan los residuos generados en los diferentes sectores económicos. Finalmente, la tercera generación consiste en microorganismos, tales como las algas, que contienen altos niveles de aceite, no requieren tierras cultivables y absorben CO₂ durante su crecimiento.

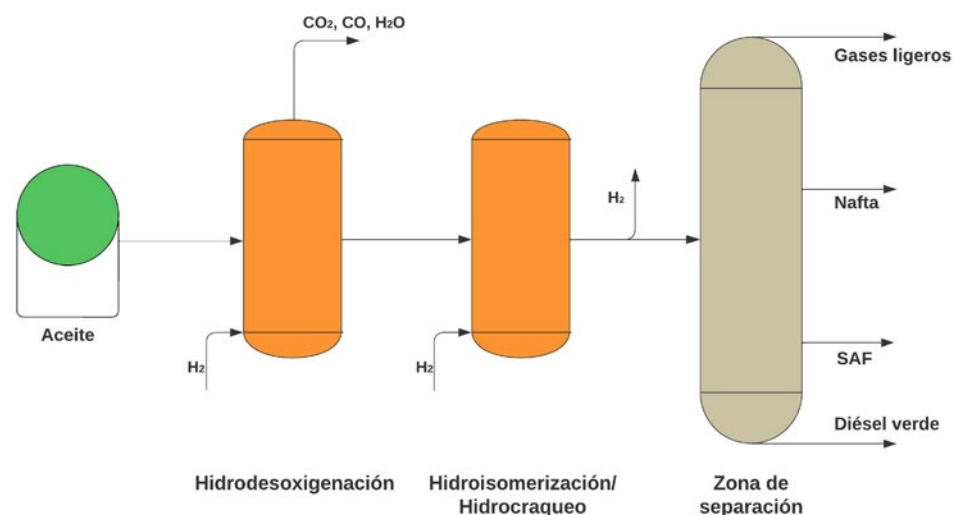
Proceso de hidrotratamiento

En el hidroprocesamiento los triglicéridos son transformados a SAF mediante procesos secuenciales con presencia del hidrógeno [5]: hidrodeseoxigenación, hidroisomerización e hidrocrackeo; como resultado se obtienen SAF, gases ligeros, naftas y diésel verde, que a su vez se separan a través de columnas de destilación. Asimismo, según las condiciones del proceso, catalizador y el tipo de materia prima utilizada, el SAF tendrá o no componentes aromáticos. En la Figura 2 se ilustra el hidrotratamiento para la producción de SAF. La hidrodeseoxigenación es una etapa fundamental, ya que consiste en remover el oxígeno presente de la materia prima para alcanzar el punto de congelación. Los productos de la reacción son hidrocarburos de cadena larga similares al diésel, junto con CO₂, H₂O y CO [5]. En la segunda etapa reactiva, es necesario seccionar esas cadenas en un rango de C₈ a C₁₆ mediante el hidrocrackeo y, posteriormente, isomerizarlas mediante la hidroisomerización.



Las condiciones operativas comunes para el hidrotreamiento incluyen presiones mayores a 20 bar con un rango de temperatura 300-350 °C, dependiendo de la materia prima y catalizador empleados. Sumado a ello, los catalizadores con mejor desempeño tanto en los hidrocarburos de origen fósil como en la producción de biocombustible son Pd/C y $\text{CoMo}/\gamma\text{-Al}_{203}$ [5].

FIGURA 2.
Proceso convencional del hidrotreamiento.
Adaptado de [5].



El uso de residuos para la producción de bioturbosina se destaca, pues el costo asociado a la materia prima puede representar hasta el 90 % del costo total anual del hidrotreamiento [5]. Este tipo de materia prima es una opción promisoriosa debido a que es asequible, pero sí debe considerarse el valor de la logística de recolección, así como del acondicionamiento de la materia prima. La Tabla 2 muestra las materias primas estudiadas por diversos autores para la obtención de SAF mediante el hidrotreamiento de ésteres y ácidos grasos, las cuales son en su mayoría lípidos residuales o aceites por pirólisis de desechos agrícolas en peso seco.

TABLA 2.
Materias primas residuales reportadas para la producción de SAF por hidrotreamiento.

