



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

“BIOCOMBUSTIBLES PARA AVIONES”

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO QUÍMICO

PRESENTA:

ARTURO GUILLERMO MELON LLAMAS

CIUDAD DE MEXICO, 2018





Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO

PRESIDENTE: Eduardo Bárzana Garcia

VOCAL: Jose Agustin Garcia Reynoso

SECRETARIO: Alejandra Castro González

1er SUPLENTE: Gema Luz Andraca Ayala

2do SUPLENTE: Alejandra Mendoza Campos

SITIO DONDE SE DESARROLLO EL TEMA:

Posgrado de la Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México. El tema se realizó bajo el proyecto SECITI 106/2016 “Producción de biodiésel a partir de aceites comestibles de desecho para uso automotriz para la Ciudad de México.

ASESORA DEL TEMA:

Dra. Alejandra Castro González

SUSTENTANTE:

Arturo Guillermo Melón Llamas

ÍNDICE

ÍNDICE DE TABLAS.....	IV
ÍNDICE DE FIGURAS	VI
RESUMEN	VII
INTRODUCCIÓN	VIII
OBJETIVO GENERAL.....	XI
Objetivos específicos	XI
CAPÍTULO 1 PROSPECTIVAS PARA LOS BIOCOMBUSTIBLES EN LA AVIACIÓN.....	1
1.1 Aspectos ambientales	4
1.2 Los aumentos en el transporte aéreo, en el uso de combustibles y la generación de las emisiones de gases de efecto invernadero.....	6
1.3 Planes para el control de las emisiones del CO₂ del transporte aéreo	8
1.3.1 Plan de la industria aérea.....	9
1.3.2 Plan comercial europeo de emisiones.....	11
1.3.3 Plan del Consejo Asesor de la Investigación Aeronáutica	12
1.3.4 Plan sobre de los biocombustibles en otros países	13
CAPÍTULO 2 MATERIAS PRIMAS PARA BIOCOMBUSTIBLES DE AVIACIÓN.....	16
2.1 Azúcares.....	17
2.2 Materias primas lignocelulósicas	20
2.2.1 Residuos agrícolas.....	21
2.2.2 Desperdicio de alimentos	21
2.2.3 Cultivos energéticos específicos	23
2.3 Los aceites triglicéridos	24
2.4 Las levaduras oleaginosas.....	27
2.5 Microalgas	30
2.5.1 Microalgas oleaginosas.....	30
2.5.2 Especies no oleaginosas.....	32
2.6 Algas marinas (macroalgas)	33
2.7 Desafíos y oportunidades	34
2.7.1 Ingeniería genética.....	35
2.7.2 Biodiversidad.....	36
2.7.3 Cambio indirecto en el uso de suelo.....	37
2.7.4 Consideraciones logísticas.....	38
2.7.5 Efecto del cambio climático y la mejora del rendimiento en la materia prima... ..	38
CAPÍTULO 3 TECNOLOGIAS DE PRODUCCIÓN	40
3.1 Fischer-Tropsch.....	42
3.2 Hidroprocesamiento de acidos grasos y sus ésteres	44
3.3 Fermentación	46
3.4 Proceso de oligomerización.....	47
3.5 Costos.....	49
CAPÍTULO 4 DESARROLLOS INTERNACIONALES	51

4.1 Vuelos con biocombustibles.....	52
4.2 Redes de biocombustibles.....	53
4.3 Certificación	54
4.4 Perspectiva Holandesa	60
4.5 Perspectivas en climas tropicales	62
4.5.1 Parte experimental del estudio de Hong y col.....	65
4.6 Biocombustibles en Brasil	68
CONCLUSIONES	79
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	82

ÍNDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 1.1 Planes sobre biocombustibles y sus principales objetivos.....	15
Tabla 2.1 Producción mundial de caña de azúcar.....	19
Tabla 2.2 Productores a nivel mundial de bioetanol a partir de caña de azúcar.....	20
Tabla 2.3 Cultivos energéticos y sus estadísticas vitales.....	24
Tabla 2.4 Producción de principales cultivos que generan biocombustibles.	28
Tabla 2.5 Composición de una variedad de especies de macroalgas.....	34
Tabla 3.1 Descripción general de rutas de producción de biocombustibles para aviación.....	41
Tabla 4.1 Reseña histórica de vuelos con biocombustible.....	52
Tabla 4.2 Principales acuerdos en Estados Unidos.....	55
Tabla 4.3 Principales acuerdos en Países Bajos.....	57
Tabla 4.4 Principales acuerdos en Europa.....	58
Tabla 4.5 Principales acuerdos en Oceanía y Asia.....	59
Tabla 4.6 Mercado de combustibles fósiles de Europa Occidental en 2012..	61
Tabla 4.7 Las propiedades comunes de Bio-P1, Bio-JP2 y Jet A-1.....	66

Tabla 4.8 Resultados experimentales de los criterios de calidad..... 66

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1.1 Concentración atmosférica de CO ₂ medida en Mauna Loa, Hawai.....	5
Figura 1.2 Emisiones de CO ₂ de la aviación internacional.....	8
Figura 1.3 Visión de la asociación internacional de transporte aéreo para la reducción de emisiones de GEI del 50% en 2050.....	11
Figura 2.1 Producción de residuos de alimentos.....	22
Figura 2.2 Producción mundial de aceites comestibles en 2013.....	27
Figura 3.1 Proceso Fischer Tropsch.....	44
Figura 3.2 Hidroprocesamiento de ácidos grasos y sus ésteres.....	45
Figura 3.3 Proceso de fermentación.....	47
Figura 3.4 Proceso de oligomerización del etanol.....	48
Figura 4.1 Etapas de transformación molecular del proceso de producción de bioparafinas.....	65
Figura 4.2 Evolución de la producción de caña de azúcar y etanol en Brasil entre 1970 y 2011.....	70
Figura 4.3 Perspectivas de la producción de etanol hasta 2022	70

RESUMEN

El presente trabajo expone un panorama general sobre el estatus y los avances actuales sobre los biocombustibles en el sector de la aviación. Actualmente el sector de la aviación representa el 2.5% de las emisiones de CO₂ relacionadas con el uso de energía y se estima que crezca 4.5% por año alcanzando valores de 1.8 billones de toneladas de emisiones de CO₂ para el año 2050. Ante esta problemática, los biocombustibles avanzados se presentan como una única opción viable para hacer frente al cambio climático, reducir los problemas de contaminación y la dependencia de los combustibles fósiles, proporcionando una reducción hasta un 90% en las emisiones en comparación con los combustibles fósiles. Existe una gran variedad de materias primas que se pueden utilizar en los diferentes procesos de producción, siendo los aceites vegetales la principal hoy en día. Por su parte, cuatro rutas de producción se han certificado con la norma ASTM D7566, el biocombustible generado mediante el proceso Fischer Tropsch, el biocombustible generado mediante el proceso de hidrotratamiento de aceites vegetales y ácidos grasos y sus ésteres, el biocombustible generado mediante fermentación de azúcares, y el biocombustible generado a partir del proceso de obtención de alcohol, su deshidratación y oligomerización. A la luz de un gran avance de los biocombustibles en el sector de la aviación, los avances en la investigación, la inversión y los avances tecnológicos serán factores clave en la obtención y producción de biocombustibles más sustentables.

INTRODUCCIÓN

Los biocombustibles son combustibles renovables de origen vegetal o animal que vienen a sustituir a los combustibles fósiles tradicionales. Con ellos se busca reducir la huella de CO₂ generada y contribuir a la reducción del calentamiento global. Además, la producción y generación de biocombustibles es motivada por el incremento de los costos del petróleo y que pueden emplear las actuales redes de distribución de hidrocarburos, lo cual ofrece una clara ventaja frente a otros posibles combustibles.

En el caso de transporte terrestre existen grandes avances tecnológicos con el respaldo de una amplia investigación y literatura y mayor enfoque por parte de industrias y gobiernos desde hace aproximadamente 4 décadas lo que se refleja en tecnologías y procesos de producción de biocombustibles bien establecidos.

Por su parte, en el sector de la aviación el uso de biocombustibles es un tema relativamente nuevo y de menor enfoque que el transporte terrestre, pero que tiene gran importancia ante la problemática ambiental actual. Por este motivo se realizó una investigación sobre los principales avances a nivel mundial en este campo. En el capítulo 1 se muestran las perspectivas para los biocombustibles en la aviación, incluyendo los aspectos y problemas ambientales, el crecimiento en el transporte aéreo, el aumento de emisiones y los principales planes para el control de las emisiones de CO₂ en el transporte aéreo. En el capítulo 2 se señalan las diferentes materias primas como los azúcares, las materias primas lignocelulósicas, los aceites, las levaduras, las microalgas, las algas marinas y los diferentes desafíos y oportunidades que existen. Por su parte en el capítulo 3 se

explican las diferentes tecnologías de producción como son el proceso de Fischer tropsch, el hidrogenación de ácidos grasos y sus ésteres, el proceso de fermentación y el proceso de oligomerización. Finalmente, en el capítulo 4 se muestran los desarrollos internacionales, los vuelos realizados con este tipo de biocombustibles, las diferentes redes de biocombustibles, así como las perspectivas de países como Holanda y Brasil.

Además, dicha investigación tiene como objetivo ser fuente y base para futuras investigaciones y proyectos acerca del presente tema.

OBJETIVO GENERAL

Examinar los avances de los biocombustibles para aviones realizando una investigación a nivel mundial.

Objetivos específicos

- Registrar los principales acuerdos, planes y objetivos de las industrias, instituciones y gobiernos presentando los principales planes respecto al uso, desarrollo y producción de biocombustibles en el sector de la aviación a nivel global.
- Identificar las diferentes materias primas que se pueden utilizar para la producción de biocombustible aéreo señalando sus principales características.
- Ilustrar los procesos de producción certificados hasta el momento explicando de forma general cada uno de ellos.
- Identificar los países involucrados en el desarrollo, producción, inversión tecnológica y uso de biocombustibles en el sector aéreo nombrando sus diferentes objetivos y avances.

CAPÍTULO 1 PROSPECTIVAS PARA LOS BIOCOMBUSTIBLES EN LA AVIACIÓN

La demanda de transporte aéreo mundial se prevé que crezca a una tasa de alrededor del 5% por año durante las próximas décadas. A pesar de que existe una serie de oportunidades para reducir la intensidad energética de la flota de aviones, no son suficientes para estabilizar o incluso reducir el CO₂. Los combustibles alternativos o biocombustibles ofrecen un grado de libertad adicional para el corte de emisiones de CO₂. Desde la introducción de aviones con motor a reacción en la década de 1950, el volumen de tráfico de los ingresos del transporte aéreo mundial ha experimentado un crecimiento sin precedentes. El cambio a aviones más productivos, en combinación con las inversiones en infraestructura, ha llevado a un aumento en los ingresos por tonelada por kilómetro de 5 mil millones de dólares en 1952 a 650 mil millones de dólares en 2011, a una tasa promedio de 8.9% por año (ICAO, 1975 y 1999; UN, 2004 y 2013). Actualmente, el transporte aéreo cuenta con aproximadamente el 10% de los kilómetros recorridos por pasajero por todos los modos motorizados, y aproximadamente 40% (en valor) del transporte de mercancías en las distintas regiones del mundo (ATAG, 2005; Schafer y col., 2009).

El crecimiento histórico en el transporte aéreo fue impulsado en su totalidad con combustible derivado del petróleo. A diferencia de cualquier otro sector, el transporte aéreo depende en gran medida de este combustible de alta densidad energética. Los combustibles de aviación derivados del petróleo contienen mayor cantidad de energía química por unidad de volumen de todos los combustibles y la mayor cantidad de energía química por unidad de peso de todos los combustibles líquidos. Son varios los factores que motivaron la búsqueda de sustitutos del

combustible para aviones derivado del petróleo. Un estímulo fue el requisito de obtener un mayor rendimiento en los aviones. Tras la primera crisis de petróleo, el hidrógeno líquido y el gas natural fueron examinados como combustibles alternativos de aviación primero en Lockheed, EE. UU (Brewer, 1991), después, en la antigua Unión Soviética (Sosounov, 1989), y más tarde en Alemania (Deutsche Airbus, 2000). Los estudios detallados de Lockheed estimaron que los beneficios de la eficiencia de combustible del hidrógeno líquido incrementarían con el tamaño de la aeronave.

Ahora es el momento en el que la mitad de los recursos petroleros del mundo se han agotado y durante la cual, algunos analistas esperan que los precios del petróleo se disparen. Durante todo este periodo, y durante casi 100 años, el miedo constante del pico del petróleo también ha contribuido a la búsqueda de alternativas, especialmente durante periodos de altos precios del petróleo.

En respuesta a las preocupaciones sobre la dependencia de las importaciones del petróleo, los gobiernos establecieron una serie de medidas que afectan a la demanda, y especialmente el suministro de combustibles del transporte. Las medidas para el lado de la oferta han incluido la financiación de la investigación, con el objetivo de desarrollar combustibles alternativos, apoyar el desarrollo de recursos no convencionales del petróleo y la formación de asociaciones público-privadas para comercializar la producción de combustibles sintéticos. Sin embargo, como los precios del petróleo disminuyeron después de la segunda crisis del petróleo, también lo hizo el apoyo gubernamental y el interés de la

industria en combustibles alternativos. Como ejemplo de ello, en 1985 el Congreso de los Estados Unidos abolió la corporación de combustibles sintéticos, una sociedad pública-privada con el objetivo de desarrollar 2 millones de barriles de combustibles sintéticos por día a partir de carbón y petróleo de esquisto (Almanec, 1985).

1.1 Aspectos ambientales

Sin embargo, ha surgido un nuevo desafío con respecto a las emisiones efecto invernadero. La combustión de 1 kg de combustible de aviación de tipo queroseno, mejor conocido como Jet A en EE. UU. y Jet A-1 en el resto del mundo, genera alrededor de 3.2 kg de CO₂, el gas de efecto invernadero más abundante. Las emisiones a partir de los motores, las aeronaves afectan el balance radiativo de la atmósfera y, por lo tanto, al sistema climático a través de varios mecanismos. Estos incluyen emisiones directas de óxidos de nitrógeno, los cuales influyen en la química atmosférica y dan lugar a cambios en la abundancia de ozono (O₃) y metano (CH₄) (Zeng y Pyle, 2003; Stevenson y col., 2000). Desde el comienzo de la industrialización, la concentración atmosférica de CO₂ ha aumentado de 280 ppm en el año 1850 a alrededor de 400 ppm en el año 2015 (Figura 1.1). Hoy en día, la aviación genera aproximadamente el 2.5% de las emisiones de CO₂ relacionadas con el uso de la energía (Schafer y col., 2016). Sin embargo, la Asociación Internacional de Transporte Aéreo estima que el sector mundial de la aviación crecerá 4.5% por año, lo que puede resultar en emisiones de CO₂ de hasta seis veces más para el año 2050.

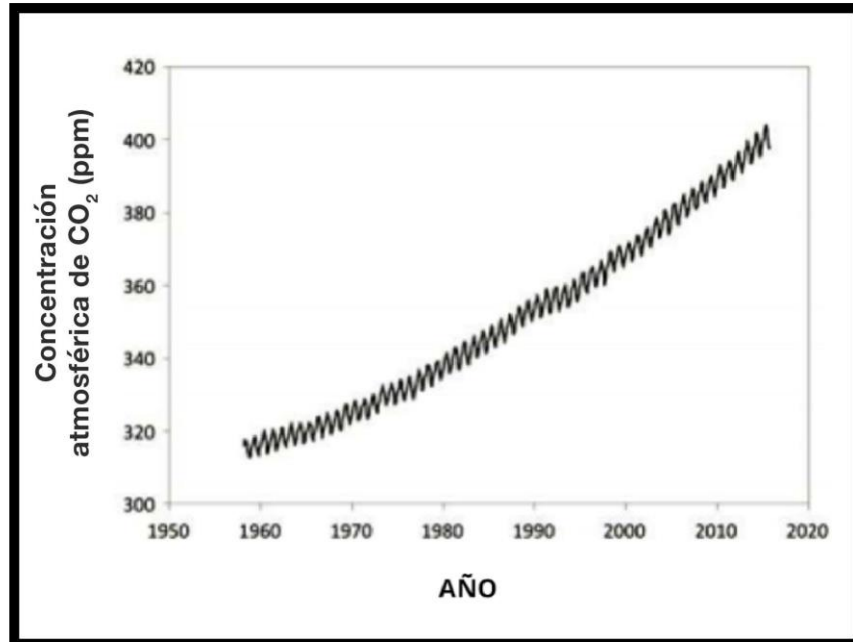


Figura 1.1 Concentración atmosférica de CO₂ medida en Mauna Loa, Hawai (NOAA, 2015)

Con el continuo incremento en el consumo de combustibles fósiles para satisfacer las necesidades mundiales de energía, la concentración atmosférica de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) seguirán aumentando directamente proporcional al de la temperatura media de la tierra. Las consecuencias serían proyectadas sin precedentes en la civilización humana. Se espera que la expansión térmica de los océanos, el derretimiento de los glaciares y de los casquetes polares resulte en un aumento del nivel del mar de varios metros hasta el año 2100, dependiendo de la cantidad de combustibles fósiles consumidos y emisiones de CO₂ generadas (IPCC, 2013).

En respuesta a estas preocupaciones, 197 países se comprometieron en el Acuerdo de París de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático en 2015, para mantener el aumento de la temperatura promedio

mundial por debajo de 2°C, con respecto a los niveles preindustriales e impulsar los esfuerzos para limitarlo a 1.5°C (UN, 2015). Este objetivo requerirá que la concentración atmosférica de CO₂ se encuentre por debajo de los 450 ppm. Para que esto suceda, las emisiones globales de CO₂ tendrían que alcanzar su máximo en el año 2020 y posteriormente disminuir. Claramente, una desviación tan crítica de las tendencias históricas de las emisiones requiere que todos los sectores de la economía participen, incluyendo la aviación. Esta restricción en el uso de los combustibles fósiles de la tierra también implica que un tercio de las reservas mundiales de petróleo, la mitad de las reservas mundiales de gas y más del 80% de las reservas de carbón tendrían que permanecer sin usarse para lograr el objetivo de 2°C (McGlade y Ekins, 2015).

1.2 Los aumentos en el transporte aéreo, en el uso de combustibles y la generación de las emisiones de gases de efecto invernadero.

El volumen del tráfico aéreo de los Estados Unidos creció a un ritmo del 10.5% anual entre los años 1952 y 1980. Mientras que este porcentaje ha descendido hasta el 3.5% al año desde 1980 (IEA, 2015). Actualmente, las mayores tasas de crecimiento ocurren en las economías emergentes de Latinoamérica y Asia, mientras que las tasas más bajas están siendo observadas en los mercados en Estados Unidos y la Unión Europea.

El crecimiento en el tráfico aéreo global ha sido de 5.4% por año desde 1980 comparado con el crecimiento en la demanda de combustible que su crecimiento ha sido más lento. Desde 1980, el consumo de combustible aéreo se ha

incrementado a razón de 2.1% por año, duplicándose cada 33 años (IEA, 2015; EIA, 2015). La diferencia en las tasas de crecimiento del tráfico de transporte aéreo y el consumo de combustible de 3.3% por año puede atribuirse a las mejoras en la eficiencia del combustible. Estas han consistido en mejoras tecnológicas, los aumentos en los factores de carga de pasajeros y de carga, y cambios operacionales. Debido a que el combustible para aviones derivado del petróleo se ha utilizado desde la introducción de los aviones a reacción, las emisiones directas de CO₂ han crecido en proporción al consumo de combustible de aviación, alcanzando un valor de 504.3 millones de toneladas en el año 2014 (Figura 1.2) (IEA, 2016).

Los modelos econométricos que predicen los niveles futuros de la demanda de transporte aéreo suelen considerar como variables, los ingresos por persona, el crecimiento de la población, las tarifas aéreas, y otros factores como los tipos de cambio. Principalmente debido a un aumento continuo en los ingresos por persona y crecimiento de la población; la mayoría de las proyecciones sugieren que el crecimiento de la demanda mundial se mantenga en las tasas recientes de alrededor del 5% por año, por lo menos durante los próximos 20 años. La mayoría del crecimiento futuro se espera que ocurra en los mercados emergentes de África, Asia y América Latina, donde los ingresos y la población tienen un crecimiento más rápido (Alonso, 2014). El avance futuro en la eficiencia del combustible determinará indicadores como la cantidad de emisiones de CO₂ generadas a partir de factores como la cantidad de combustible de aviación consumido en combinación con su composición de combustible. Asumiendo que el

crecimiento anual en el uso de combustibles del 2.1% continúe, junto con el crecimiento anual del tráfico aéreo de aproximadamente el 4 %, el consumo de energía del sector del transporte aéreo mundial de 10.8 EJ en el año 2011 se duplicaría a 24.3 EJ en el año 2050. Las emisiones de CO₂ podrían alcanzar a 1,800 millones de toneladas en el año 2050 si continúa la dependencia de combustible derivado del petróleo (Chuck, 2016).

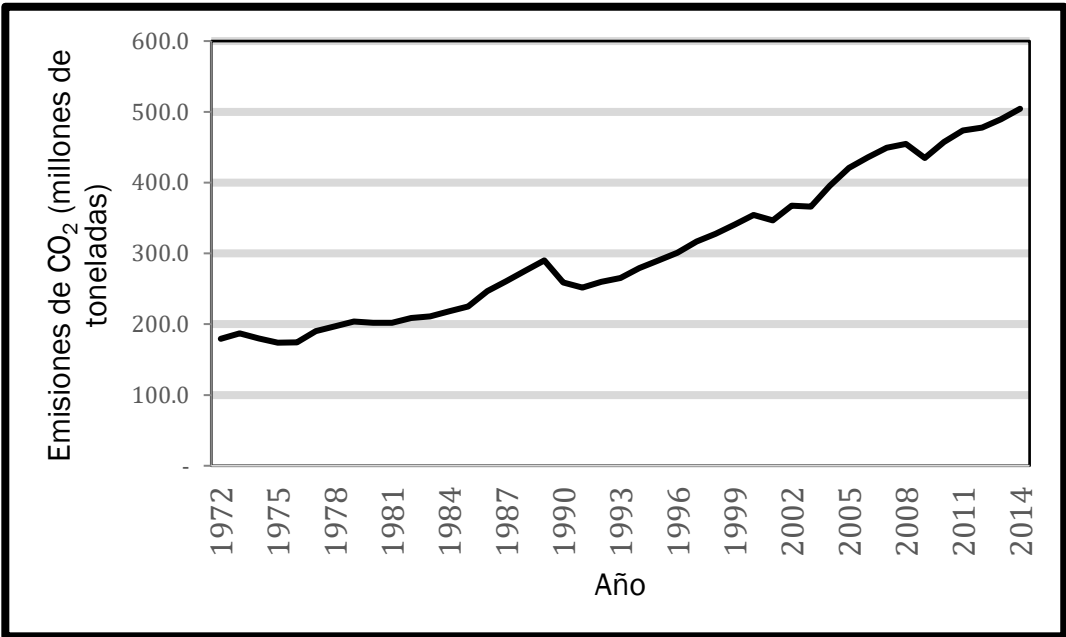


Figura 1.2 Emisiones de CO₂ de los bunkers de la aviación internacional (IEA, 2016)

1.3 Planes para el control de las emisiones del CO₂ del transporte aéreo

Desde inicios del presente siglo, han surgido los esfuerzos para controlar las emisiones de CO₂. Los gobiernos y la industria han explorado, determinado o introducido políticas u objetivos para controlar las emisiones de CO₂ del transporte aéreo. Estos objetivos, directa o indirectamente, afectan también al desarrollo y uso de biocombustibles para la aviación.

1.3.1 Plan de la industria aérea

En la actualidad, el sector de la aviación reconoce la creciente y urgente necesidad de la sociedad para hacer frente al desafío global del cambio climático y entiende que el sector tiene un papel que desempeñar. En 2009, la Asociación Internacional de Transporte Aéreo anunció el fin común de un crecimiento neutral de carbón a partir del año 2020, con una subsecuente reducción en las emisiones de CO₂ del 50% de los niveles del año 2005 para 2050, contribuyendo activamente para lograr un desarrollo sustentable con bajas emisiones de carbono (Figura 1.8).

La estrategia para alcanzar dicho objetivo se basa en cuatro pilares principalmente:

- Tecnología de eficiencia energética
- Mejora en las operaciones
- Mejora en la infraestructura
- Uso de biocombustibles

La mayor contribución a logro de los objetivos para 2050, debe provenir del uso de los biocombustibles, ya que pueden reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) hasta en un 80% en comparación con los combustibles fósiles (IATA, 2013). Estos ahorros se consiguen en el proceso de producción y conversión de materias primas en biocombustibles. Sin embargo, se debe tener la seguridad que el uso de biocombustibles se produce de manera sustentable y

existe un ahorro de gases de efecto invernadero, evaluando el ciclo de vida completo del combustible. De acuerdo con los datos de la literatura, el uso de mezclas de biocombustible con Jet A-1 conduce a una reducción significativa de las emisiones de óxidos de azufre y de hollín del motor debido a las reducciones de compuestos aromáticos y de azufre (Knorzer y Szodruch, 2012). Los biocombustibles son la única opción viable a mediano plazo para las compañías aéreas para reducir la intensidad de carbono de sus combustibles. Además de esto, el uso de los biocombustibles reducirá la dependencia de los combustibles fósiles y como pueden ser producidos a partir de una amplia gama de recursos de biomasa, mejoran la seguridad del combustible (Hamelinck y col., 2013; IATA, 2013a).

Por su parte, las agencias gubernamentales de Estados Unidos, tales como la Administración Federal de Aviación (AFA que por sus siglas en inglés es FAA, Federal Aviation Administration), también adoptó la visión de crecimiento neutro en carbono a partir del año 2020. Además, la AFA tiene como objetivo reducir el impacto climático de todas las emisiones de la aviación en relación con los niveles del año 2005 durante el mismo periodo (FAA, 2012). Recientemente, la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) ha iniciado un proceso para regular las emisiones de CO₂ de los aviones (EPA, 2015). Por otra parte, la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) un organismo de la ONU ha comenzado a desarrollar los estándares de emisiones de CO₂ para nuevos tipos de aeronaves y una exploración, basado en un mecanismo de mercado en las rutas internacionales (ICAO, 2013 y 2014).

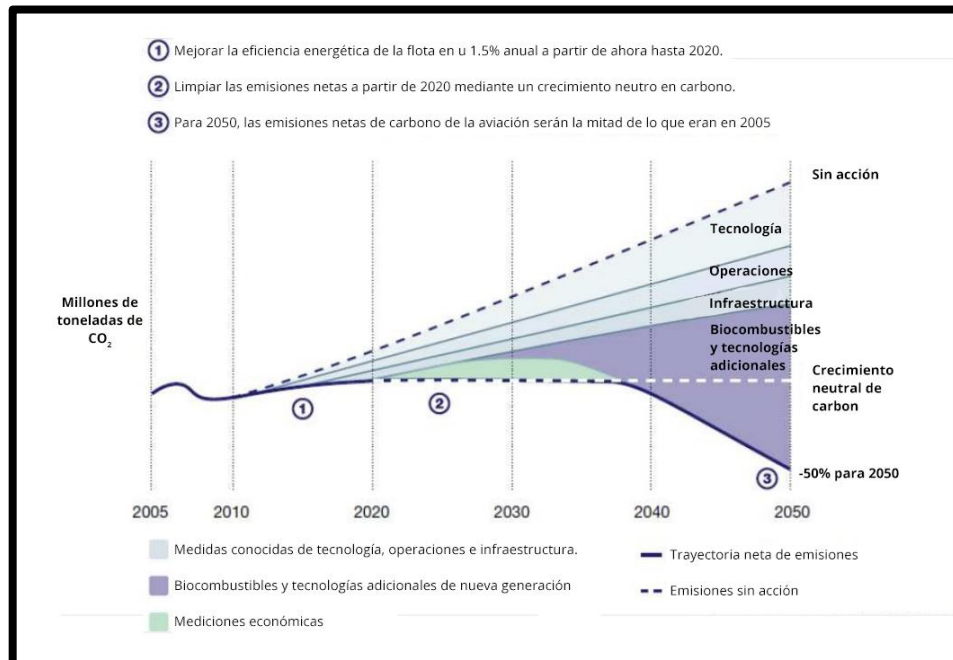


Figura 1.3 Visión de la asociación internacional de transporte aéreo para la reducción de emisiones de GEI del 50% para 2050 (ATAG, 2011).

1.3.2 Plan comercial europeo de emisiones

El paso más concreto hacia el control de las emisiones de CO₂ fue implementado por la Unión Europea, la cual ha incluido a la aviación comercial en su Plan de Comercio de Emisiones de CO₂ (PCE) desde el año 2012. Sin embargo, a raíz de las protestas masivas de varios países no europeos, la UE suspendió la inclusión hasta el año 2016, con la expectativa de que la Organización Internacional de Aviación Civil podría desarrollar un mecanismo basado en el mercado para la reducción de emisiones de CO₂ de la aviación que se pondría en marcha en 2020 (EC, 2015). En el Plan de Comercio de Emisiones de CO₂, los biocombustibles se acreditan con cero emisiones de CO₂ si satisfacen el ciclo de vida sobre las reducciones de emisiones de GEI en relación con los combustibles derivados del petróleo según lo especificado por la Comisión Europea.

1.3.3 Plan del Consejo Asesor de la Investigación Aeronáutica

El Consejo Asesor de la Investigación Aeronáutica en Europa se estableció en 2001 y se conforma por actores clave de la industria, de los reguladores y de la investigación. El consejo generó dos visiones, una en 2001 para el año 2020, y otra en 2011 para el año 2050 (EC, 2001; EC, 2011). Ambas visiones son ambiciosas y abordan varios objetivos, entre ellos la calidad de recorrido, la factibilidad, calidad, seguridad industrial, el liderazgo y el impacto ambiental. En la visión para 2050 “Flightpath 2050” los objetivos principales:

- Una reducción del 75% en CO₂, 90% en NO_x y 65% en ruido con respecto al año 2000.
- 90% de los viajeros dentro de Europa son capaces de completar su viaje, puerta a puerta, en un plazo de 4 horas.
- Europa se establece como un centro de excelencia en combustibles alternativos sostenibles.
- El sistema de gestión del tráfico aéreo es capaz de manejar 25 millones de vuelos al año.

Con respecto a la visión para 2020, los objetivos principales:

- Nuevos diseños de aeronaves más silenciosos.
- Aeronaves con un consumo menor de combustible, lo que se refleja en menos emisiones de CO₂.

1.3.4 Plan sobre de los biocombustibles en otros países

El desarrollo de programas de biocombustibles se remonta a la década de 1970, incluyendo el programa de caña de azúcar en Brasil o el maíz a la producción de etanol en los Estados Unidos. Mientras tanto, los programas de biocombustibles se han introducido en muchas otras partes del mundo, incluida la Unión Europea. En casi todos los programas, el enfoque fue sobre los biocombustibles de primera generación, con el enfoque implícito en el transporte por carretera. Recientemente, estos programas han cambiado su enfoque al uso de los biocombustibles de segunda generación.

En los Estados Unidos, la Norma de Combustibles Renovables (NCR que por sus siglas en inglés es RFS, Renewable Fuels Standard) requiere que los transportes de superficie contengan un volumen mínimo de combustibles con base en biomasa. En 2005, se proyectó un incremento en la cantidad de combustibles renovables de 11.1 mil millones de galones en 2009 a 36 mil millones de galones para 2022 (EPA, 2010). En la Unión Europea, la Directiva de Energías Renovables (DER que, por sus siglas en inglés, Renewable Energy Directive) requiere que las energías renovables representen al menos el 20% del suministro total de energía en 2020 (EC, 2010). Todos los países de la Unión Europea deben asegurarse de que al menos el 10% de sus combustibles de transporte provengan de fuentes renovables. Estos combustibles deben satisfacer ciertas reducciones de emisiones en comparación con los combustibles derivados del petróleo, pasando del 35% en 2010 al 60% en 2018. A pesar de que la Directiva de Energías Renovables está

dirigida a todos los sectores del transporte, los biocombustibles han sido consumidos casi exclusivamente en el transporte por carretera. En contraste, la iniciativa de producción de biocombustibles avanzados en Europa, lanzada en 2011 por la Comisión Europea en colaboración con Airbus, aerolíneas europeas y productores de biocombustibles europeos específicamente con objetivos de aviación. Su objetivo es facilitar la financiación de las plantas de producción de biocombustibles para producir 2 millones de toneladas de biocombustibles sostenibles para la aviación europea que corresponde aproximadamente al 4% del consumo actual de combustible de aviación (EC, 2013). Actualmente, el consumo de biocombustibles en Europa es de 14.4 millones de toneladas equivalentes de petróleo (EurObserv'ER, 2017). En su revisión sobre el potencial de combustibles de aviación en 2009 para el Comité del Reino Unido sobre el Cambio Climático se concluyó que los biocombustibles podrían representar hasta 1.6% de la mezcla de combustible para la industria de la aviación en 2020. Esto representa un 65 a 70% de ahorro de gases de efecto invernadero en comparación con los combustibles fósiles. En la tabla 1.1 se muestran los principales planes y objetivos sobre la industria de la aviación y el uso de biocombustible anteriormente mencionados.

Tabla 1.1 Planes sobre biocombustibles y sus principales objetivos		
Institución	Objetivos	Referencias
La Asociación Internacional de Transporte Aéreo	Lograr un crecimiento neutral de carbón a partir del año 2020, con una subsecuente reducción en las emisiones de CO ₂ del 50% de los niveles del año 2005 para el año 2050.	Hamelinck y col., 2013; IATA, 2013a
Administración Federal de Aviación de EE. UU.	Adoptó la visión de crecimiento neutro en carbono a partir de 2020. Tiene como objetivo reducir el impacto climático de todas las emisiones de la aviación en relación con los niveles del año 2005.	FAA, 2012

Tabla 1.1 (Continuación) Planes sobre biocombustibles y sus principales objetivos

Institución	Objetivos	Referencias
Agencia de Protección Ambiental de EE. UU.	Ha iniciado un proceso para regular las emisiones de CO ₂ de los aviones.	EPA, 2015
La Organización de Aviación Civil Internacional	Ha comenzado a desarrollar los estándares de emisiones de CO ₂ para nuevos tipos de aeronaves y una exploración con base en un mecanismo de mercado en las rutas internacionales,	ICAO, 2013 y 2014
La Unión Europea	Ha incluido a la aviación comercial en su Plan de Comercio de Emisiones de CO ₂ desde el 2012, en el cual, los biocombustibles se acreditan con cero emisiones de CO ₂ si satisfacen el ciclo de vida sobre las reducciones de emisiones de GEI en relación con los combustibles derivados del petróleo.	EC, 2015
Consejo Asesor de la Investigación Aeronáutica	Genero dos visiones, una para el año 2020 y otra para el año 2050. En la visión para 2050 "Flightpath 2050" su principal objetivo es: <ul style="list-style-type: none"> - Una reducción del 75% en CO₂, 90% en NO_x y 65% en ruido con respecto al año 2000. En la visión para 2020, su principal objetivo: Proporcionar nuevos diseños de aeronaves más silenciosas y que consuman menos combustible, lo que se refleja en menos emisiones de CO ₂ .	EC, 2011 y 2001
La Directiva de Energías Renovables	Requiere que las energías renovables representen al menos el 20% del suministro total de energía en 2020. Los países de la Unión Europea deben asegurarse de al menos el 10% de sus combustibles de transporte provengan de fuentes renovables. Dichos combustibles deben satisfacer reducciones de emisiones en comparación con los combustibles derivados del petróleo, pasando de un 35% en el año 2010 a 60% en el año 2018.	EC, 2010
La Iniciativa de Producción de Biocombustibles Avanzados	Su objetivo es facilitar la financiación de las plantas de producción de biocombustibles para producir 2 millones de toneladas de biocombustibles sostenibles para la aviación europea en 2020, que corresponde aproximadamente al 4% del consumo actual de combustible de aviación.	EC, 2013

Tabla 1.1 (Continuación) Planes sobre biocombustibles y sus principales objetivos

Institución	Objetivos	Referencias
Reino Unido	En su revisión sobre el potencial de combustibles de aviación, concluyo que los biocombustibles podrían representar hasta 1.6% de la mezcla de combustible para la industria de la aviación en 2020. Esto representa un 65% a 70% de ahorro de gases de efecto invernadero.	EC, 2013

CAPÍTULO 2 MATERIAS PRIMAS PARA BIOCOMBUSTIBLES DE AVIACIÓN

El costo, la disponibilidad y la sostenibilidad de las materias primas son la clave para el éxito de cualquier proceso en la producción de biocombustibles para la aviación. Existen numerosas rutas para los combustibles de aviación, y como tal, es probable que varias materias primas se utilicen a nivel mundial para producir biocombustibles de aviación en el futuro.