MATERIA PRIMA	TEMPERATURA (°C)	PRESIÓN (BAR)	REQUERIMIENTO DE HIDRÓGENO	CATALIZADOR	RENDIMIENTO SAF (%)	REFERENCIA
Aceite residual de cocina	275	75.8	50 ml H_2 / 50 ml aceite	CoMoS	95.00	[12]
Aceite de naranja	60	12	No especificado	Pt/ Al_2O_3	54.20	
Grasa de pollo	480	60	450 v H_2 /v aceite	NiW/ $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$	47.46	



MATERIA PRIMA	TEMPERATURA (°C)	PRESIÓN (BAR)	REQUERIMIENTO DE HIDRÓGENO	CATALIZADOR	RENDIMIENTO SAF (%)	REFERENCIA
Grasa animal	400	40	1000 ml H ₂ /ml aceite	Pt/SAPO-11	Pt/SAPO-11	
Aceite residual de cocina	380	30.39	250 ml H ₂ /ml aceite	USY-AL-SBA-15 Ni/Mo	39.7	
Aceite residual vegetal	380-430	10-20	No especificado	Zirconia Sulfatada (HZSM-5); Catalizador Híbrido (HZSM-5)	10.65	[13]
Aceite de rastrojo de maíz	573	50	No especificado	Ni/ZrO ₂	90 (diésel y SAF)	
Aceite residual de cocina	400	30	350 ml H ₂ / ml aceite	Meso-Y; SAPO-34; HY	40.5	
Aceite residual de soya y palma	270	15	300 - 400 m ³ H ₂ / m ³ aceite	pd/beta-zeolita	40	
Aceite residual de cocina	390	138	1,068 nm ³ / m ³ aceite	Comercial presulfurizado + DMDS + TBA	<16.4	[14]
Aceite residual de cocina	380	30	250 ml H ₂ /ml aceite	NiMo/ USY@Al-SBA-15	30.54	[15]
Aceite residual del molido de palma	400	10	No especificado	Pd/Al ₂ O ₃	54	[16]
Aceite de cáscara de arroz	380	40	Relación H ₂ / aceite 1000	NiAg/SAPO-11	5.26	[17]
Aceite residual de cocina	360	450	No especificado	NiO-LizSM-5	80.42 % mol	[18]
Manteca residual de cerdo	400	50	Relación H ₂ / aceite 1000	Pt/SAPO-11	48.55	[19]
Aceite residual de girasol	550	No especificado	1000 ncm ³ / cm ³ aceite	ZSM-5	14.08	[20]
Aceite de semilla de algodón	500-550	No especificado	No especificado	WT	6.84	[21]



MATERIA PRIMA	TEMPERATURA (°C)	PRESIÓN (BAR)	REQUERIMIENTO DE HIDRÓGENO	CATALIZADOR	RENDIMIENTO SAF (%)	REFERENCIA
Aceite residual de soya	370	50	Relación H ₂ /aceite 1500 ml	Ni-w/ SiO ₂ -Al ₂ O ₃	51.4	[22]
Aceite residual de cocina	420	100	H ₂ /aceite = 2200 NLgas/Líquido	Ni-Mo/ Sílica-alúmina	53.7	[23]
Aceite de residuos de cultivos	280	60	750 v H ₂ /v aceite	Pt/Al ₂ O ₃	87	[24]

En los estudios reportados se emplean triglicéridos de diferentes fuentes, puesto que la conversión de estos lípidos es la ruta más corta para la producción de bioturbosina, con hasta 95 % de rendimiento [12]. De modo similar, el uso de aceites obtenidos por pirólisis de residuos como el rastrojo de maíz reportado por [13] presenta un rendimiento productivo del 90 % diésel y SAF en conjunto. Además, el aceite obtenido por medio de la pirólisis, utilizando la semilla del algodón reportado por [21] obtuvo un rango parcial de bioturbosina (C₉-C₁₆), con 6.84 % de rendimiento. No obstante, la pirólisis conlleva un alto consumo energético y, como consecuencia, una producción costosa, debido al bajo porcentaje de aceite extraíble. Además, se pueden considerar combinaciones de cultivos como en el trabajo de [24], donde se reporta una conversión del 87 %. También pueden procesarse lípidos de organismos como insectos, microalgas de efluentes residuales o microbios, cuyo aceite generado a partir de sus bioprocesos incrementa la disponibilidad de triglicéridos renovables diferentes a materias agrícolas. En este sentido, sobresale el tratamiento biológico de los residuos orgánicos mediante la cría de insectos [12].

Materias primas de grasas de insectos

Las granjas de entomocultivo han captado interés debido al bajo requerimiento de tierra y agua para su desarrollo; asimismo, los insectos se alimentan con residuos alimenticios pre o posconsumo [25]. Aunque las especies *Tenebrio molitor* L., *Hermetia illucens* L. y *Musca domestica* L. han sido las más estudiadas como fuente de alimento para la agricultura, también son útiles para la producción de biocombustibles gracias a su contenido lipídico. En especial, las larvas de *Hermetia illucens* L. (LMSN, larva de mosca soldado negra) han recibido atención como materia prima para la producción de biocombustibles [26]. Dicha especie prospera en residuos orgánicos procesables para la generación de carbohidratos, lípidos y proteínas [12], [26], [27].

TABLA 3.

Rendimiento en la extracción de grasa por producción anual y tiempo de crecimiento. Adaptado de [5].

	CONTENIDO DE GRASA %	PRODUCCIÓN DE GRASA (L/HA/AÑO)	TIEMPO DE CRECIMIENTO
LMSN	30-40	193 560 600	22-24 días
Microalgas (30 % contenido de lípidos)	30	58 700	6-15 días
Ricino	50	1413	3-5 meses

Por otra parte, se recopilan en la Tabla 3 las alternativas potenciales para la extracción de triglicéridos en la producción de SAF [5]; cabe destacar que el aceite de la LMSN tiene en promedio un 15 % menos grasa que el de ricino. Además, la LMSN presenta la mayor (3219.84 veces) producción anual por hectárea en comparación con las otras materias primas listadas.

En la revisión de la literatura se ha utilizado el tratamiento biológico de extracción de lípidos para producir SAF a partir de la *Salicornia sp.* [12], [28]. Según el conocimiento de los autores, no se han encontrado otros estudios relacionados con la producción de SAF a partir de aceites de insectos utilizando el mismo método. Empero, la LMSN es una alternativa promisoriosa para la generación de bioturbosina, debido a su elevada producción por hectárea.

En los últimos 30 años se ha analizado la LMSN por su potencial de reducir cantidades ingentes de materia orgánica. La mosca soldado negra no representa una plaga y habita regiones templadas, cálidas, tropicales y subtropicales [25], [30]. Su alimentación convencional es la dieta Gainesville, equilibrada y controlada para mantener artificialmente una colonia de LMSN, y compuesta por 50 % de trigo, 30 % de alfalfa y 20 % de maíz [25], [31], [32]. Los productos de la crianza de LMSN incluyen harinas con alto contenido proteínico, grasas para la producción de biodiésel y fertilizantes. Cabe resaltar que las larvas son ricas en lípidos tras la degradación de residuos [25], [29].

El ciclo de vida del insecto abarca cuatro etapas: huevecillo, larva, pupa y adulto. En la adultez, se reproduce poniendo los huevecillos en los hábitats de la colonia de larvas. La transformación de pupa a mosca se denomina proceso de *pupación* [29],



[30]. Se cría durante 2 a 4 semanas, dependiendo de factores como temperatura, iluminación, humedad y disponibilidad de alimentos. Para obtener el mayor beneficio de grasas del insecto es necesario separar las larvas de la materia orgánica antes de la pupación; hasta ese punto, se alimenta de la materia orgánica disponible [27], [31].

Por medio de la cría de LMSN se logran altos porcentajes de reducción de residuos. A modo de ejemplo, el volumen se reduce un 73 % en peso húmedo en el caso de los vegetales, y en 59 % para la industria cervecera [33]. Este insecto digiere el alimento en la etapa larval, convirtiendo los carbohidratos y grasas del residuo en

TABLA 4.

Condiciones de crecimiento, reducción del residuo y extracción de LMSN en diferentes sustratos reportados.