2.1 Azúcares

La materia prima dominante para la producción de biocombustibles son azúcares simples derivados de almidones agrícolas, principalmente en los Estados Unidos, y a partir de la caña de azúcar cultivada en Brasil. La caña de azúcar es uno de los cultivos más eficientes fotosintéticamente, cultivada en climas cálidos como las regiones tropicales. Los tallos de la caña pueden sustituir más del 70% de la planta madura y contienen hasta un 20% en peso de sacarosa. La caña de azúcar es el mayor cultivo en el mundo, con aproximadamente 1.8 billones de toneladas cultivadas en 2013 (Tabla 2.1) (FAO, 2015). Mientras que la mayoría de este cultivo se utiliza directamente para la producción de azúcar, cantidades cada vez mayores de la caña están siendo utilizados para la producción de biocombustibles como el etanol (Tabla 2.2).

La sacarosa se deriva principalmente de la caña de azúcar, sin embargo, existen otras plantas que también se cultivan para obtener azúcares simples, incluyendo la remolacha azucarera y sorgo. Estos tipos de cultivos ofrecen una fuente barata de azúcar fermentable, solo necesitan ser molidos previo a la fermentación, y la extracción de azúcares es relativamente simple y barata (Mussato y col., 2010).

Los combustibles producidos pueden derivarse directamente del hidrolizado de azúcar, o, más comúnmente, a partir de la melaza como subproducto de la producción de azúcar de grado alimenticio (Griffin y Scandiffio, 2009).

La sacarosa puede ser producida de forma eficiente en grandes volúmenes, especialmente en Brasil. La producción de etanol por la vía de fermentación tiene un balance energético positivo y un bajo impacto ambiental con respecto a la producción de gasolina, con un ahorro de gases de efecto invernadero entre 46% y 90% (Borrion y col., 2012). Como tal, la sacarosa brasileña es la principal materia prima para las tecnologías de fermentación en el campo de la aviación (Moreira y col., 2014). Sin embargo, la producción de caña de azúcar depende del clima específico y a pesar de su alta eficiencia fotosintética, el área de tierra necesaria para su cultivo sigue siendo considerable y está en competencia directa con otros cultivos alimenticios. Además, cualquier biocombustible de aviación producido a partir de la caña de azúcar estará en competencia con el bioetanol como sustituto de la gasolina.

Una alternativa a la producción de combustible a partir de la sacarosa es fermentar almidones simples. El cultivo de biocombustible predominante, que se utiliza principalmente en los Estados Unidos, es el grano de maíz, aunque otros almidones, tales como almidón de trigo o almidón de yuca se utilizan en una capacidad limitada en todo el mundo. Estados Unidos es el principal productor de biocombustibles a partir de almidón, donde aproximadamente el 60% del mercado mundial de etanol se produce a partir de grano de maíz (Sticklen, 2008).

Tabla 2.1 La producción mundial de caña de azúcar (elaboración a partir de FAO, 2015)

País o región	Hectáreas de cultivo	Rendimiento promedio (ton/ha)	Producción total (ton)
Mundial	26,522,734	70.77	1,877,105,112
África	1,533,641	63.36	97,168,645
América	13,571,208	74.13	1,005,998,943
Asia	11,036,446	67.49	744,857,430
Europa	64	85.16	5,450
Oceanía	381,375	76.26	29,084,644
Por País			
Brasil	9,835,169	75.17	739,267,042
India	5,060,000	67.43	341,200,000
China	1,827,300	69.03	126,136,000
Tailandia	1,321,600	75.74	100,096,000
Pakistán	1,128,800	56.48	63,749,900
México	782,801	78.16	61,182,077
Colombia	405,737	85.96	34,876,332
Indonesia	450,000	74.89	33,700,000
Filipinas	435,405	73.21	31,874,000
Estados Unidos	368,588	75.71	27,905,943
Australia	329,303	82.40	27,136,082
Guatemala	261,520	100.70	26,334,667
Argentina	370,000	64.05	23,700,000
Vietnam	309,300	64.72	20,018,400
Sudáfrica	325,000	55.38	18,000,000
Egipto	139,600	115.33	16,100,000
Cuba	361,300	39.86	14,400,000
Perú	82,205	133.72	10,992,240
Myanmar	156,500	63.26	9,900,000
Bolivia	167,662	48.11	8,065,889
El salvador	78,200	91.80	7,179,000
Ecuador	101,066	70.83	7,158,265
Nicaragua	71,567	98.18	7,026,599
Sudan	69,804	97.39	6,797,900
Venezuela	130,000	51.54	6,700,000
Irán	71,000	87.32	6,200,000
Honduras	72,500	84.08	6,096,000
Kenia	85,000	69.41	5,900,000
Paraguay	116,000	47.80	5,554,797

Mientras que la tecnología de la fermentación está bien establecida, el uso de la tecnología a base de almidón para la producción de etanol parece estar

alcanzando un máximo. Mientras que el etanol de maíz tiene un balance energético positivo, tiene un bajo ahorro de GEI (Borrion y col., 2012; Von Blottnitz y Curran, 2007). También se ha previsto que el impacto del aumento de la producción de biocombustibles a base de almidón podría tener un gran impacto en los precios de los alimentos. Las materias primas agrícolas podrían aumentar de precio hasta en un 34% y la ganadería en un 6% en el año 2020 (Ho y col., 2014).

Tabla 2.2 Productores a nivel mundial de bioetanol a partir de caña de azúcar (FAO, 2015; RFA, 2015)

País	Producción de etanol (ton)	Área estimada de tierra utilizada para bioetanol (ha)	Porcentaje aproximado de la superficie total de caña de azúcar utilizada para biocombustibles
Brasil	18,487,610	3,124,227	32%
China	1,896,548	320,498	18%
Tailandia	925,548	156,464	12%
Argentina	477,870	80,755	22%
India	462,937	78,232	2%

2.2 Materias primas lignocelulósicas

La caña de azúcar tiene limitados rendimientos, así como un crecimiento específico para regiones selváticas. Es por ello por lo que la segunda generación de biocombustibles lignocelulósicos está siendo estudiados intensamente como una opción viable. La lignocelulosa se puede derivar de cuatro fuentes principales: los residuos agrícolas, residuos de madera, residuos de alimentos y cultivos energéticos específicos. Si bien, las evaluaciones varían considerablemente, se estima que aproximadamente entre 2.5 y 6 billones de toneladas de biomasa lignocelulósica podrían estar disponibles para la producción de combustible sin impactar en el suministro de alimentos.

2.2.1 Residuos agrícolas

Los residuos agrícolas, es el material lignocelulósico incluyendo tallos y hojas sobrantes una vez que la parte comestible de la planta, tales como el grano, se ha extraído. La producción de residuos agrícolas es enorme, con un total estimado de entre 1.5 y 3.9 billones de toneladas de residuos producidos en el mundo cada año (Sarkar y col., 2012; Gupta y Verma, 2015). Factores como el rendimiento total de la cosecha, la cantidad de residuos producidos, la composición de la cosecha, y el contenido de energía inherente son importantes para evaluar la idoneidad de los residuos agrícolas como materia prima para biocombustibles. Además, otros usos de los residuos agrícolas como arar el residuo de nuevo en la tierra, el uso de la paja como combustible de baja calidad para uso doméstico y el uso de residuos para la generación de electricidad pueden limitar la disponibilidad de esta materia prima en el mercado de biocombustibles (Nguyen y col., 2013). Además de esto, existen otros usos alternativos de los residuos que podrían restringir la disponibilidad de esta materia prima, como es el caso del uso de residuos cada vez mayor, para la generación de electricidad a mayor escala. Así como también, son vistos como una fuente clave para el futuro de productos químicos y materiales a granel, donde hay pocas alternativas en el desplazamiento de recursos fósiles.

2.2.2 Desperdicio de alimentos

Casi 4 billones de toneladas de alimentos se producen anualmente en el mundo. Sin embargo, casi 1.2 a 2 billones de toneladas se desperdician antes del consumo humano (Fimeche y Fox, 2013). El desperdicio de alimentos se divide en

dos categorías. La primera es el mecanismo predominante de desperdicio en el mundo en desarrollo incluye los ineficientes medios de transporte, recolección y almacenamiento; La segunda categoría se aplica al mundo desarrollado, donde la comida desechada por los supermercados, debido a la ola de ventas por fechas arbitrarias, exigentes estándares estéticos y los residuos generales por parte del consumidor, son las principales vías de desperdicio (Fimeche y Fox, 2013). Los alimentos eliminados por los últimos mecanismos se denominan comúnmente residuos de alimentos urbanos y podrían estar dirigidos hacia la producción de biocombustibles (Lin y col., 2013). Se calcula que actualmente, hay 600 millones de toneladas de residuos urbanos de alimentos producidos anualmente (Figura 2.1) (Adhikari y col., 2006).

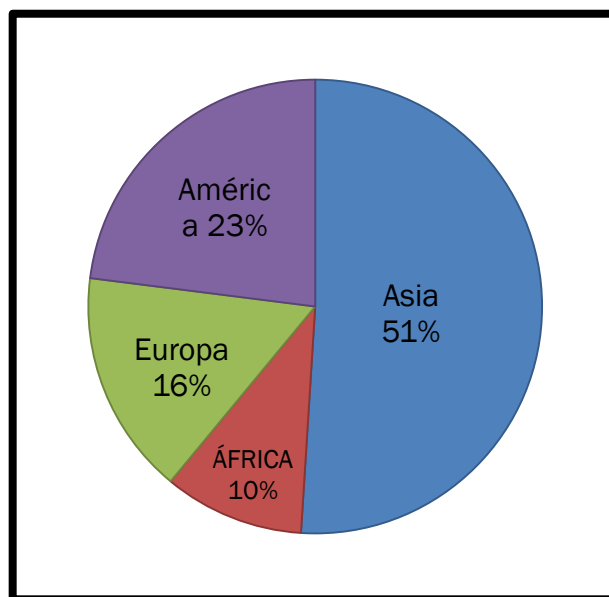


Figura 2.1 Producción de residuos de alimentos domésticos (Elaboración a partir de Lin y col., 2013)

El desperdicio de alimentos es una materia prima muy heterogénea y la variabilidad depende de la época del año, la localidad y la fuente. Sin embargo, los residuos de alimentos han sido ya procesados, no contienen lignina y contiene

altos niveles de material fermentable. Como tal, la comida es relativamente más fácil de convertir que la mayoría de otros materiales lignocelulósicos.

Varios informes han demostrado la idoneidad de los residuos de alimentos como materia prima para las fermentaciones y una posterior transformación química (Couto y Sanroman, 2006; Sargeant y col., 2015). Sin embargo, mientras que los residuos de alimentos son sumamente prevalentes, hay enormes problemas con la infraestructura de recolección y clasificación de los residuos. Actualmente, el principal uso de los residuos de alimentos es para la producción de electricidad mediante la degradación anaerobia. Si los residuos de alimentos sirven como materia prima para biocombustibles de aviación, entonces podría competir con este mercado, así como los combustibles líquidos alternativos.

2.2.3 Cultivos energéticos específicos

Existen un número de plantas que pueden ser cultivadas específicamente para utilizar su lignocelulosa para la producción de combustible. Un alto contenido de lignina y celulosa es deseable debido a un poder calorífico superior, aunque la lignina puede ser más difícil de procesar dependiendo del método utilizado. Las plantas con alto contenido de lignina pueden permanecer de pie a bajos contenidos de agua; por lo tanto, su biomasa tiene menos contenido de agua y se seca de forma más eficiente en el tallo (Lewandowski y col., 2003).

Los cultivos energéticos comunes incluyen hierbas perennes como *miscanthus* o pasto varilla y los cultivos forestales de rotación corta como el sauce o álamo (Ho

y col., 2014). Las características clave de estos cultivos son su bajo requerimiento de fertilizantes y la capacidad para crecer en tierras marginales (Tabla 2.3).

Tabla 2.3 Cultivos energéticos y sus estadísticas vitales (Fazio y Monti, 2011; Ho y col., 2014; Lewandowski y col., 2003; Lopez-Bedillo y col., 2014; Pleguezuelo y col., 2015)

Cultivo energético	Productividad (toneladas / ha por año)	Ubicación geográfica
Miscanthus (<i>Miscanthus sp.</i>)	5-43	Templado
Pasto Varilla (<i>Panicum virgatum</i>)	5-35	Templado
Hierba de elefante (<i>Pennisetum purpureum</i>)	22-31	Templado, subtropical, tropical
Hierba cinta (<i>Phalaris arundinacea</i>)	2-10	Templado
Caña gigante (<i>Arundo donax</i>)	10-30	Templado, subtropical, tropical
Caña de energía (<i>saccharum sp.</i>)	33-400	Similar a la caña de azúcar

Tabla 2.3 (Continuación) Cultivos energéticos y sus estadísticas vitales (Fazio y Monti, 2011; Ho y col., 2014; Lewandowski y col., 2003; Lopez-Bedillo y col., 2014; Pleguezuelo y col., 2015)

Cultivo energético	Productividad (toneladas / ha por año)	Ubicación geográfica
Eucalipto	10-21	Templado, subtropical, tropical
Sauce	5-11	Templado
Álamo	2-34	Templado
Alfalfa	1-17	Templado
Fibra de sorgo	16-43	Climas cálidos

2.3 Los aceites triglicéridos

Los aceites de triglicéridos, comúnmente utilizados en la producción de biodiésel o, más recientemente, para hidrocarburos a través de una reacción de hidro-desoxigenación. La producción mundial de aceites comestibles es de aproximadamente 160 millones de toneladas en todo el mundo, de las cuales

aproximadamente 26 millones de toneladas se utilizan para la producción de biodiésel y la producción de combustible hidrotratado (Figura 2.2).

Los cultivos más comunes para producir biodiésel son la colza en la Unión Europea, la soya en los Estados Unidos y América Latina, y la palma y coco en los países asiáticos (como Malasia e Indonesia). Cada tipo de aceite tiene una mezcla distinta de ácidos grasos, lo que da aceites con diferentes propiedades. Normalmente, el aceite de palma contiene más ésteres saturados, el aceite de colza principalmente monoinsaturados y el aceite de soya predominantemente poliinsaturados. Casi todos los aceites tienen longitudes de cadena de carbono de 16 a 18 átomos de carbono, aunque, el aceite de coco se compone principalmente de ésteres de cadena más pequeña (de 8 a 16 átomos de carbono) (Hoekman y col., 2012).

Al igual que en la producción de biocombustibles a partir de materias primas de primera generación de azúcar, el uso del aceite vegetal se considera ampliamente como insostenible, compite con el sector de alimentos y tiene beneficios ambientales cuestionables (Gasparatos y col., 2013). Además, se ha demostrado que la expansión de biocombustibles podría aumentar el precio de los cultivos de aceites de 9 a 27% en el año 2020. Otros factores que influyen son el uso intensivo de fertilizantes y otros productos químicos, la vasta deforestación y una reducción de la calidad del agua y del suelo, especialmente en la plantación de aceite de palma en el sureste asiático (Tan y col., 2009). Debido a estos efectos y por demanda global para proporcionar el combustible y los alimentos, se han

investigado una gama de alternativas de materias primas de segunda generación (Tabla 2.4).

Una de las fuentes más prometedoras para generar aceites alternativos son fuentes de segunda generación que pueden ser cultivadas en tierras ya degradadas o marginales y, por lo tanto, tienen el potencial de no competir con los alimentos. La *jatropha* es una planta que contiene semillas con alto contenido de aceite y es resistente a la sequía. Se cultiva principalmente en la India, aunque se ha demostrado que el cultivo en África también es eficiente (Koh y Ghazi, 2011). Aproximadamente 13 millones de hectáreas de *jatropha* se plantan exclusivamente para la producción de biodiésel. Otras plantas similares también están siendo cultivadas a modo de prueba, como la karanja, ricino, linaza y camelina (Ho y col. 2014).

Por otra parte, debido a que una gran cantidad de aceites de cocina de desecho pueden recolectarse después del uso y ser reutilizados para la producción de combustible, se ha estimado que aproximadamente 25 millones de toneladas de aceite de cocina usado podrían recolectarse en todo el mundo (Yaakob y col., 2013). Sin embargo, debido al proceso de freído, no son tan estables los aceites como los aceites vírgenes. Además, contienen niveles significativamente elevados de ácidos grasos libres, agua y otras impurezas sólidas. Esto puede tener efectos significativos sobre la tecnología de conversión, y como tal, tienden a necesitar un pretratamiento (Kulkarni y Dalai, 2006). Otros productos que generan aceites usados pueden usarse, por ejemplo, las industrias de procesamiento de animales

que producen grandes cantidades de grasas animales o sebo y algunos desechos de alimentos, tales como café molido, contienen altos niveles de triglicéridos.

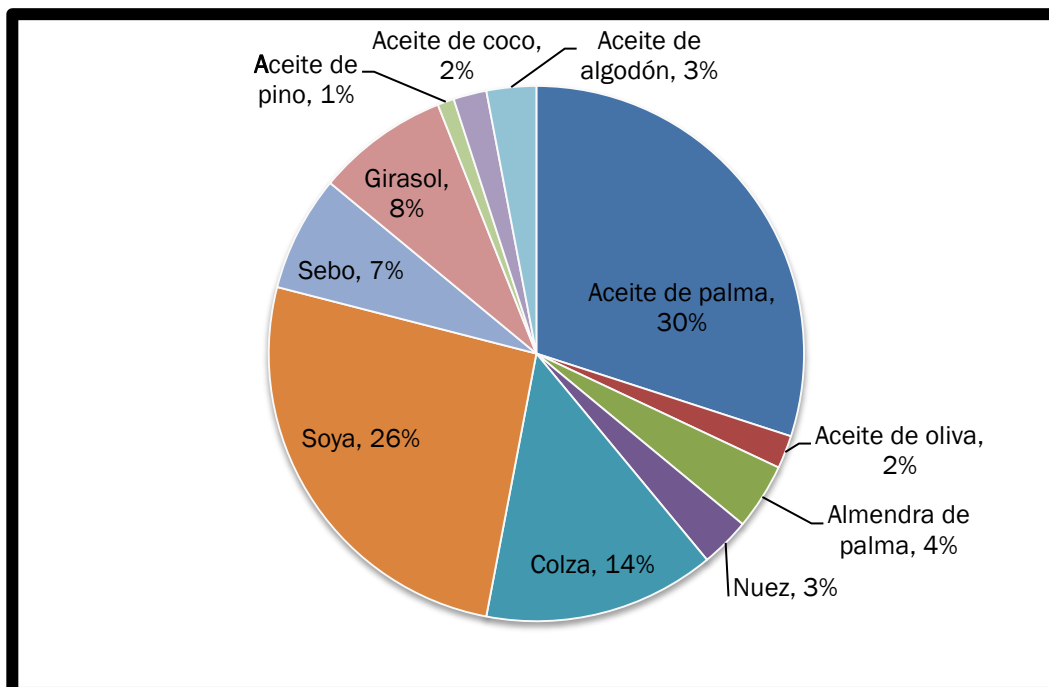


Figura 2.2 Producción mundial de aceites comestibles en 2013 (Realizado a partir de Lin y col., 2013)

2.4 Las levaduras oleaginosas

Los aceites residuales, industriales y de restaurantes, aceites de cocina, y las grasas de origen animal, solo son una pequeña fracción de la demanda de biodiesel y biocombustibles avanzados. Una posible solución ha sido cultivar levaduras oleaginosas en lugar de residuos lignocelulósicos. Varios estudios han demostrado la idoneidad de estos aceites de levadura para la producción de hidrocarburos (Wagner y col., 2014; Jenkins y col., 2015). Los aceites de levadura ofrecen muchas ventajas sobre otras alternativas, incluyendo un ciclo de vida más corto, un rendimiento de aceite mucho mayor, y un proceso de producción que se

ve menos afectado por la ubicación, la temporada y el cambio climático (Li y col., 2008).