MATERIA PRIMA	T (°C)	HR (%)	CRECIMIENTO PREPUPAL (DÍAS)	REDUCCIÓN DEL SUSTRATO (%)	ÍNDICE DE REDUCCIÓN DEL SUSTRATO (G/KG)	LÍPIDOS SATURADOS (%)	LÍPIDOS INSATURADOS (%)	RENDIMIENTO DE LÍPIDOS (%)	REFERENCIA
Suero de queso	32	70	11	-	2.73	63.82	36.18	42.48	[36]
Granos gastados de cerveza	27	60 - 70	18	66	-	67.30	32.70	12.8 base húmeda	[37]
Residuos de tomate	27	60 - 70	18	59	-	42.50	56.80	11.5 base húmeda	[37]
Residuos de fruta	27	70	16	70.8	3.2	81.88	18.12	40.70	[38]
Residuos de restaurante	27	65	18	-	-	78.29	21.42	38.60	[39]
Mezcla de residuos de frutas, vegetales, panadería y cerveceros	27	70	10	67.76	-	-	-	35.99	[40]
Residuos cerveceros	27	70	8	42.50	5.3	61.25	38.76	29.87	[38]
Residuos cerveceros	28	60	16	44.70	-	-	-	27.20	[41]
Granos gastados de cerveza	27	70	16	-	-	69.89	30.49	24.85	[42]
Granos de cerveza	25	60	22	-	3.01	-	-	23.20	[43]



grasa corporal a través de su rápido metabolismo [27], [34]. Al respecto, se ha reportado que el porcentaje de grasa de este insecto oscila entre 30 y 40 % [34], [35]. En la Tabla 4 se muestran condiciones de crecimiento de LMSN en diferentes sustratos experimentales, así como la disminución del residuo y los rendimientos de aceite en peso seco.

Al analizar la Tabla 4, se observa que los mayores rendimientos lipídicos en los sustratos experimentales surgen de residuos frutales [38] y lignocelulósicos (pan y bagazo de malta) [40]. Por otro lado, los sustratos cerveceros rinden entre el 23 y 30 % de lípidos, teniendo [38] el rendimiento más alto en peso seco. De los datos reportados, los aceites saturados predominan (entre 60 y 80 %) sobre los insaturados (del 20 al 40 %) para los residuos de frutas y malta gastada. Asimismo, el perfil de ácidos grasos varía entre cada sustrato; no obstante, los ácidos grasos con mayor presencia son el láurico (C12:0) y el palmítico (C16:0), tanto para los sustratos de residuos de frutas como los granos gastados de cerveza [36], [37], [39]. En particular, respecto a los compuestos reportados en granos gastados de cerveza, además de los químicos ya mencionados se detecta ácido oleico (C18:1), linoleico (C18:2) y omega 9 (C18:1 n9), los cuales también varían entre sustratos y pretratamientos [37], [38], [42].

Por otra parte, el modelo experimental de [36] consistió en reemplazar el 70 % de agua por suero de queso en la dieta Gainesville. El alto valor nutricional del suero facilitó la conversión del sustrato en lípidos almacenados por la LMSN. Aunado a esto, se reportó una variable en las condiciones de cría (32 °C) que modificó el tiempo de crecimiento y rendimiento de lípidos en ese sustrato experimental (Tabla 4). En paralelo con la misma línea de variación térmica, el tiempo de crecimiento a la etapa prepupal fue mayor en [43], donde se observó el peor aprovechamiento lipídico larval en conjunto con una baja humedad. También se ha reportado el crecimiento de LMSN en diferentes temperaturas (de 30 a 90 °C) por tiempos determinados con resultados favorables en las macromoléculas de proteínas y lípidos [32].

Perspectivas

Como ya se ha establecido, la ruta más breve para producir bioturbosina a partir de triglicéridos es el hidropocesamiento, donde la materia prima puede representar hasta el 90 % del costo total de producción. Por tanto, se ha incentivado la búsqueda de nuevas materias primas residuales; destacan los aceites de cocina, cuyo costo es menor comparado con la extracción de aceites de cultivos no co-



mestibles. Otra materia prima residual que se ha considerado en la obtención de SAF es aquella que contiene grasa de animales; asimismo, se ha reportado el uso de desechos provenientes de cultivos lignocelulósicos. No obstante, dado el bajo porcentaje de lípidos en la composición química de dicha fuente, es necesario someterla a un proceso de pirólisis que requiere un elevado consumo energético. En síntesis, la producción de SAF se puede ver limitada por la disponibilidad de aceites y grasas remanentes.