A diferencia de las algas, las levaduras no requieren luz, tienen cortos tiempos de duplicación, y alcanzan densidades mucho mayores (10-100 g/L en 3-7 días). La acumulación de aceite puede alcanzar el 80% de la célula por peso, y también producir una amplia gama de productos de fermentación, además de aceites que se podrían vender como subproductos.

Tabla 2.4 Producción de principales cultivos que generan biocombustibles (Berti y col., 2011; Ho y col., 2014; Hoekman y col., 2012; Jenkins y col., 2014; Koh y Ghazi, 2011; Kumar y Sharma, 2008)

Cultivo	Rendimiento de Biomasa (ton/ha)	Contenido de aceite de la semilla	Producción de aceite (L/ha)	Fuente u origen
Primera Generación				
Maíz			168-187	Estados Unidos, China, Brasil, India
Algodón		14-20%	327-421	Trópicos secos y subtropical
Soya	2.8	21%	374-514	Estados Unidos, China, Sudamérica
Girasol		32-49%	702-982	Regiones templadas
Colza	3.1	35%	1,029-1,216	En todo el mundo
Coco			2,338-2,806	Tropical
Aceite de palma	18.4	40%	3,742-6,080	Sureste de Asia
Segunda Generación				
Jatropha	Hasta 20 (rendimiento de la semilla)	50-60%	1,310-1,871	Tropical y subtropical

Tabla 2.4 (Continuación) Producción de principales cultivos que generan biocombustibles (Berti y col., 2011; Ho y col., 2014; Hoekman y col., 2012; Jenkins y col., 2014; Koh y Ghazi, 2011; Kumar y Sharma, 2008)

Cultivo	Rendimiento de Biomasa (ton/ha)	Contenido de aceite de la semilla	Producción de aceite (L/ha)	Fuente u origen
Camelina	Hasta 2.3 (rendimiento de la semilla)	20%	561-608	Climas fríos templados
Karanja	6 (rendimiento de la semilla)	30-40%	1,800-3,600	Sureste de Asia incluyendo la India
Residuos de café		Hasta 20% de residuos de café molido	8 millones de toneladas de residuos de café molido en todo el mundo	En todo el mundo
Residuos de aceites de cocina			25 millones de toneladas en todo el mundo	En todo el mundo
Grasas animales			Estimado 5 millones de toneladas recolectadas	En todo el mundo

Más de 1,600 especies de levaduras son conocidas, pero solo 40 son conocidas por ser oleaginosas. Principalmente, estas levaduras pertenecen géneros *Candida*, *Cyberlindnera*, *Geotrichum*, *Kodamaea*, *Lipomyces*, *Magnusiomyces*, *Metschnikowia*, *Trigonopsis*, *Wickerhamomyces*, *Yarrowia*, *Cryptococcus*, *Gheomyces*, *Leucosporidiella*, *Pseudozyma*, *Rhodospiridium*, *Rhodotorulla*, y *Trichosporon* (Chuck y col., 2014).

La mayoría de los aceites de levadura tienen una composición de ácidos grasos semejante al aceite de colza, con elevados niveles de ácido oleico, ácido linoleico, y ácido palmítico. Así como el porcentaje de la acumulación de lípidos dentro de la

célula también es de importancia, el coeficiente de lípidos (definido como el gramo de lípido producido por gramo de azúcar que se consume) es el parámetro clave para la producción de biocombustibles. Los máximos teóricos para los rendimientos de lípidos son 0.32 y 0.34 g/g de glucosa y xilosa, respectivamente. Sin embargo, debido a otros procesos celulares que requieren glucosa, aún en condiciones ideales para la producción de lípidos, el rendimiento de lípidos sobre la glucosa es raramente más de 0.22 g/g (Ratledge y Cohen, 2008).

2.5 Microalgas

Las algas son una fuente sostenible de biomasa que puede ser cultivada en ambientes acuáticos sin ejercer fuerte presión sobre el uso de las tierras agrícolas. De hecho, los ambientes marinos, de agua dulce, salobre y corrientes de desechos han sido objeto de debate como medios adecuados para el cultivo masivo de algas para la producción de biocombustible. Inicialmente, la mayoría de la investigación sobre algas se centró en la producción y la posterior extracción de lípidos directamente de las algas, seguida por la fermentación de los azúcares a etanol o butanol. Recientemente, se ha prestado atención a los biocombustibles derivados de algas, que se basan en el procesamiento térmico directo y/o la fermentación de la biomasa de algas para biocombustibles de aviación.

2.5.1 Microalgas oleaginosas

Los cultivos terrestres tienen un rendimiento de lípidos mucho más bajo por unidad de área de lo que potencialmente podrían ser alcanzados por las algas. Por ejemplo, algunas especies de microalgas pueden acumular más de un 60% de

lípidos en peso seco. Esto equivale a casi 90,000 L/ha en comparación con una semilla de colza (1200 L/ha) y soya (450 L/ha).

La microalga *Botryococcus braunii* ha recibido una particular atención como una plataforma de producción de biocombustibles, ya que es uno de los pocos organismos que se sabe han contribuido directamente a los depósitos de petróleo de esquisto existentes (Derenne y col., 1997). Existe tres clases, cada uno con perfiles de hidrocarburos diferentes: clase A, con C₂₁₋₃₃ alcadienos impares y alcatrienos, clase B con C₃₀₋₃₇ triterpenoides y C₃₁₋₃₄ metilados escualenos, y clase L, con C₄₀ lycopadieno. *Botryococcus braunii* acumula lípidos internamente, y de manera crucial, externamente en una matriz extracelular, lo que aumenta el potencial de la recolección continua de reordeño. Lamentablemente, a pesar de su evidente impacto en escalas de tiempo geológicas, las tasas de crecimiento son demasiado pobres como para justificar una seria implementación industrial. Por esta razón, las microalgas que exhiben altas tasas de crecimiento y con aceptable contenido de lípidos de membrana han sido favorecidas para la producción de biocombustible. El perfil de lípidos a partir de microalgas es generalmente mucho más variable que los aceites de origen terrestre y depende no solo de las especies de microalgas sino también de las condiciones de cultivo (Chuck y col., 2014).

Mientras que la biomasa puede lograrse con algunas cepas en unos pocos días, la acumulación de lípidos generalmente toma de 14 a 21 días, y con frecuencia se asocia con nutrientes (nitrato en particular). Estimaciones sobre el tamaño, el costo variable de los nutrientes, las especies de algas utilizadas, y las tecnologías utilizadas para el crecimiento, extracción y conversión de los lípidos han conducido a diferentes estimaciones sobre el costo previsto de los combustibles,

demostrando que el mayor costo de algas no está en el procesamiento químico sino en el cultivo y la cosecha de algas oleaginosas y la evaluación del ciclo de vida. A partir de 30 investigaciones, se demostró que el secado, deshidratación, extracción, y la conversión podría ser responsable de hasta el doble de energía producida a partir de los lípidos y la biomasa (Davis y col., 2011; Sills y col., 2012). Mientras que un gran esfuerzo de investigación está en marcha para producir un lípido de algas sostenible, no está claro con que tecnología innovadora podría reducir lo suficiente los costos como para producir una materia prima adecuada para la producción de combustible de aviación.

2.5.2 Especies no oleaginosas

El concepto de convertir directamente la biomasa de algas a través de métodos termoquímicos, recientemente se ha sugerido como una ruta altamente creíble para la generación de combustibles para el transporte. Bajo estas condiciones, el aceite se forma no solo de la fracción de lípidos sino de toda la biomasa, incluyendo las fracciones de proteínas y carbohidratos. Esto permitiría el uso de algas no productoras de lípidos con tasas de crecimiento mucho más rápido, y reduciría los altos costos de secado y extracción de los lípidos.

Además, la conversión termoquímica tiene muchas ventajas: la naturaleza de la biomasa de algas puede ser tanto de microalgas como de macro algas. El impacto de las variaciones estacionales y globales de la productividad se puede enmascarar por el crecimiento de múltiples cepas, y por supuesto, la reducción en gastos de proceso. El crecimiento de microalgas a gran escala para productos de

bajo valor se realiza normalmente en estanques que a menudo son propensos a la contaminación por otras microalgas o microorganismos. El impacto sobre el rendimiento de este tipo de contaminación también se reduce cuando toda la biomasa se procesa en batch.

2.6 Algas marinas (macro algas)

Las algas marinas (macro algas), podrían proporcionar una fuente de biomasa adecuada para su posterior conversión en biocombustibles de aviación. Las algas marinas tienen una serie de ventajas sobre los cultivos terrestres, las macro algas no necesitan una fuente de agua dulce o fertilizantes para crecer (Kraan, 2013). Las macro algas tienen una mayor eficiencia solar (hasta 8%), al menos cuatro veces mayor que cualquier cultivo de origen terrestre (Jung y col., 2013), pueden crecer con gran densidad entre 1.5 y 131 toneladas de peso seco por hectárea observadas, no requieren tierras que puedan competir con los alimentos, y si se cultiva correctamente, puede proporcionar un ecosistema marino diverso. Las macro algas habitan todos los ecosistemas marinos en el planeta, y, por lo tanto, podría ser una parte importante del proceso de producción de combustible de cualquier país. Sin embargo, el contenido de carbohidratos es bastante bajo y el contenido de cenizas, en comparación con las microalgas, tiende a ser significativo. Esto significa que la conversión a través del proceso térmico o fermentación no es particularmente eficiente. Las algas pueden agruparse en tres clases principales: rojo, verde y marrón (Tabla 2.5). La biomasa marina derivada de microalgas y macro algas tiene el potencial de ofrecer niveles adecuados de biomasa como fuente de energía, equivalente a la cantidad producida por los

recursos biológicos terrestres. Claramente, existe el potencial para convertirse en una contribución significativa en la producción de combustible en el futuro, aunque los aspectos logísticos requieren grandes inversiones para producir combustibles económicos.

Tabla 2.5 Composición de una variedad de especies de macro algas (Jung y col., 2013; Wei y col., 2013)

Tipo de clase de alga	Verde	Roja	Marrón
Especies de ejemplo	<i>Ulva lactuca</i> (lechuga de mar)	<i>Gelidium amansii</i>	<i>Laminaria japónica</i>
	<i>Ulva pertusa</i>		Sargassum fulvellum
Contenido de carbohidratos	25-65%	30-85%	40-60%
Tipos de carbohidratos	Almidón	Almidón florideano	Laminarina
	Celulosa	Galactano	Manitol
		Agar	Alginato
		Carragenina	Fucoidan
		Celulosa	Celulosa
Lípidos (%)	<6	<1.1	<2
Proteína (%)	7-20	8-14	12-19
Cenizas (%)	18-25	3-9	Hasta 46%
Azúcares liberados en la hidrólisis	Hasta 60%	Hasta 57%	Hasta 37%
Composición principal de azúcar	Glucosa	Glucosa	Glucosa
		Galactosa	Manitol

2.7 Desafíos y oportunidades

Predecir el futuro panorama de las materias primas es difícil, en parte debido a una serie de desafíos, cambios impredecibles en el clima y las tecnologías que todavía se están desarrollando e investigando. A continuación, se describen algunos factores que podrían tener un gran impacto en el desarrollo de biocombustibles.

2.7.1 Ingeniería genética

La ingeniería genética, especialmente de plantas o algas como materia prima, aumenta el potencial de producción de la materia prima mientras ofrece reducción de los costos de recolección y transformación en combustible. La ingeniería de la mayoría de las especies de cultivos de alimentos está bien establecida, y muchas de las materias primas descritas anteriormente incluyendo cereales, hierbas y cultivos energéticos leñosos se han transformado (Sticklen, 2008).

Un desafío clave es que, entre los miles de especies y cultivos, sólo algunas cepas son adecuadas para su transformación. Junto con esto, el desarrollo de cepas adecuadas se ve perjudicada por la falta de un mercado listo para los productos, mientras que la tecnología de conversión se queda atrás.

Algunos de los principales avances y desarrollos se abocan en el aumento del rendimiento de la materia prima por hectárea (Long y col., 2015) y las paredes de las células vegetales genéticamente modificadas para aumentar la producción de polisacáridos (Burton y Fincher, 2014). Los costos de producción podrían reducirse mediante el diseño de las plantas para producir ciertas celulasas y hemicelulasas (Sticklen, 2008), mientras que los costos de pre tratamiento podrían reducirse mediante la reducción o modificación del contenido de lignina (Pilate y col., 2002). También va en aumento los ejemplos que demuestran el crecimiento de la producción de combustible a partir de cultivos de semillas oleaginosas de primera y segunda generación (Carlsson y col., 2014). Las transformaciones

microbianas han demostrado el aumento del rendimiento de los combustibles a partir de organismos capaces de convertir todos los compuestos de azúcar (no solo glucosa) (Wei y col., 2015). Asimismo, los estudios en microalgas han avanzado, aumentando las tasas de crecimiento, la densidad celular y sus moléculas tales como los lípidos (Ho y col., 2014). Por último, la investigación fundamental también se ha llevado a cabo en la lucha contra el cambio climático mediante la mejora de la tolerancia a estrés abiótico.

La reproducción selectiva de plantas ha producido ya cultivos energéticos, como la caña energética, que son de mayor rendimiento que los cultivos agrícolas (Matsuoka y col., 2014). En estos momentos, es imposible predecir como la ingeniería genética cambiará los rendimientos de las materias primas. Sin embargo, parece probable que las predicciones basadas en los rendimientos actuales pueden demostrar que pueden alcanzarse con el avance de esta área.

2.7.2 Biodiversidad

Una de las principales críticas de la industria mundial de biocombustibles es la perturbación de los ecosistemas de aguas cristalinas y la correspondiente reducción de la biodiversidad. Existen diferencias significativas en el impacto de los cultivos de biocombustibles en la diversidad de fauna, algunas de las cuales se debe a un énfasis diferente en el uso de suelo y gestión de la tierra (Liu y col., 2014). Hay algunos niveles en los que la diversidad de la fauna puede verse afectada inversamente. Genéticamente, los genotipos modificados o agresivos utilizados en los ecosistemas no nativos pueden contaminar las reservas

genéticas existentes. A nivel especies, el desplazamiento de especies nativas, la fragmentación de hábitats, e incluso la extinción de estos, pueden ocurrir al cultivar una especie sobre todas las demás.

En una escala mayor, un escenario completamente dominado por un tipo de plantación para la producción de biocombustibles podría conducir a una comunidad simplificada y un sistema de cadena alimenticia que reduzcan la capacidad de recuperación de un área ante los desastres naturales. Si bien las plantaciones de aceite de palma han demostrado llevar a estos efectos sobre el área local, materias primas perennes pueden mejorar la calidad del suelo, aumentar la biodiversidad y forman un hábitat adecuado para una variedad de especies (Dale y col., 2014). Mientras algunos biocombustibles pueden conducir a un aumento de la biodiversidad, a fin de mantener una verdadera riqueza de fauna y hábitats, es necesario una cuidadosa planificación y regulación de biocombustibles, así como cualquier otro cultivo agrícola. Al menos esto tendrá un impacto en las estimaciones de biomasa disponible, así como contribuir a la definición de lo que es un biocombustible realmente sostenible.

2.7.3 Cambio indirecto en el uso de suelo

El aspecto más complejo y destacado de la sostenibilidad de los combustibles es el cambio indirecto de uso de suelo el cual, es el efecto causado cuando las tierras de cultivo son usadas como materia prima para la producción de biocombustibles, por lo que se desplaza el uso previo de la tierra y como resultado se obtiene un incremento de riesgo de una tierra no utilizada para la agricultura. Este fenómeno

puede incrementar las emisiones de gases de efecto invernadero y pérdida de biodiversidad. Por lo tanto, es importante que las partes interesadas de la producción de biocombustibles busquen optimizar y demostrar los efectos de la sostenibilidad.

2.7.4 Consideraciones logísticas

Los factores clave en el desarrollo de un biocombustible que sea económico deben considerar logísticas de donde se cultiva la biomasa y la forma en que se recopila y se procesa. En el proceso, el combustible debe ser entregado, ya sea a una refinería para la mezcla, o directamente al punto de uso. Los gastos de trasladar largas distancias la biomasa húmeda, puede añadir una cantidad significativa del costo final del combustible, y esto debe ser tomado en cuenta a la hora de seleccionar una materia prima adecuada para la producción de biocombustibles. Las consideraciones logísticas dependen en gran medida de la localidad.

2.7.5 Efecto del cambio climático y la mejora del rendimiento en la materia prima

Una incertidumbre en el futuro de la producción de biocombustibles es el efecto que el cambio climático tendrá sobre los terrenos necesarios para la producción de materias primas para los biocombustibles. Mientras que los aumentos en la temperatura global tendrán un efecto perjudicial sobre el cultivo de materias primas, un efecto positivo del cambio climático puede ser esperado en las regiones que actualmente están limitadas por las bajas temperaturas.

Otro impacto en la disponibilidad de materia prima será el potencial para la mejora del rendimiento. Por ejemplo, en Estados Unidos, el rendimiento del maíz fue de menos de 2 ton/ha a casi 10 ton/ha en 2006 (Finkbeiner, 2014; McManus y Taylor, 2015). Aumentos similares en el rendimiento a escala mundial podrían influir en la disponibilidad de productos agrícolas.

En la actualidad, los combustibles para el transporte equivalen aproximadamente a 100 EJ de energía al año, de los cuales, el queroseno de aviación es responsable de 10-12 EJ. En casi todos los escenarios de energía baja en carbono, se requiere una contribución significativa de la bioenergía procedente de materias primas sostenibles (Dale y col., 2014).

CAPÍTULO 3 TECNOLOGÍAS DE PRODUCCIÓN

Existen múltiples vías de conversión para producir combustibles avanzados de aviación utilizando una variedad de materias primas. Hasta el día de hoy, cuatro rutas de proceso han sido certificadas por la norma ASTM D7566. El biocombustible a partir del proceso Fischer-Tropsch (FT) se certifica en 2009. Los aceites vegetales hidrogenados (AVH) o ésteres y ácidos grasos hidroprocesados fueron certificados en el año 2011. Los hidrocarburos con base en el azúcar fueron certificados en 2014. Entre los procesos aprobados, solo los aceites vegetales hidrogenados o ésteres y ácidos grasos hidroprocesados se producen a escala comercial (Tabla 3.1).

Tabla 3.1 Descripción general de rutas de producción de biocombustibles para aviación (Amezcuca y col., 2016; Hamelinck, 2013; IATA, 2014).

Ruta de producción de biocombustible de aviación	Año de certificación	Tipo de materia prima	Estado actual de la tecnología
Fischer-Tropsch	2009	Lignocelulosa, biomasa, residuos agrícolas y de madera	Probada pero no aplicada comercialmente
Hidroprocesamiento de ácidos grasos y sus ésteres	2011	Aceites vegetales, desechos de la industria alimenticia, productos derivados de la refinación del aceite vegetal, aceite de algas	Probado y aplicado comercialmente (excepto aceite de algas)
Fermentación	2014	Azúcares y almidones, celulosa y residuos	Probada pero no aplicada comercialmente
Proceso de oligomerización	2016	Almidón, celulosa, azúcares y residuos	Probada pero no aplicada comercialmente

3.1 Fischer-Tropsch

El proceso de Fischer-Tropsch produce hidrocarburos líquidos a partir de gas de síntesis, el cual contiene diversos compuestos aromáticos comparados con la gasolina y el diésel que puede ser utilizado en los motores de aviación (Bauen y col., 2012).

El proceso consiste a partir de biomasa sometida a un proceso de lavado, secado y trituración para reducir partículas simples y posteriormente pasar a un proceso de gasificación (Bsnabc, 2013). Para el proceso de gasificación se requiere oxígeno, el cual es obtenido a partir de una separación de aire y una temperatura alrededor de 1300 C (Bsnabc, 2013). El gas obtenido pasa por un limpiador de impurezas para ser mezclado con vapor de agua y obtener dióxido de carbono (CO_2) e hidrógeno molecular (H_2). Esta mezcla de gases se somete a una remoción ácida para separar estos dos compuestos, eliminando el dióxido de carbono (CO_2) del proceso. Por su parte el hidrógeno molecular se introduce a un reactor donde se lleva a cabo la reacción Fischer Tropsch a través de un mecanismo de carburos para producir una mezcla de hidrocarburos líquidos, entre ellos, parafinas, las cuales siguen una reacción de hidrogenación catalítica (hidrocraqueo) y posteriormente una isomerización para producir combustible jet, diésel y lubricantes (Figura 3.1).

La tecnología FT a menudo utiliza residuos lignocelulósicos, algas, hongos y residuos urbanos e industriales para la producción de biocombustibles. Debido a la

gran variedad de materias primas que se emplean en el proceso Fischer-Tropsch, la obtención de biocombustibles líquidos se realiza básicamente sin ninguna interferencia en el sector alimenticio, ya que no se utilizan grandes extensiones de tierras y uso de hidroeléctricas (Gill y col., 2011). Teniendo en cuenta esto, se estima que se puedan producir valores superiores a 4 m³ de combustibles líquidos a partir de una hectárea de tierra durante un año (Liu y col., 2013a). La síntesis FT ha sido aplicada en los procesos a escala industrial basada en gas de síntesis producida a partir del carbón y gas natural.

A pesar de presentar un buen potencial, este medio de producción de biocombustibles sintéticos todavía enfrenta algunos desafíos para finalmente entrar al mercado a escala global. Estos desafíos se refieren como ubicaciones ideales de instalaciones, altos costos de inversión necesarios para ejecutar estas instalaciones, suministro seguro de biomasa, la demanda del mercado y la aceptación social (STORA ENSO, 2009; Natarajan y col., 2014).

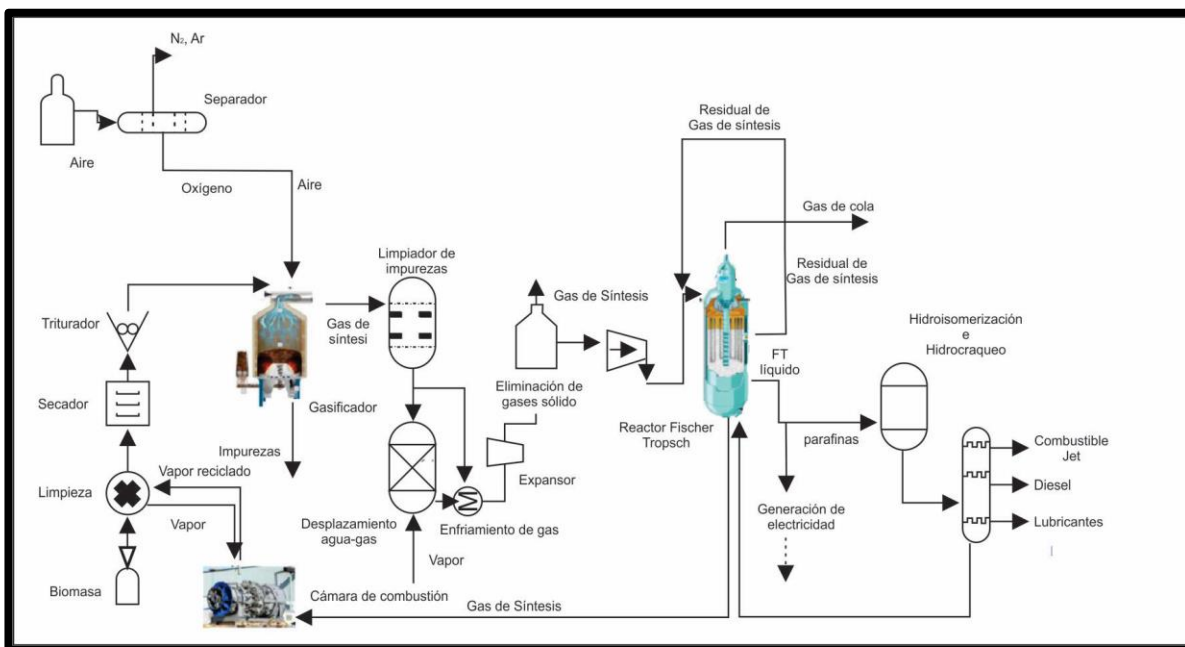


Figura 3.1 Proceso Fischer Tropsch (Wang y Tao, 2014)

3.2 Hidroprocesamiento de ácidos grasos y sus ésteres

Este biocombustible tiene propiedades equivalentes al combustible derivado del petróleo, sin embargo, presenta ventajas como alto número de cetano, bajo contenido de aromáticos, bajo contenido de azufre y un potencial de reducción de emisiones (Pearlson, 2011).

En este proceso a partir de la biomasa se hace una extracción de aceites y grasas, los cuales se someten a un proceso de hidrogenación para obtener triglicéridos saturados, los cuales sufren una segunda hidrogenación para obtener propano y ácidos grasos libres y eliminar oxígeno (Kalnes y col., 2010). Estos últimos siguen un proceso de descarboxilación o hidrodeshidrogenación obteniendo como productos hidrocarburos de cadena larga ($C_{17}H_{36}$ y $C_{18}H_{38}$). Se realiza un proceso de hidroisomerización e hidrólisis catalítica obteniendo parafinas e isoparafinas y finalmente, después de una segunda hidroisomerización e hidrólisis

catalítica se obtiene el combustible jet, diésel, nafta y gases livianos (Figura 3.2) (Park y Ihm, 2000).

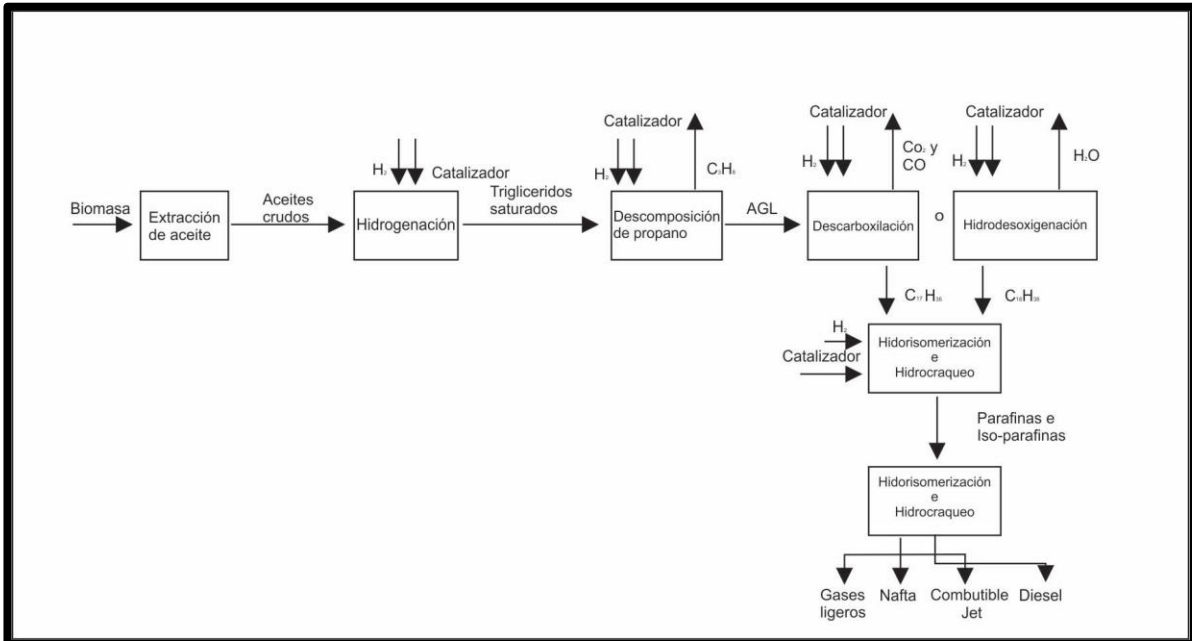


Figura 3.2 Hidroprocesamiento de ácidos grasos y sus ésteres (Wang y Tao, 2014)

Una de las mayores ventajas es la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero como monóxido de carbono y óxidos de nitrógeno (Gong y col., 2010). El biocombustible generado es adecuado para motores de aviones convencionales sin requerir ninguna modificación adicional del motor, evitan la posibilidad de formación de depósitos en el motor y la corrosión del mismo, su combustión es libre de cenizas, son estables para el almacenamiento y son resistentes al crecimiento microbiano (Mikkonen y col., 2012). La ausencia de oxígeno y azufre en el combustible disminuye su lubricidad (Lapuerta y col., 2011). El alto contenido de parafinas en el combustible de alguna manera afecta adversamente las propiedades de flujo en frío como el punto de obstrucción del filtro y el punto de nublamiento que a su vez dependen del tipo de materia prima utilizada (Simacek y

col., 2011). La diferencia en el número de cetano de los combustibles hidroprocesados renovables y los combustibles convencionales de petróleo afecta la ignición del combustible en el motor. Estos problemas pueden mejorarse con la mezcla con combustible convencional o con el uso de aditivos (Lapuerta y col., 2011).

La compañía Neste Oil ha establecido plantas para producir este tipo de combustibles, dos plantas de 190,000 ton/año en Finlandia, una planta de 800,000 ton/año en Singapur y una planta de 800,000 ton/año en Rotterdam. UOP Honeywell, ENI y Galp Energy tienen planes para construir plantas de hidrotratamiento en todo el mundo (Hamelinck y col., 2013). Aeroméxico, Air China, Air France, Finnair, Iberia y Air France KLM, Lufthansa han realizado vuelos comerciales de pasajeros con esteres y ácidos grasos hidro procesados (Winchester y col., 2013).

3.3 Fermentación

El proceso parte de azúcares en fase acuosa que se someten a una evaporación para remover el 50% de agua y a una hidrólisis enzimática para eliminar material sólido (DOE, 2012). A continuación, los azúcares realizan una fermentación bioquímica para la reducción a azúcares más sencillos o de bajo peso molecular, los cuales después de una purificación se realiza un proceso de hidrogenación para obtener el combustible jet (Amyris, 2013) (Figura 3.3). La gran ventaja del uso de este método es que se alcanza una reducción de emisiones de gases de

efecto invernadero de hasta un 82% en la producción de este combustible (Airshow, 2012).

La compañía AMYRIS se aboca en el desarrollo la ingeniería genética y de las tecnologías de detección que permiten la modificación de microorganismos (Amezcuca y col., 2016). Mediante el control de varias vías metabólicas, AMYRIS es capaz de diseñar y cambiar, principalmente la levadura, que convierten los azúcares de origen vegetal a partir de cultivos tales como la caña de azúcar o el sorgo en moléculas específicas. Usando su plataforma de biología sintética industrial, Amyris ha desarrollado cepas de levadura diseñadas para producir una amplia gama de moléculas; entre ellas moléculas de hidrocarburo que pueden substituir a los productos petroquímicos en una amplia variedad de productos, incluidos los combustibles para el transporte vehicular y de aviación.

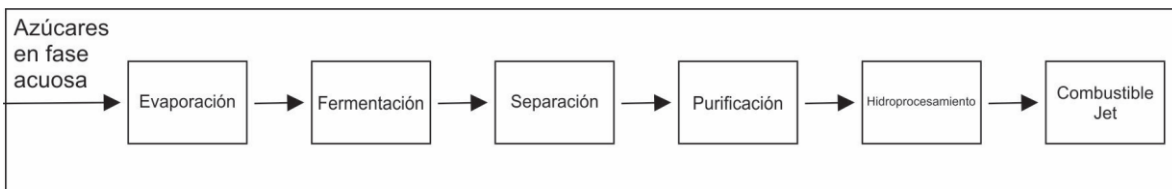


Figura 3.3 Proceso de fermentación (Wang y Tao, 2014)

3.4 Proceso de oligomerización

El proceso emplea alcoholes tales como etanol, n-butanol, iso-butanol y alcoholes de cadena larga. En el caso del etanol, el proceso comienza con una deshidratación del mismo produciendo etileno, el cual se oligomeriza para obtener α -olefinas. Estas últimas, se destilan para obtener como productos olefinas de 9 a 16 de carbonos, los cuales se expone a una hidrogenación para generar el

combustible jet (Figura 3.4) (BYOGY Renewables, 2011; Rutz y Janssen, 2007; Weissermel y Arpe, 2008).

Una gama amplia de materias primas se puede utilizar para el proceso, incluyendo almidón, celulosa, azúcar y residuos (ICAO, 2011). El método es muy económico ya que las materias primas no son muy caras y el proceso no necesita grandes cantidades de energía (ATAG, 2011). El azúcar y el almidón se pueden convertir en alcohol por fermentación directa, pero en el caso de la biomasa debe pretratarse para obtener azúcar, que luego se fermenta directamente a alcohol o se somete a gasificación seguida de fermentación con gas (IATA, 2011).

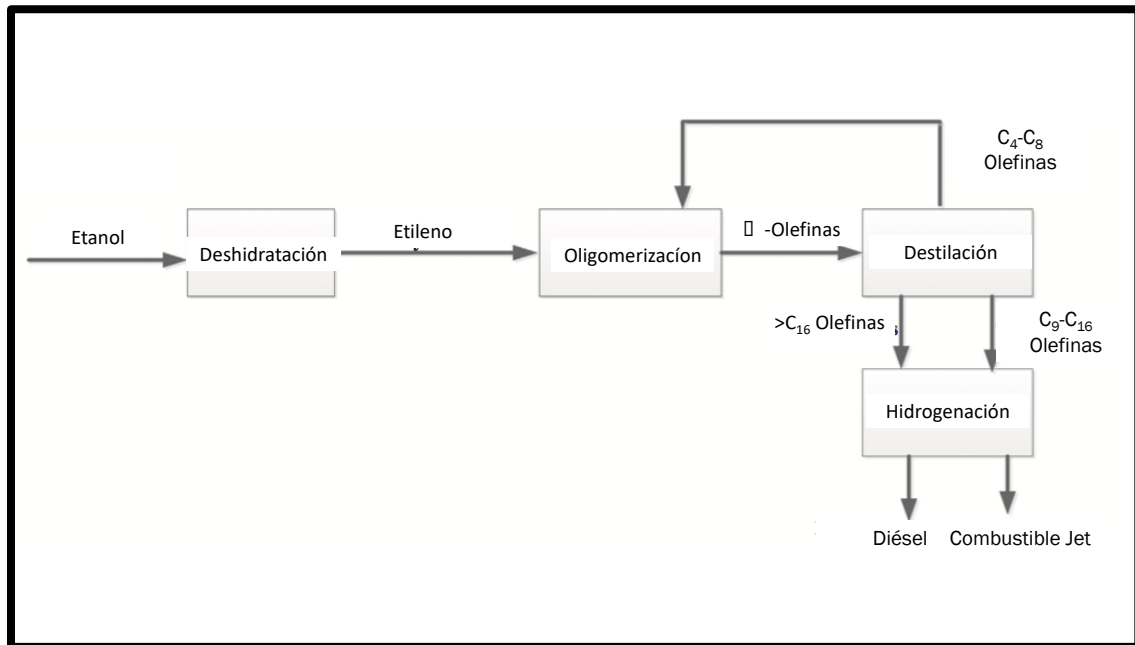


Figura 3.4 Proceso de oligomerización del etanol (Wang y Tao, 2014)

3.5 Costos

El mayor obstáculo para la introducción de biocombustibles de aviación en los vuelos comerciales es la diferencia de precio entre el combustible fósil y el biocombustible de aviación. Actualmente los biocombustibles de aviación están entre 2 a 4 veces el precio del combustible fósil para aviones, con volúmenes limitados disponibles. La demanda de biocombustibles de aviación por compañías aéreas sigue siendo pequeña, hay pocos incentivos para que los productores de biocombustibles pongan en marcha su producción. La gama de precios ya ha disminuido significativamente desde la primera prueba con biocombustibles, momento en el que los costos fueron aproximadamente 30 veces superiores a los costos de los combustibles fósiles.