Aunque los insectos ocupan un nicho esencial en los ecosistemas, específicamente en la reducción de residuos orgánicos transformables en grasas, proteínas y otros nutrientes, se estima que más de la mitad de especies que existen en el planeta no han sido descubiertas [44]. La comunidad científica se ha enfocado en aquellas con capacidad de almacenar considerables porcentajes de lípidos y reducir materia orgánica. En tal contexto, hay varios aspectos que determinan la crianza a nivel industrial: la factibilidad de mantener colonias de huevecillos, el conocimiento de condiciones ambientales óptimas para su crecimiento en cautiverio, el ciclo de vida del insecto, el control de calidad, así como los sistemas de limpieza y prevención de enfermedades [44]. Al momento, solo se ha reportado el uso del aceite de la LMSN para la producción de biodiésel [44].

Un área de oportunidad es la producción de hidrocarburos renovables a partir del aceite de la LMSN. Dentro de estos hidrocarburos se pueden mencionar las gasolinas, el diésel verde y, por supuesto, el SAF, cuya demanda ha sufrido un incremento considerable. Dada la abundancia de materiales lignocelulósicos, su tratamiento biológico posibilita obtener grasas útiles para producir hidrocarburos menos agresivos con el ambiente. En su mayoría, la lignocelulosa está disponible en todos los países y pueden establecerse cadenas locales de suministro de biocombustibles, siempre y cuando se impulse la crianza a nivel industrial de insectos que la procesen [44].

Conclusiones

El sector de la aviación está buscando alternativas que satisfagan la demanda global de SAF a corto plazo para reducir las emisiones contaminantes. Pese a ello, el SAF aún no es económicamente competitivo frente a la turbosina fósil debido al alto costo y la baja disponibilidad de las materias primas, como aceites y grasas. En este sentido, se ha explorado el uso de aceites y grasas residuales, ya que su costo es menor, mas la disponibilidad permanece limitada. En contraste, los residuos lignocelulósicos son una fuente más abundante, aunque menos rica en aceites. Una opción para aprovecharlos es someterlos a tratamientos biológicos, utilizán-



dolos como dietas para microorganismos e insectos. La LMSN en particular puede generar un importante contenido de lípidos al mismo tiempo que degrada los residuos. Este enfoque abre una brecha en la investigación para diversificar las fuentes de lípidos y promover la producción sostenible de SAF, reduciendo la dependencia de los recursos no renovables.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo financiero brindado por el Grupo Procesos Sustentables de Producción de Bioproductos de la Universidad Autónoma de Querétaro, así como a la Facultad de Ingeniería misma casa de estudios por las becas de manutención y colegiaturas, respectivamente, otorgadas a J. J. Reséndiz Luna.

Referencias

- [1] International Energy Agency, "Executive summary-World Energy Outlook 2022 - Analysis", IEA. Paris, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022?language=es>.
- [2] International Energy Agency (IEA) World Energy Outlook 2022", *World Energy Outlook 2022*, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>.
- [3] IATA- Sustainability and Economics, "IATA Global Outlook for Air Transport Industry Statistics Fact Sheet", 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.iata.org/en/iata-repository/pressroom/fact-sheets/industry-statistics/>.
- [4] J. Yang, Z. Xin, Q. He, K. Corscadden y H. Niu, "An overview on performance characteristics of bio-jet fuels", *Fuel*, vol. 237, pp. 916-936, 2019, doi: 10.1016/j.fuel.2018.10.079
- [5] C. Gutiérrez Antonio, A. G. Romero Izquierdo, F. I. Gómez Castro y S. Hernández, *Production Processes of Renewable Aviation Fuel*. Elsevier, 2021.
- [6] N. Yilmaz y A. Atmanli, "Sustainable alternative fuels in aviation", *Energy*, vol. 140, pp. 1378-1386, 2017, doi: 10.1016/j.energy.2017.07.077
- [7] CAAFI, "CAAFI - Focus Area - Fuel Qualification", Fuel Qualification, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.caafi.org/fuel-qualifications>.
- [8] H. Wei, W. Liu, X. Chen, Q. Yang, J. Li y H. Chen, "Renewable bio-jet fuel production for aviation: A review", *Fuel*, vol. 254, art. 115599, 2019, doi: 10.1016/j.fuel.2019.06.007
- [9] A. R. De Toni, L. R. Cancino, A. A. M. Oliveira, E. Oliveira y M. I. Rocha, "Conventional and alternative aviation fuels: An overview on composition, properties and aircraft engine test", *15th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering*, pp. 1-8, 2014.
- [10] A. L. Moreno Gómez, C. Gutiérrez Antonio, F. I. Gómez Castro y S. Hernández, "Modelling, simulation and intensification of the hydroprocessing of chicken fat to produce renewable aviation fuel", *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, vol. 159, art. 108250, 2021, doi: 10.1016/j.cep.2020.108250
- [11] P. Mäki Arvela, M. Martínez Klimov y D. Y. Murzin, "Hydroconversion of fatty acids and vegetable oils for production of jet fuels", *Fuel*, vol. 306, art. 121673, 2021, doi: 10.1016/j.fuel.2021.121673.
- [12] F. I. Gómez Castro, C. Gutiérrez Antonio, A. G. Romero Izquierdo, M. M. May Vázquez y S. Hernández, "Intensified technologies for the production of triglyceride-based biofuels: Current status and future trends", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 184, art. 113580, 2023, doi: 10.1016/j.rser.2023.113580
- [13] A. L. Moreno Gómez, C. Gutiérrez Antonio, F. I. Gómez Castro y S. Hernández, "Production of Biojet Fuel from Waste Raw Materials", *Process Systems Engineering of Biofuels Development*, pp. 149-171, 2020, doi: 10.1002/9781119582694.ch6
- [14] C. Gutiérrez Antonio, F. I. Gómez Castro, J. A. de Lira Flores y S. Hernández, "A review on the production processes of renewable jet fuel", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 79, pp. 709-729, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.05.108
- [15] M. T. Carrasco Suárez, A. G. Romero Izquierdo, C. Gutiérrez Antonio, F. I. Gómez Castro y S. Hernández, "Production of renewable aviation fuel by waste cooking oil processing in a biorefinery scheme: Intensification of the purification zone", *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, vol. 181, art. 109103, 2022, doi: 10.1016/j.cep.2022.109103