Los costos del aceite vegetal hidrogenado y el proceso FT son diferentes: el aceite vegetal hidrogenado requiere una modesta inversión inicial de capital y el costo de producción depende en gran medida de los precios de los aceites de origen vegetal, ya que aproximadamente el 60-75% del costo final de los biocombustibles está compuesto por los costos de la materia prima. La industria del aceite vegetal hidrogenado espera que la disponibilidad de aceites no comestibles (tales como la camelina y la jatropha) y más tarde los aceites de algas permitirán mitigar los altos precios de la materia primas a largo plazo. En general, el costo de materia prima será el factor decisivo en la economía de la producción de aceite vegetal hidrogenado, ya que es una gran proporción de los costos finales.

Por su parte, los combustibles FT tienen una menor dependencia del costo de las materias primas. Sin embargo, los combustibles FT se enfrentan a mayores costos de conversión que el aceite vegetal hidrogenado debido a que los procesos de producción son más complejos. La Comisión Europea en 2011 afirmó que se espera una reducción en los costos de conversión a partir del 2020 basado en la optimización de procesos en general y reducción de costos de inversión (Hamelinck, 2013).

CAPÍTULO 4 DESARROLLOS INTERNACIONALES

4.1 Vuelos con biocombustibles

Desde 2008, las aerolíneas comerciales han realizado vuelos utilizando biocombustibles. Con el tiempo, el propósito de las aerolíneas que realizaban vuelos con biocombustibles evolucionó desde vuelos técnicos individuales hasta vuelos más largos de vuelos comerciales con biocombustibles (Tabla 4.1).

Tabla 4.1 Reseña histórica de vuelos con biocombustible (Hamelinck y col., 2013)

Año	Descripción
2008	Virgin Atlantic fue la primera aerolínea comercial en realizar pruebas de biocombustible en un vuelo entre Londres y Ámsterdam. El Boeing 747 utilizó una mezcla de biocombustible al 20% derivada de aceite de nuez de babasu brasileña y aceite de coco en uno de sus cuatro motores.
2009	KLM y Air France son las primeras aerolíneas que realizan un vuelo de prueba con pasajeros a bordo.
2011	Lufthansa operó la serie más larga de vuelos con biocombustible (1187 vuelos) entre julio y diciembre, con un Airbus A-321 entre Hamburgo y Frankfurt. Uno de los motores fue alimentado con biocombustible derivado de aceite de camelina (80%), aceite de jatropha (15%) y grasa animal (5%). KLM realizó el primer vuelo comercial con biocombustible y en septiembre KLM operó más de 200 vuelos con biocombustibles entre Ámsterdam y París.
2012	Alaska Air operó 75 vuelos con biocombustible entre Seattle, Washington y Portland. Lufthansa realizó el primer vuelo transatlántico con biocombustible en enero, de Hamburgo a Washington. KLM operó el vuelo intercontinental más largo de biocombustible a Río de Janeiro.

A partir de 2011 se observa un fuerte incremento en el número de vuelos individuales, así como las primeras aerolíneas que realizan series más largas de

vuelos. Dos aerolíneas europeas, Lufthansa y KLM, y una aerolínea americana, Alaska Airlines, han realizado una serie prolongada de pruebas. KLM, en asociación con Schiphol Group, Delta Airlines y la Autoridad Portuaria de Nueva York y Nueva Jersey, realizan vuelos semanales desde el aeropuerto John F. Kennedy hasta Schiphol (Hamelinck y col., 2013). Además, algunas aerolíneas han firmado acuerdos con compañías productoras de combustible, Alaska Airlines con Hawai'i Bio Energy, United Airlines con Alt Air y Avianca Brasil con Byogy para el desarrollo de biocombustibles.

4.2 Redes de biocombustibles

Con la creciente necesidad de combustibles alternativos de aviación, hay varios proyectos y colaboraciones desarrollándose a nivel mundial. Existen varios programas públicos y privados incluyendo universidades, institutos, compañías y organizaciones gubernamentales (OECD, 2012). Todos los proyectos pretenden comercializar combustibles renovables de aviación a través de diferentes formas y a partir de diferentes fuentes. Las importantes intenciones detrás del desarrollo de combustibles renovables de aviación son:

1. Disminuir la dependencia de fuentes de combustible fósil no renovables
2. Reducir los impactos ambientales
3. Utilizar materias primas de bajo costo

En las tablas 4.2, 4.3, 4.4 y 4.5 se presenta los principales acuerdos, proyectos e iniciativas respecto a la producción y uso de biocombustibles en distintos países

alrededor del mundo tales como Estados Unidos, Brasil, Países bajos, países europeos y países del continente asiático.

4.3 Certificación

Actualmente ASTM Internacional, anteriormente conocida como la Sociedad Americana de Pruebas y Materiales (ASTM), desarrolla los estándares internacionales para el combustible aéreo. Las rutas de hidro procesamiento de ácidos grasos y sus ésteres y Fischer Tropsch, han sido certificadas para su uso en la aviación hasta mezclas de un 50%, los otros dos procesos están aprobados hasta mezclas de un 10%. El proceso de certificación técnica toma de 3 a 5 años y requiere una inversión significativa para producir el combustible para las pruebas. Además, el apoyo de los fabricantes de motores y fuselajes es necesario para realizar las pruebas.

El contenido de compuestos aromáticos en la mezcla es una de las razones de que el 50% es el porcentaje de mezcla máximo permitido para el biocombustible. Se requieren aromáticos debido a la compatibilidad con materiales elastómeros que podrían encogerse en ausencia de compuestos aromáticos que conducen a fugas de combustible. Por otro lado, la reducción del contenido de aromáticos resulta en emisiones reducidas de hollín. Algunas empresas están investigando la posibilidad de producir combustibles de aviación libres de aromáticos.

Tabla 4.2 Principales acuerdos en Estados Unidos (Bello, 2012; Boeing, 2009; ClearFuels y Rentech, 2011; EQ², 2010; IATA, 2009; Roberts, 2008)

El centro de Investigación Energética y Ambiental y la Agencia de Proyectos de Investigación Avanzada de Defensa.	Han industrializado un proceso llamado hidro-desoxigenación catalítica e isomerización (proceso CHI). El método hace uso de materias primas como aceite de camelina, aceite de algas, aceite de canola, maíz y residuos de grasas, para la producción de biocombustibles de aviación que son altamente con los combustibles convencionales.
Global Seawater Inc.	Establecida en el Reino Unido y Estados Unidos es un proyecto principalmente preocupado por la producción de combustibles alternativos de aviación a partir de cultivos de agua dulce como halófitos. El trabajo es principalmente basado en <i>Salicornia bigelovii</i> , la cual es una planta nativa de Europa, Estados Unidos, el sur de Asia y África.
Rentech	Es una compañía concentrada en la producción de combustibles a partir de fuentes de biomasa. El proyecto trabaja en Rentech Process cuyo principio básico es el proceso Fischer Tropsch y convierte la biomasa, residuos verdes, residuos municipales y sólidos en combustibles de aviación sintéticos. El combustible producido por la compañía puede ser mezclado con el combustible convencional para usarse como combustible de aviación comercial y militar.
Universal Oil Products	Es una compañía bien conocida en el campo de refinación de petróleo y procesamiento. Han sintetizado ingeniosamente los combustibles renovables hidro procesados de aviación a partir de varias fuentes naturales como el aceite de camelina, aceite de algas, aceite de jatropha y sebo para el proceso de desoxigenación, isomerización y craqueo. Universal Oil Products se enfoca en la hidro desoxigenación de ácidos grasos libres para la producción de combustible.
Tysoon Foods	Suministra grasas animales y se hidroprocesan a combustibles limpios de aviación
Altair Fuels	Su objetivo es suministrar 75 millones de galones por año de biocombustibles utilizando el potencial de aceites de cultivo como la camelina.

Tabla 4.2 (Continuación) Principales acuerdos en Estados Unidos (Bello, 2012; Boeing, 2009; ClearFuels y Rentech, 2011; EQ², 2010; IATA, 2009; Roberts, 2008)	
La iniciativa de biocombustibles sostenibles de la aviación del Medio Oeste (The Midwest Aviation Sustainable Biofuels Initiative, MASBI) formada en mayo de 2012 por Unit Airlines, Boeing, UOP de Honeywell, el Departamento de Aviación de Chicago y Clean Energy Trust.	Tiene como objetivo promover el desarrollo de biocombustibles de aviación en una región de 12 estados en el Medio Oeste de Estados Unidos con una promesa significativa de materia prima de biomasa, desarrollo tecnológico, creación de empleo y comercialización sostenible.
La Iniciativa Combustibles de Aviación Sostenibles del Noroeste (The Sustainable Aviation Fuels Northwest, SAFN) fue lanzada en julio de 2010 por Boeing, Alaska Airlines, los operadores de los tres aeropuertos más grandes de la región (Puerto de Seattle, puerto de Portland y Aeropuerto Internacional de Spokane) y la Universidad Estatal de Washington, un centro para la investigación avanzada de biocombustibles.	Esta iniciativa es el primer esfuerzo de las partes interesadas regionales de los Estados Unidos para explorar las oportunidades y desafíos que rodean la producción de combustibles de aviación sostenibles.
Boeing, una compañía aeroespacial multinacional estadounidense que es altamente dinámica en el campo del desarrollo y prueba de los combustibles alternativos de aviación con Airbus.	Pretenden iniciar tecnologías innovadoras de combustible, mejorar los ciclos de vida, avanzar en las operaciones de vuelos internacionales y una distribución fiable de combustible.
Solazyme Inc.	Producirá una gran cantidad de aceite a partir de microalgas, las cuales pueden ser convertidas eficazmente a biocombustibles de aviación.
Dynamics fuels en colaboración Syntroleum Corporation y Tyson Foods.	Tienen como objetivo el desarrollo de rutas factibles avanzadas para la producción de combustibles de aviación de alta calidad y tecnologías de combustible.

Tabla 4.3 Principales acuerdos en Países Bajos (Hamelinck y col., 2013; van de Hagen, 2012; van Putten y col., 2013)	
KLM y los Ministerios de Infraestructura, Medio Ambiente y Asuntos Económicos desarrollaron en 2011 el acuerdo ecológico holandés (Green deal Biokerosene).	Afirma que KLM seguirá desarrollando sus actividades de biocombustibles (por ejemplo, el programa corporativo de bio-jet, las inversiones en investigación y desarrollo, la contribución a la Mesa Redonda sobre Biocombustibles Sostenibles).
Gobierno Holandés	Prometió eliminar los obstáculos administrativos para la mezcla de biocarburantes, incluir el biocombustible en la transposición nacional de la RED, contribuir a la Mesa Redonda sobre Biocombustibles Sostenibles y facilitar la igualdad de condiciones para la industria aeronáutica neerlandesa a nivel europeo e investigar la posibilidad de actuando como un cliente de lanzamiento.
SkyNRG	Realiza vuelos con Thomson Airlines, Fin Air y Alaska Airlines alimentados de biocombustible hecho de aceite residual de cocina. Es un concepto de ventanilla única para las aerolíneas que buscan comprar biocombustibles que ofrecen un servicio completo de la cadena de suministro, desde la adquisición de biocombustibles hasta el abastecimiento de combustible de la aeronave.
Avantium Chemicals	Ha establecido el método de conversión catalítica de azúcar a 5-hidroximetilfurfural. Puede ser utilizado como componente en el combustible de aviación con buena estabilidad y propiedades de mezcla.

Tabla 4.4 Principales acuerdos en Europa (IATA, 2009; Mikkonen y col., 2012; Mitchell, 2012; SAFN, 2011)	
Alternative Fuels and Biofuels for Aircraft Development (Alfa-Bird)	Los objetivos de los proyectos son: la producción de nuevos biocombustibles de aviación y su análisis, la introducción de sistemas de inyección y modelado, evaluación de la compatibilidad del nuevo combustible desarrollado.
Neste Oil Corporation en Finlandia	Se centra en la producción de combustibles de transporte de buen valor. Utilizan la biomasa para el proceso de combustible que se conoce como proceso NExBTL. Las materias primas que utilizan son aceites vegetales principalmente jatropha y algas, así como grasas animales.
Swedish Biofuels AB en Suecia	Realizan esfuerzos para el desarrollo y la industrialización de combustibles alternativos de aviación renovables. Han asegurado patentes en este campo.
Swedish Biofuels AB y Lanzatech	Producen combustible aéreo principalmente a partir de residuos forestales, madera, residuos agrícolas y granos. El método de síntesis implica la producción de azúcar a partir de materia prima biomásica seguida por la fermentación. Los alcoholes resultantes son entonces químicamente convertidos en hidrocarburos.
La Iniciativa de Aviación para la Energía Renovable en Alemania (AIREG)	El objetivo es impulsar el desarrollo y uso de combustibles líquidos alternativos y regenerativos, como los biocombustibles.
El Grupo de usuarios de combustible de aviación sostenible (SAFUG) se formó en 2008 con el apoyo y asesoramiento de organizaciones ambientales como el Consejo de Defensa de Recursos Naturales y la Mesa Redonda sobre Biocombustibles Sostenibles (RSB).	El grupo se centra en acelerar el desarrollo y la comercialización de biocombustibles sostenibles de la aviación. Todos los miembros han firmado un compromiso de sostenibilidad en el que afirman que solo utilizarán biocombustible sostenible. Las 26 aerolíneas miembros representan en conjunto el 32% de la demanda mundial de combustible para aviación comercial.
Sustainable Aviation Fuel Road Map (SAFRM)	Una empresa de SAFUG fue lanzado dirigido al desarrollo local de la cadena de suministro de biocombustibles de aviación.
La Iniciativa Española para la Producción y Consumo de Bioqueroseno para la Aviación	Se formó en 2011 con la firma de un convenio entre el Ministerio de Industria, Energía y Turismo, el Ministerio de Obras Públicas, el Ministerio de Agricultura, Alimentación y Asuntos Ambientales, Servicios y Estudios para la Navegación Aérea y Seguridad Aérea (SENASA) y varias empresas relacionadas con la producción de materias primas y tecnologías y procesos de refinación.

Tabla 4.5 Principales acuerdos en Asia y Oceanía (Abe, 2009; Kumar, 2010; Roberts, 2008; SAFN, 2012)	
Sasol en Qatar	Adopto los combustibles gas a liquido (GTL) a través de la síntesis Fischer Tropsch para la síntesis y ampliación de hidrocarburos. Ellos han certificado el uso de la mezcla 50:50 de combustible FT con JET-A para fines de aviación.
El programa Indo-canadiense involucra Pratt, Universidades de Laval, Ryerson, Queens, Whitney, HPLC, el Instituto de Ciencias Bangalore de la India, IIP, Info Tech, Indian Oil, IIT	Formado para la producción de combustible renovable, mezcla y aplicaciones.
La Academia de Ciencias de China en conjunto con Boeing.	Empezaron el Laboratorio de Investigación Conjunta para Biocombustibles de Aviación Sostenible.
Japan Airlines con Boeing	Producen biocombustible aéreo a partir de aceites de algas, jatropha y camelina y utilizados en motores de aviones con mezclas 50:50 con Jet-A.
Virgin Australia unida con el gobierno y otras industrias	Trabajan para el desarrollo de combustible renovable aéreo, tecnologías de combustible y comercialización de combustibles alternativos de aviación a precios accesibles

4.4 Perspectiva Holandesa

Holanda tiene una posición fuerte en las cadenas de valor como centro de queroseno. La combinación de una fuerte posición logística, varios actores holandeses motivados y la creciente atención internacional y europea a la aviación sostenible ofrecen oportunidades para que Holanda se posicione como un actor importante en el mercado de biocombustible.

El puerto de Rotterdam y Ámsterdam, respectivamente los puertos europeos #1 y #4, ofrecen una buena accesibilidad marítima a los buques grandes y ofrecen una excelente conectividad. Rotterdam y Ámsterdam están bien conectados con los sistemas europeos de oleoductos utilizados para la distribución de productos petrolíferos. Por su parte, Schiphol es el cuarto aeropuerto europeo más grande, y uno de los que tiene mayor actividad tanto en el transporte de pasajeros como de mercancía, así como también Air France-KLM es una de las principales y más grandes líneas aéreas.

La capacidad de la biorefinería ya está disponible cerca de los puertos de Rotterdam y de Ámsterdam, con la planta de Neste Oil en Rotterdam que tiene la capacidad de producir biocombustible de aviación. KLM es un líder en el uso de biocombustible y está persiguiendo activamente una aplicación a gran escala a través de su participación en el operador holandés SkyNRG.

El futuro mercado en Europa se ha concretado con la iniciativa de producción de biocombustibles avanzados de la Comisión Europea, la cual establece como se ha mencionado que para el año 2020, dos millones de toneladas de biocombustible deben utilizarse en la Unión Europea. Esta consideración estratégica es importante para asegurar que Holanda continúe desempeñando un papel importante en la logística del combustible de aviación a largo plazo. Además, ocupan una posición clave en el comercio y la producción de combustible para aviones, siendo el mayor exportador de combustible para aviones en Europa Occidental y el segundo mayor productor del mismo, desarrollando un papel importante como comerciante de combustibles de aviación, debido a que de todos los aviones que se importan o se producen en Holanda, solo el 33% se utiliza en el mercado nacional (Tabla 4.6) (Hamelinck y col., 2013; Eurostat, 2012).

Tabla 4.6 Mercado de combustibles fósiles de Europa Occidental en 2012 (Eurostat, 2012).

	Producción	Importación	Consumo	Usado en la aviación	Exportación
Holanda	7,415	3,044	3,475	3,458	6,762
Bélgica	1,534	1,924	1,492	1,434	1,660
Alemania	4,972	4,197	8,188	8,183	764
Francia	4,708	3,901	7,181	6,431	684
Reino Unido	8,788	7,499	14,861	11,574	1,383

La mayor parte del comercio de combustibles y la logística de biocombustible en Holanda es manejada hasta ahora por SkyNRG que compra biocombustible a base de aceite de cocina usado producido por la compañía norteamericana Dynamic Fuels. Desde la planta de producción de Dynamic fuels, el combustible se envía a un puerto cercano y se transporta en contenedores de combustible a Rotterdam o Amberes. La mezcla se puede hacer en el puerto de los Estados

Unidos o en el puerto de Holanda. Después de la certificación de calidad, la mezcla de biocombustible es transportada a Schiphol para ser entregada a la aeronave.