- [16] P. Muanruksa, J. Winterburn y P. Kaewkanetra, "Biojet fuel Production from Waste of Palm Oil Mill Effluent through Enzymatic Hydrolysis and Decarboxylation", *Catalysts*, vol. 11, núm. 1, pp. 1-10, 2021, doi: 10.3390/catal11010078
- [17] Y. K. Chen, C. H. Lin y W. C. Wang, "The conversion of biomass into renewable jet fuel", *Energy*, vol. 201, art. 117655, 2020, doi: 10.1016/j.energy.2020.117655
- [18] M. Li *et al.*, "A novel catalyst with variable active sites for the direct hydrogenation of waste oils into jet fuel", *Applied Catalysis B: Environmental*, vol. 260, art. 118114, 2020, doi: 10.1016/j.apcatb.2019.118114
- [19] X. Zhang *et al.*, "One-step preparation of biological aviation kerosene by catalytic hydrogenation of waste lard over Pt/SAPO-11", en *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 93, núm. 1, 2017, [En línea]. Disponible en: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/93/1/012003/pdf>.
- [20] X. Zhao, L. Wei, J. Julson, Q. Qiao, A. Dubey y G. Anderson, "Catalytic cracking of non-edible sunflower oil over zsm-5 for hydrocarbon bio-jet fuel", *New Biotechnology*, vol. 32, núm. 2, pp. 300-312, 2015, doi: 10.1016/j.nbt.2015.01.004
- [21] T. G. dos S. Souza, B. L. P. Santos, A. M. A. Santos, A. M. G. P. de Souza, J. Correia de Melo y A. Wisniewski, "Thermal and catalytic micropyrolysis for conversion of cottonseed oil dregs to produce biokerosene", *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 129, pp. 21-28, 2018, doi: 10.1016/j.jaap.2017.12.010
- [22] A. G. Romero Izquierdo, C. Gutiérrez Antonio, F. I. Gómez Castro y S. Hernández, "Hydro-treating of Triglyceride Feedstock to Produce Renewable Aviation Fuel", *Recent Innovations in Chemical Engineering (Formerly Recent Patents on Chemical Engineering)*, vol. 11, núm. 2, pp. 77-89, doi: 10.2174/2405520411666180501110716
- [23] V. Verma, A. Mishra, M. Anand, S. A. Farooqui y A. K. Sinha, "Catalytic hydroprocessing of waste cooking oil for the production of drop-in aviation fuel and optimization for improving jet biofuel quality in a fixed bed reactor", *Fuel*, vol. 333, núm. 1, art. 126348, 2023, doi: 10.1016/j.fuel.2022.126348
- [24] N. Vela García, D. Bolonio, M. J. García Martínez, M. F. Ortega, D. Almeida Streitwieser y L. Canoira, "Biojet fuel production from oleaginous crop residues: thermo-economic, life cycle and flight performance analysis", *Energy Conversion and Management*, vol. 244, art. 114534, 2021, doi: 10.1016/j.enconman.2021.114534
- [25] M. Meneguz, L. Gasco y J. K. Tomberlin, "Impact of pH and feeding system on BSF larval development", *PLOS One*, vol. 13, núm. 8, pp. 1-15, 2018, doi: 10.1371/journal.pone.0202591
- [26] V. Caltzontzin Rabell, C. Gutiérrez Antonio, J. F. García Trejo y A. Feregrino Pérez, "Effect of whey addition on the growth and proximal composition of black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae", en *XVII Congreso Internacional de Ingeniería*, pp. 1-6, 2022.
- [27] D. Bruno *et al.*, "An in-depth description of head morphology and mouthparts in larvae of the black soldier fly *Hermetia illucens*", *Arthropod Structure and Development*, vol. 58, art. 100969, 2020, doi: 10.1016/j.asd.2020.100969
- [28] M. Fredsgaard, L. S. S. Hulkko, T. Chaturvedi y M. H. Thomsen, "Process simulation and techno-economic assessment of *Salicornia* sp. based jet fuel refinery through *Hermetia illucens* sugars-to-lipids conversion and HEFA route", *Biomass and Bioenergy*, vol. 150, art. 106142, 2021, doi: 10.1016/j.biombioe.2021.106142
- [29] W. Feng *et al.*, "Polymer functionalization of biochar-based heterogeneous catalyst with acid-base bifunctional catalytic activity for conversion of the insect lipid into biodiesel", *Arabian Journal of Chemistry*, vol. 16, núm. 7, art. 104814, 2023, doi: 10.1016/j.arabjch.2023.104814
- [30] Q. Li, L. Zheng, N. Qiu, H. Cai, J. K. Tomberlin y Z. Yu, "Bioconversion of dairy manure by black soldier fly (*Diptera: Stratiomyidae*) for biodiesel and sugar production", *Waste Management*, vol. 31, núm. 6, pp. 1316-1320, 2011, doi: 10.1016/j.wasman.2011.01.005
- [31] D. Purkayastha y S. Sarkar, "Sustainable waste management using black soldier fly larva: a review", *International Journal of Environmental, Science and Technology*, vol. 19, núm. 12, 2021, doi: 10.1007/s13762-021-03524-7
- [32] C. S. Liew *et al.*, "Low-temperature thermal pre-treated sewage sludge for feeding of black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae: Protein, lipid and biodiesel profile and characterization", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 178, 2022, art. 113241, 2023, doi: 10.1016/j.rser.2023.113241
- [33] M. V. Oviedo, J. F. García y C. Gutierrez, "Mosca soldado negra: eslabón perdido en la cadena de revalorización de residuos orgánicos", *Ciencia*, vol. 73, pp. 52-59, 2022, [En línea]. Disponible en: https://www.revistaciencia.amc.edu.mx/images/revista/73_3/PDF/09_73_3_1304.pdf.
- [34] S. Jung *et al.*, "Biodiesel production from black soldier fly larvae derived from food waste by non-catalytic transesterification", *Energy*, vol. 238, art. 121700, 2022, doi: 10.1016/j.energy.2021.121700
- [35] E. K. Sitepu *et al.*, "Controlled crushing device-intensified direct biodiesel production of Black Soldier Fly larvae", *Heliyon*, vol. 9, núm. 6, art. e16402, 2023, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e16402
- [36] V. Caltzontzin Rabell, A. Escobar Ortiz, C. Gutiérrez Antonio, A. A. Feregrino Pérez y J. F. García Trejo, "Revaluation process of cheese whey through the cultivation of black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*)", *Engineering Reports*, pp. 1-12, 2024, doi: 10.1002/eng2.12853
- [37] J. Hadj Saadoun *et al.*, "Lipid profile and growth of black soldier flies (*Hermetia illucens*, *Stratiomyidae*) reared on by-products from different food chains", *Journal of the Science of Food and Agriculture*, vol. 100, núm. 9, 2020, doi: 10.1002/jsfa.10397



- [38] M. Meneguz *et al.*, "Effect of rearing substrate on growth performance, waste reduction efficiency and chemical composition of black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae", *Journal of the Science of Food and Agriculture*, vol. 98, núm. 15, 2018, doi: 10.1002/jsfa.9127
- [39] T. Sprangers *et al.*, "Nutritional composition of black soldier fly (*Hermetia illucens*) prepupae reared on different organic waste substrates", *Journal of the Science of Food and Agriculture*, núm. 97, 2017. [En línea]. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27734508/>.
- [40] G. Arabzadeh *et al.*, "Diet Composition Influences growth Performance, Bioconversion of Black Soldier Fly Larvae: Agronomic Value and In Vitro Biofungicidal Activity of Derived Frass", *Agronomy*, vol. 12, núm. 8, 2022, doi: 10.3390/agronomy12081765
- [41] E. M. Nyakeri, H. J. O. Ogola, M. A. Ayieko y F. A. Amimo, "Valorisation of organic waste material: growth performance of wild black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*) reared on different organic wastes", *Journal of Insects as Food and Feed*, vol. 3, núm. 3, pp. 193-202, 2017, doi: 10.3920/JIFF2017.0004
- [42] C. Ceccotti *et al.*, "New value from food and industrial wastes - Bioaccumulation of omega-3 fatty acids from an oleaginous microbial biomass paired with a brewery by-product using black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae", *Waste Management*, vol. 143, pp. 95-104, 2022, doi: 10.1016/j.wasman.2022.02.029
- [43] L. Bava *et al.*, "Rearing of *Hermetia Illucens* on Different organic by-products: Influence on Growth, Waste Reduction, and Environmental impact", *Animals*, vol. 9, núm. 6, 2019, doi: 10.3390/ani9060289
- [44] F. Manzano Agugliaro, M. J. Sanchez Muros, F. G. Barroso, A. Martínez Sánchez, S. Rojo y C. Pérez Bañón, "Insects for biodiesel production", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, núm. 6, 2012, doi: 10.1016/j.rser.2012.03.017



PERSPECTIVAS DE LA
CIENCIA Y LA TECNOLOGÍA

¿Quieres publicar en esta revista?

¿Dudas o sugerencias? Escríbenos a:

 perspectivasci@uaq.mx

REVISTA INCLUIDA EN:



VISITA NUESTRO

FISIÓN
PODCAST

Escucha de la voz de
los autores, entrevistas
y comentarios
relacionados a sus
artículos.

Disponible en:

MÁS REVISTAS UAQ EN:



revistas.uaq.mx



ingenieria.uaq.mx

EDICIÓN CUIDADA, DISEÑADA
Y MAQUETADA POR

 **DESPACHO DE
PUBLICACIONES**

Visítanos y conoce
las publicaciones que la
**FACULTAD DE INGENIERÍA DE LA
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
QUERETARO**
tiene para ti:



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO
FACULTAD DE INGENIERÍA