Por otra parte, actualmente la mayoría del biocombustible se produce utilizando aceite de jatropha, aceite de camelina y aceite de cocina usado como materias primas. Sin embargo, se cultiva fuera de Holanda debido a su limitado espacio disponible. Según Deltares (2011) la producción de algas en Holanda es posible, pero sería económicamente más viable producir algas fuera de Holanda en las regiones donde los rendimientos son más altos, debido a la mayor radiación solar. Por lo que, se puede decir que no es probable que Holanda desempeñe un papel importante en la producción de materias primas para los biocombustibles de la aviación, pero que los flujos de residuos generados en Holanda podrían utilizarse para la producción de biocombustible.

4.5 Perspectivas en climas tropicales

El combustible es uno de los mayores costos operativos para el transporte aéreo, por lo que la industria de la aviación se ve significativamente afectada por los precios del petróleo que están en constante cambio, de acuerdo con las situaciones socio política de los principales países productores de petróleo y la economía mundial. En 10 años, la diferencia entre los precios del combustible para aviones entre el pico alcanzado en junio de 2008 (1.02 dólares/litro) y la más baja en mayo de 2003 (0.18 dólares/litro) fue más de 5.4 veces (EIA, 2013).

Por otro lado, la industria aeronáutica de hoy en día es un 70% más eficiente en el consumo de combustible que en los últimos 40 años (ATAG, 2009), debido a que los aviones son más aerodinámicos y ligeros; motores de turbina modernos más eficientes; enormes mejoras en la eficiencia del control del tráfico aéreo, en el vuelo de los aviones y en el desarrollo de operaciones más respetuosas con el medio ambiente en los aeropuertos.

En el estudio de Hong y col. (2013) se propuso el proceso de producción de parafinas para generación de biocombustible de avión con las condiciones socioeconómicas, la tecnología de producción y las fuentes de alimentación de los trópicos. También se proporcionó la ruta de la mezcla de parafinas de biocombustible con queroseno fósil (comercial Jet A-1), que formó bio-queroseno usando combustible alternativo para aviones. Dos prototipos de bio-parafinas, que fueron fabricados en Indonesia, se utilizaron para hacer las muestras del experimento. Además, las investigaciones experimentales y teóricas se realizaron para asegurar sus propiedades comunes que satisfacen los requisitos ASTM D1655 y para verificar la factibilidad de desarrollar y aplicar combustible renovable para la industria de la aviación de los trópicos.

El proceso de producción del biocombustible de la aviación para los trópicos se basa en el proceso de hidrotatamiento y hay algunos ajustes para adaptarse a las condiciones de los países tropicales. El punto diferente de este proceso es que las materias primas se deben seleccionar conforme a su composición de ácidos grasos láuricos de cadena media (es decir, que cuenten con una cadena de 12

carbonos). No se requiere ninguna etapa de craqueo, por lo que se utiliza tecnología de producción simple, reduciendo los costos de inversión y de producción. Además, se puede aprovechar, en parte, la línea de producción de biodiésel ya existente. Los aceites como el de coco y de palma pueden ser producidos en masa en las regiones tropicales. Sin embargo, provienen de fuentes de alimentos nutritivos y el desarrollo sostenible del biocombustible de aviación puede verse afectado utilizando estas materias primas comestibles.

La solución para este obstáculo es que los triglicéridos y ácidos grasos se fraccionan primero selectivamente para separar los ácidos grasos insaturados compuestos por caprílico (C₈), cáprico (C₁₀), oléico (C₁₈) y linoleico (C₁₈) para alimentos. Los residuos, que son los ácidos grasos saturados (C₁₂-C₁₆), son hidrotratados para producir bio-parafinas de cadena recta (C₁₁-C₁₆) que contienen undecano (n-C₁₁H₂₄) y dodecano (C₁₂H₂₆) como componentes dominantes. Estos compuestos bio-parafínicos se isomerizan parcialmente para producir isómeros de cadena ramificada que tienen un punto de congelación muy bajo y se denominan bio-parafinas, las cuales se mezclan con una proporción adecuada de compuestos aromáticos (<25% en volumen,) para formar biocombustible de aviación. La mezcla de este biocombustible de aviación con queroseno fósil es llamado bioqueroseno y podría ser utilizado en los aviones sin la necesidad de modificar o rediseñar la infraestructura del suministro del motor y del combustible. En la Figura 4.1 se ilustran las reacciones del ácido graso láurico y triglicéridos para formar undecano y dodecano.

4.5.1 Parte experimental del estudio de Hong y col.

Los dos prototipos de biocombustibles llamados bio-parafinas de aviación 1 (Bio-P1) y bio-parafinas de aviación 2 (Bio-JP2), se realizaron con el proceso anterior sin y con la etapa de isomerización respectivamente, utilizando aceite de coco. La composición de Bio-P1, es un compuesto parafínico normal, mientras que Bio-JP2 tiene la presencia de hidrocarburo iso-parafínico en su composición. Esta es la razón por la que el punto de congelación de Bio-JP2 es menor que el de Bio-P1. En la Tabla 4.7 se presentan las propiedades comunes de Bio-P1 y Bio-JP2. Se realizaron las investigaciones teóricas y experimentales para evaluar las diferentes propiedades críticas de los dos prototipos tales como destilaciones, punto de congelación, punto de inflamación, densidad, poder calorífico y viscosidad para asegurar los criterios de la norma ASTM D1655. En la Tabla 4.8 los resultados de las diferentes evaluaciones experimentales de los parámetros de calidad de dicho estudio.

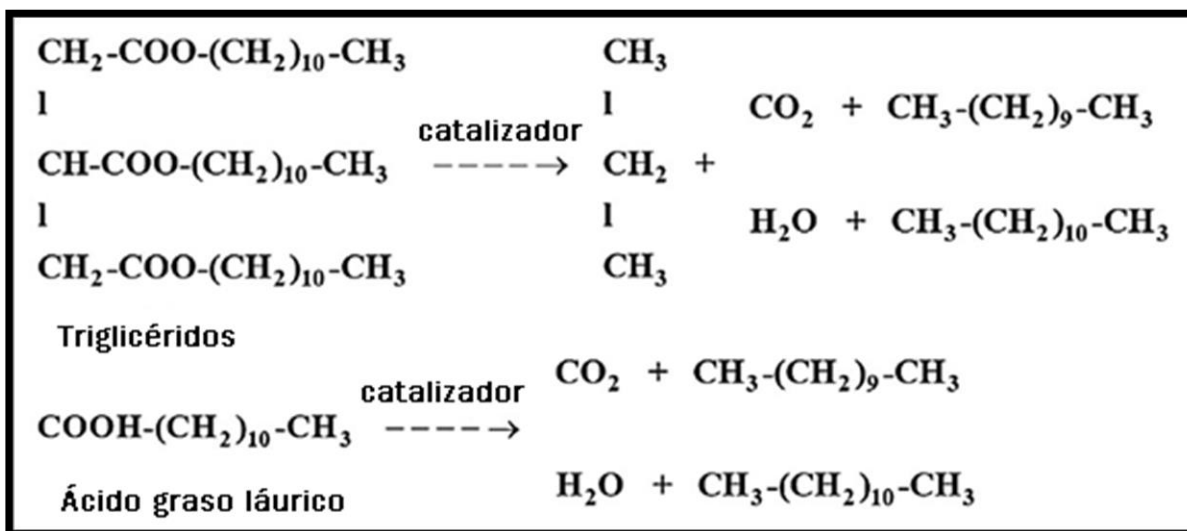


Figura 4.1 Etapas de transformación molecular del proceso de producción de bio-parafinas (Hong y col., 2013)

Tabla 4.7 Las propiedades comunes de Bio-P1, Bio-JP2 and Jet A-1 (Exxon Mobil Aviation, 2005)

Propiedad	ASTM D1655	Bio-P1	Bio-JP2	Jet A-1
Temperatura de destilación				
Punto inicial de ebullición (°C)	Reporte	141	126	146
10% rec. (°C)	Max. 205	191	150	164
50% rec. (°C)	Reporte	218	211	187
90% rec. (°C)	Reporte	283	275	214
Punto final de ebullición (°C)	Max. 300	308	306	247
Punto de congelación (°C)	Max. -47	9.5	-18.5	-55
Poder calorífico (MJ/kg)	Min. 42.8	42.48	44.97	44.45
Densidad a 15°C (kg/m ³)	775-840	759	758	781
Punto de inflamación (°C)	Min. 38	47	45	48
Viscosidad a 25°C (mm ² /s)	-	4.199	2.074	1.599
Viscosidad a -20°C (mm ² /s)	Max. 8.0	6.485	6.940	6.789
Concentración de azufre (%)	Max. 0.3	11 ppm	10 ppm	470 ppm

Tabla 4.8 Resultados experimentales de los parámetros de calidad (elaborado a partir de Hong y col, 2013)

Parámetro	Resultados
Destilación	Los biocombustibles Bio-P1 y Bio-JP2 se pueden mezclar hasta en un 10% en volumen con el combustible Jet A-1 para cumplir con la norma ASTM.
Punto de congelación	El biocombustible Bio-P1 se puede mezclar hasta en un 5% en volumen en el combustible Jet A-1. Por su parte el biocombustible Bio-JP2 se puede mezclar hasta en un 17% en volumen con el combustible Jet A-1 para cumplir con el requerimiento de ASTM.
Poder calorífico	Para cumplir con los criterios ASTM, el volumen máximo del biocombustible Bio-P1 con el combustible Jet A-1 es del 81%. Por su parte cualquier proporción de mezcla de biocombustible Bio-JP2 con el combustible Jet A-1 cumple con la especificación requerida.
Densidad	Para cumplir con las especificaciones de este parámetro, el

	volumen máximo de mezcla del biocombustible Bio-P1 con el combustible Jet A-1 es del 27.3% y 26.1% para Bio-JP2.
Punto de inflamación	Cualquier porcentaje de mezcla tanto de Bio-P1 como de Bio-JP2 cumple con el requerimiento de ASTM
Viscosidad	Las viscosidades cinemáticas tanto de Bio-P1 como de Bio-JP2 cumplen con los requisitos de ASTM.
Azufre	La concentración de componente de azufre en Bio-P1 y Bio-JP2 es de 11 y 10 ppm, respectivamente. Estos valores son mucho más bajos que el estándar ASTM y el Jet A-1, de forma que las emisiones de escape de compuestos de azufre se reducen significativamente.

El ciclo de vida del CO₂ de los combustibles alternativos puede reducirse hasta un 80%, dependiendo del método de producción. Si se toma en cuenta el cambio en el consumo específico de combustible debido a la diferencia del poder calorífico entre Bio-P1 y Bio-JP2, el ciclo de vida del CO₂ puede reducirse hasta en un 76% y 81%. Esto significa que cada mezcla de 1 % de Bio-P1 y Bio-JP2 con combustible fósil reducirá hasta 0.76% o 0.81% de la emisión total de CO₂ de la aviación.

La ruta del proceso de producción propuesto en este estudio es apropiada para desarrollar el biocombustible de aviación en los trópicos, ya que: los países tropicales tienen suficientes materias primas adecuadas para el proceso de producción propuesto, la tecnología y la inversión capital para el proceso de producción propuesto no son demasiado altas para implementar, además, pueden utilizar en parte, las infraestructuras disponibles, línea de producción de biocombustible.

4.6 Biocombustibles en Brasil

Actualmente se están estudiando diversos combustibles a partir de fuentes renovables para satisfacer las demandas del sector aéreo, mitigar el crecimiento en el uso de combustibles fósiles aéreos y establecer una posición confortable de seguridad energética en el sector a la luz del agotamiento de las reservas de petróleo (ANAC, 2008). La producción brasileña de biocombustibles refuerza la posición del país como potencia regional y líder político en cuanto al uso, producción y control de calidad en América Latina.

a) Bioetanol

Como se mencionó anteriormente, Brasil es el principal productor de caña de azúcar que es la principal materia prima utilizada en la producción de combustible anhidro. Además de esto también tiene grandes cultivos de soya y otras semillas oleaginosas para producir biodiésel. Brasil lidera el uso de biocombustibles en América Latina desde los años 60, cuando también fue responsable del 85% de toda la caña de azúcar producida en los países del MERCOSUR, alcanzando el 97% mediante inversiones en avances tecnológicos (MAPA, 2010).

El etanol se presenta con un interés como un combustible de aviación, ya que se conoce la fórmula molecular y se comporta de manera predecible, independientemente de su proceso de aplicación o materias primas utilizadas en su síntesis (Jenkins y col., 2013). Además de fuentes convencionales, el etanol

puede obtenerse a partir de la conversión de biomasa celulósica. Aviones ligeros han operado durante años en Brasil utilizando solo etanol (Marsh, 2008). El principal atractivo del uso del etanol como combustible de aviación en Brasil es que está dirigido a la aviación agrícola, especialmente en aviones monomotores. Esto se relaciona con la alta producción y disponibilidad de combustible en diversas áreas del país. El aumento de la producción de etanol comenzó en los años 70's debido a la gran crisis del petróleo. Con la expansión de los cultivos de caña de azúcar, la producción de etanol ha evolucionado significativamente de 594,985 m³ en 1974 a 27, 604,120 m³ en 2011 (Figura 4.7) (MAPA, 2013).

La tendencia en los próximos años en la producción de etanol es lineal (Figura 4.8). Este factor es un incentivo para el uso de este combustible en la industria de la aviación. El principal problema que motiva el desarrollo de la investigación sobre tecnologías para la producción de etanol está relacionado con el consumo de agua. El agua es necesaria para la producción de etanol tanto en el campo, para la producción de caña de azúcar, como en el proceso industrial (Mosqueira-Salazar y col., 2013). Brasil tiene métodos de fertirrigación muy estudiados para los cultivos de caña utilizando el residuo principal del proceso de producción, la vinaza. Se utiliza ampliamente no solo para el riego, sino también para fertilizar el suelo mediante el proceso de infiltración terrestre, debido a su alto contenido de potasio. Su uso eficiente reduce la responsabilidad ambiental relacionada con la eliminación adecuada de nutrientes y, además, reduce el costo de los fertilizantes químicos porque es un residuo de bajo costo (Dalri y Cruz, 2002; Laime y col., 2011).

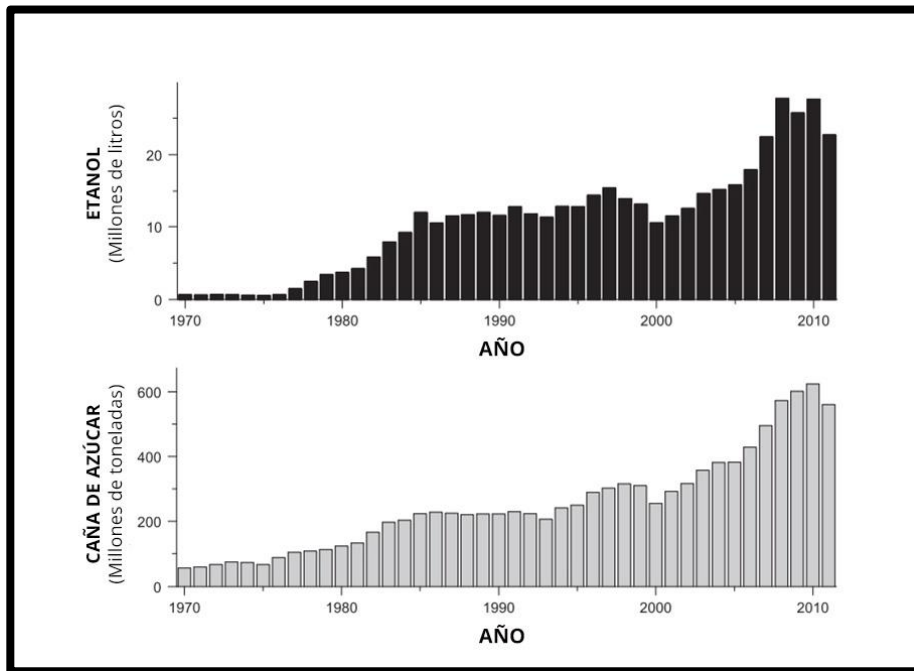


Figura 4.7 Evolución de la producción de caña de azúcar y etanol en Brasil entre 1970 y 2011 (MAPA, 2013)

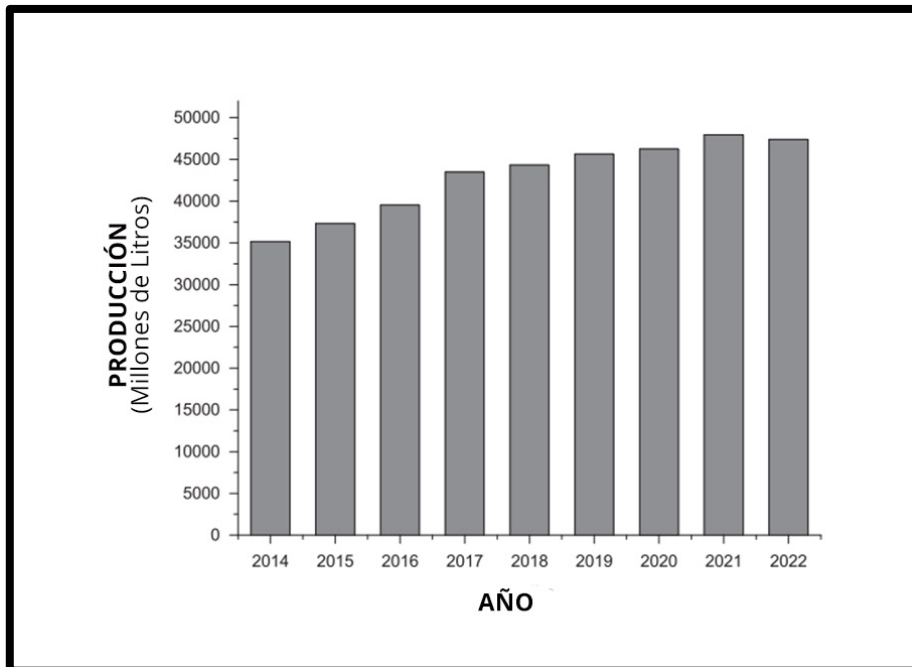


Figura 4.8 Perspectivas de la producción de etanol hasta 2022 (OECD y FAO, 2013)

El reemplazo del combustible de aviación por el etanol causó una disminución en los costos de funcionamiento (hasta un 40%) y la mejora ambiental. Los

monoplanos son impulsados por motores de pistón y ampliamente utilizados en la agricultura brasileña, representando el 75% de las ventas en el sector. El 25% de estos aviones funcionan con etanol (Stump, 2011).

Además del etanol, también se están estudiando alcoholes superiores como combustibles alternativos para la aviación como es el caso del n-butanol. El n-butanol es un competidor directo del etanol para el uso de combustible, producido a partir de biomasa a través de procesos de fermentación, además de su producción a partir de combustibles fósiles, es menos hidrófilo y contiene mayor concentración de energía, mayor número de cetano, mayor viscosidad, menor presión de vapor y mayor punto de inflamación. En comparación con el biodiésel, el n-butanol contiene un mayor contenido de hidrógeno, lo que conduce a la disminución de la generación de hollín en la combustión, y la gama de gases de combustión es baja, lo que genera niveles más bajos de NO_x (Rakopoulos y col., 2010; Jin y col., 2011).

A pesar de todas sus ventajas, la baja producción (10 a 30 veces inferior a la producción de etanol) es un factor limitante para su uso.

b) Celdas de hidrógeno

Las tecnologías de celdas de hidrógeno se destacan entre las formas más eficientes y más limpias de transformar la energía eléctrica en energía transportable y han recibido mucha atención en Brasil, país con gran potencial en

el desarrollo de esta tecnología. En cuanto a la producción de hidrógeno, actualmente existe una amplia gama de rutas disponibles en Brasil. La producción de electrólisis es una ruta muy utilizada incluso cuando se emplea energía hidráulica, solar o eólica. Cuando estas energías se utilizan en picos para la producción de hidrógeno, es posible obtener celdas de combustible a la mitad del valor de producción de algunos combustibles fósiles (MME, 2014).

En Brasil, varios proyectos relacionados con la producción de hidrógeno con fines de combustible para vehículos son desarrollados y financiados por empresas e institutos como FINEP, PETROBRAS, CNPq y Fundación de Amparo del Estado de Río de Janeiro (FAPERJ) (Laborde, 2010). En 2010, la energía eléctrica utilizada en la electrólisis procedente de pequeñas y grandes centrales hidroeléctricas representó más del 78% de toda la energía doméstica generada en Brasil y permitió que el país representara el 11.5% de toda la electricidad generada en el mundo. Además, Brasil cuenta con tecnologías hídricas y eólicas que condicionarían la producción de energías renovables para satisfacer toda la demanda actual y ser consumidas hasta el año 2050 (Carvalho y de Sauer, 2013). Esta gran disponibilidad de agua garantiza el suministro de energía a precios mucho más bajos en comparación con otros países.

Junto con el proceso de electrólisis, se conocen y difunden otros métodos con el objetivo de obtener hidrógeno, como el reformado con vapor, el reformado parcial de oxidación, el reformado auto térmico y el reformado en seco. Además, también

se reportan otros procesos no convencionales como el reformado termoplástico y descomposición catalítica (Ahmad y col., 2013).

Las características de las celdas de hidrógeno garantizan condiciones de operación favorables de este combustible en los aviones de reacción, especialmente debido a su alta densidad de energía, lo que permite una alta potencia y presenta un bajo punto de congelación, así como baja corrosividad.

c) Ésteres de ácidos grasos

El biodiésel es un sustituto natural y renovable para el diésel fósil producido utilizando alcoholes mono-hidroxilados de cadena corta, ya sea en presencia o no de un catalizador homogéneo, heterogéneo y enzimático (Kucek y col., 2007; Cordeiro y col., 2008). El biodiésel tiene una gran ventaja para presentar tecnologías de producción definidas y de gran disponibilidad de materias primas, especialmente en Brasil. En cuanto a la producción de aceite vegetal, Brasil tiene 150 millones de hectáreas que pueden ser incorporadas a la producción agrícola. El país tiene una diversidad edafo-climática a lo largo de su extensión asegurando el cultivo y producción de otros cultivos tales como soya, babasu, cacahuate, girasol, crambe, palma, jatropha, canola y otros (Costa, 2004).

A pesar de esto, el biodiésel sigue sufriendo muchos retos para convertirse en un combustible potencial de aviones debido a su bajo poder calorífico y alto punto de congelación. Además, las características y propiedades de los ésteres varían

considerablemente dependiendo de la materia prima utilizada en su obtención y algunos contaminantes pueden ser nocivos en la combustión de los motores (Bradshaw y col., 2008). Con el fin de cumplir especificaciones requeridas, muchos vuelos de prueba se han realizado con mezclas de biodiésel y combustibles fósiles que apuntan a mejoras en el bajo poder calorífico y propiedades de punto de congelación (Hong y col., 2013). Los materiales grasos con altas cantidad de ácido láurico (12 carbonos en la cadena) son ideales para ser utilizados en la generación de combustible de aviación por no requerir fases de craqueo, lo que reduce los costos de inversión.

d) Bioqueroseno FT-SPK

El bioqueroseno parafínico sintético se forma mediante la transformación de material graso animal y vegetal y posteriormente sometido al proceso Fischer Tropsch (FT) (Baena-Zambrana y col., 2013). Los combustibles obtenidos a través de FT pueden sustituir, parcial o totalmente, los combustibles fósiles utilizados en la aviación y reducir el ciclo de vida de las emisiones de GEI en un 80% comparado con los combustibles fósiles (Rye y col., 2010; Stratton y col., 2010).

Otro método interesante es la licuefacción directa. Este proceso se ha estudiado desde los años 80's y el método supone la conversión de biomasa bajo altas presiones (150-250 bar) y altas temperaturas (330-370°C), a altas proporciones de agua a biomasa (3:1-10:1), además de tiempos de residencia de 4 a 10 min. Esta tecnología proporciona una gran flexibilidad para la energía y facilita el trabajo con

desechos y sustratos de alta humedad. El bioaceite obtenido de este proceso puede servir como materia prima para refinerías en la obtención de combustibles líquidos de alto estándar (Bensaid y col., 2012). Según Swain y col. (2011), la licuefacción directa convierte la biomasa en un combustible líquido sin generar gas de síntesis, y este método promete una mejora significativa de la eficiencia térmica en comparación con los procesos de producción de gas de síntesis, donde el combustible se obtiene por conversión termoquímica a bajas temperaturas y alta presión, usando un catalizador en presencia de oxígeno.

Otro método anterior al proceso FT, donde hay generación de gas de síntesis, es el proceso de gasificación del plasma de biomasa. El plasma es un medio con niveles extremadamente altos de energía concentrada, y para los procesos de gasificación se requieren niveles muy bajos en comparación con otros métodos para desarrollar este proceso. El uso del plasma promueve contaminación mínima y baja solubilización del gas de síntesis, facilitando el control de la composición del gas producido (Seiler y col., 2010; Hlina y col., 2010; Oost, 2009).

En un sistema de plasma, las moléculas son ionizadas por descarga eléctrica. Para generar plasma, se utilizan descargas de corriente continua, alterna, inducción o microondas. Los plasmas fríos se generan bajo condiciones de vacío mientras que los plasmas térmicos se consiguen bajo condiciones atmosféricas. Los procesos de gasificación usan típicamente sistemas de plasma térmico en corrientes de descarga alterna o continua con una antorcha de plasma en arco (Heidenrich y Fuscolo, 2014). En el trabajo realizado por Hlina y col. (2014),

encontraron que la gasificación de residuos de madera, plásticos y aceites de pirólisis con antorcha de plasma aseguraba la producción de gas de síntesis de alta calidad y con altos niveles de CO y H₂. Por su parte, en el trabajo de Materazzi y col. (2013), los autores concluyeron que el proceso de plasma de lecho fluidizado combinado aseguró mejoras significativas en la conversión de carbono y el rendimiento de gas, logrando así un alto energético.

Hileman y col. (2010), abordaron este tema en un estudio sobre varios combustibles para la aviación y demostraron que el bioqueroseno producido por medio del proceso FT o por hidrotatamiento fue responsable de una reducción del consumo de energía del 0.3%. De acuerdo con Llamas y col. (2012) el bioqueroseno de coco y de palma se puede mezclar hasta en un 10% del volumen total con Jet-A1 comercial y aun cumplir con las especificaciones actuales establecidas por la legislación, haciendo viable el uso de mezclas en la aeronáutica y favoreciendo la reducción del uso de combustibles fósiles.

e) Licuefaccion Hidrotérmica

La licuefacción hidrotérmica (LH) es una tecnología que utiliza agua en un estado subcrítico, con temperaturas generalmente superiores a 250°C y presión que oscila entre 5 y 25 MPa para convertir la biomasa en aceites ricos en carbono (Toor y col., 2011; Valdez y col., 2014). Este proceso se emplea normalmente en la transformación de biomasa de algas en biocombustibles, apuntando a especies

con menor contenido de lípidos, ya que su contenido de lípidos puede aumentar en 5 a 30% (Anastasakis y Ross, 2011; Valdez y col., 2014).

Varios trabajos han evaluado el ciclo de vida de la obtención de biocombustibles de microalgas (Chowdhury y col., 2012; Liu y col., 2013b; Grierson y col., 2013) y concluyeron que las etapas de deshidratación son la que consumen más energía, por lo que la extracción de lípidos de las especies estudiadas es poca práctica. Por lo tanto, el proceso LH se hace más evidente porque descarta el secado completo de la biomasa, siendo considerado más sostenible en comparación con los métodos convencionales de extracción (Sander y Murthy, 2010).

Las microalgas pueden utilizarse para obtener diversos tipos de biocombustibles como el biodiésel, el metano, el hidrógeno, el etanol y otros, sin embargo, en Brasil, el biodiesel y, más recientemente, el bioqueroseno son los que más interés tienen (Mata y col., 2010; Baena-Zambrana, 2013; Hileman y Stratton, 2014). En Brasil, el cultivo de algas se realiza principalmente en sistemas al aire libre y en estanques de estabilización, ya que se presentan menores costos finales en la obtención de biocombustibles (Pittman y col., 2011).

Los combustibles de aviación corresponden aproximadamente el 8% del consumo mundial de petróleo y este número tiende a aumentar si no realizan inversiones en el desarrollo de combustibles alternativos, como es el caso del proceso LH (Patil y col., 2008). En Brasil esto no será diferente. El país hasta ahora ha invertido en tecnología para el biodiésel de la aviación, ahora comienza a centrar su atención

en el bioqueroseno, que presenta una mayor densidad energética y también debido a los sistemas de aire libre para el tratamiento de residuos industriales que están disponibles para el cultivo de microalgas (Rosa y col., 2011; Borges y col., 2013).

Aliadas a la creciente demanda de combustibles de aviación y a la preocupación por las consecuencias del uso de combustibles fósiles, se están creando diversas medidas de mitigación para introducir, a mediano y a largo plazo, combustibles alternativos a partir de microalgas, hidrógeno, bioqueroseno y etanol. Esto se debe principalmente a la posibilidad de un ciclo parcial de carbono, que es extremadamente importante en el escenario actual y futuro (ANAC, 2008).

Aunque Brasil presenta una historia interesante sobre la producción y uso de biocombustibles líquidos y una gran base industrial con disponibilidad de materias primas para la producción de biodiésel y bioetanol, debe ser cauteloso con la introducción masiva en un corto periodo de tiempo de estos biocombustibles al segmento del transporte aéreo (CGEE, 2010). Sabiendo que las materias primas más importantes para la producción de bioqueroseno son los aceites vegetales y las grasas, se debe tener en cuenta el escenario brasileño actual para el uso del biodiésel, otro combustible cuya producción depende de cultivos de semillas oleaginosas.

CONCLUSIONES

Ante la problemática ambiental actual y en busca de un desarrollo sustentable para combatir el cambio climático los biocombustibles surgen como una solución factible para reducir la contaminación ambiental y las emisiones de CO₂. Aunado a lo anterior las industrias de la aviación y diferentes instituciones gubernamentales han implementado importantes planes y acuerdos siendo el principal objetivo la reducción del 50% de emisiones de CO₂ para el año 2050 con respecto a los niveles del año 2005, planteado por la Asociación Internacional del Transporte Aéreo.

Los aceites vegetales son la materia prima más utilizada para la generación de biocombustible aéreo, en especial la jatropha que en la actualidad es el principal cultivo destinado a la producción del mismo. Además, existe una gran variedad de materias primas que podrían utilizarse sin embargo se deben tomar en cuenta factores como la sustentabilidad, rendimiento, el costo y la disponibilidad para su implementación a gran escala.

Por su parte, la ruta de hidroprocesamiento de ácidos grasos y sus ésteres es el proceso más importante que se emplea actualmente a nivel comercial para la producción de biocombustible. Se espera que en los próximos años los otros tres procesos puedan aprobarse para su uso comercial.

Existen un gran número de iniciativas y proyectos alrededor de todo el mundo por parte de diferentes empresas, instituciones y gobiernos, siendo Estados Unidos,

Brasil y Holanda los principales países enfocados en la producción y uso de biocombustibles para el sector aéreo.

A pesar de que ya existe un gran avance de los biocombustibles en el sector de la aviación, la investigación, la inversión y los futuros avances tecnológicos en los ramos de la biotecnología e ingeniería genética serán factores clave para lograr obtener biocombustibles más sostenibles con mayores beneficios ambientales, sociales y económicos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abe, Y. 2009. JAL biofuel flight demonstration. The Boeing Company. Seattle, Washington, EE.UU.

Adhikari, B.K., Barrington, S., Martinez, J., 2006. Predicted growth of world urban food waste and methane production. *Waste Manag. Res.* 24: 421-433.

Ahmad, I., Fatma, Z., Yazdani, S.S., Kumar, S. 2013. DNA barcode and lipid analysis of new marine algae potential for biofuel. *Algae Res.* 2(1): 10–15.

Airshow, B. 2012. Breaking the barriers with breakthrough jet fuel solutions. Renewable aviation fuel joint development program.

Almanec C.Q., 1985. Congress Dismantles Synthetic Fuels Program, Fortyfirst ed. Congressional Quarterly. Washington, EE.UU.

Amezcuca, M.A., Gutiérrez, J.C. y Aburto, J.A. 2016. Combustibles avanzados de aviación. Gerencia de Transformación de Biomasa. Dirección de Investigación en Transformación de Hidrocarburos. Publicación del Instituto Mexicano del Petróleo. Ciudad de México, México.

Amyris, 2013. Total alternative aviation fuel partnership—direct sugar to hydrocarbon (DSHC) jet biofuel. Emeryville, California, EE. UU.

ANAC, 2008. Relatório do 1º seminário internacional aviação e mudanças climáticas-atualidades e perspectivas. The National Civil Aviation Agency. Brasília, Brasil.

Anastasakis, K. y Ross, A.B. 2011. Hydrothermal liquefaction of the brown macroalga *Laminaria Saccharina*: effect of reaction conditions on product distribution and composition. *Bioresour. Technol.* 102: 4876–4883.

ATAG, 2005. The Economic and Social Benefits of Air Transport. Air Transport Action Group. Ginebra, Suiza.

ATAG, 2009. Beginner's guide to aviation biofuels. Geneva: Air Transport Action Group. Ginebra, Suiza.

ATAG, 2011. Beginner's Guide to Aviation Biofuels. Air Transport Action Group. 2nd edition. Ginebra, Suiza.

Baena-Zambrana, S., Repetto, S.L., Lawson, C.P. y Lam, J.K.-W. 2013. Behaviour of water in jet fuel. A literature review. *Prog. Aerosp. Sci.* 60: 35–44.

Bauen, A., Howes, J., Bertuccioli, L. y Chudziak, C. 2009. Review of the potential

for biofuels in aviation. Publicacion de: E4tech. Londres, Inglaterra.

Bello, BZ. 2012. Captured CO₂ to grow microalgae for bio-jet fuel production UKCCSC Winter School University of Cambridge. Cambridge, Inglaterra.

Bensaid, S., Conti, R., Fino, D. 2012. Direct liquefaction of lignocellulosic residues for liquid fuel production. **Fuel** **2012**. 94: 324–332.

Berti, M., Wilckens, R., Fischer, S., Solis, A y Johnson, B. 2011. Seeding date influence on camelina seed yield, yield components, and oil content in chile. **Ind. Crops Prod.** 34: 1358-1365.

Boeing, 2009. Aviation and the environment, demonstrating commitment with action. Publicación de The Boeing company. Chicago, Illinois, EE.UU.

Borges, J.A., Rosa, J.M. y Meza, L.H.R. 2013. Spirulina sp. LEB-18 culture using effluent from the anaerobic digestion. **Braz. J. Chem. Eng.** 30: 277-287.

Borrion, A.L., McManus, M.C. y Hammond, G.P. 2012. Enviromental life cycle assessment of lignocellulosic conversion to ethanol: a review. **Renew. Sustain. Energy Rev.** 16: 655-661.

Bradshaw, A., Simms, N.J. y Nicholls, J.R. 2008. Passage of trace metal contaminants through hot gas paths of gas turbines burning biomass and waste-fuels. **Fuel.** 87: 3529–3536.

Brewer, G. D., 1991. Hydrogen Aircraft Technology. Editado por CRC Press. Pág. 400-408. Boca Raton, Florida, EE.UU.

Bsnabc, 2013. A Sharp Fluctuation in Domestic Rapeseed Oil Price in 2012. Publicación de: Beijing Shennong Kexin Agribusiness Consulting Co. L. Beijing, China.

Burton, R.A. y Fincher, G.B., 2014. Plant cell wall engineering: applications in biofuel production and improved human health. **Curr. Opin. Biotechnol.** 26: 79-84.

BYOGY Renewables, 2011. Alcohol To Jet (ATJ) emerging through ASTM. ICAO aviation and sustainable alternative fuels workshop. Publicación de: BYOGY Renewables. Montreal, Canada.

Carlsson, A.S., Zhu, L.H., Andersson, M. y Hofvander, P., 2014. Platform crops amenable to genetic engineering - a requirement for successful production of bio-industrial oils through genetic engineering. **Biocatal. Agric. Biotechnol.** 3: 58-64.

Carvalho, J.F. y de Sauer I.L. 2013. An interconnected system hidroeólico for Brazil [in portuguese]. **Estud. Av.** 27(77):117–124.

CGEE, 2010. Biocombustíveis Aeronauticos. Serie de Documentos Técnicos, 8. Centro de Gestao e Estudos Estrategicos. Brasilia, Brasil.

Chowdhury, R., Viamajala, S. y Gerlach, R. 2012. Reduction of environmental and energy footprint of microalgal biodiesel production through material and energy integration. **Bioresour Technol.** 108: 102–111.

Chuck, C., Wagner, J. y Jenkins, R. 2014. Biofuels from microalgae. **Chem. Process. Sustain. Future.** 425.

Chuck, C. J. 2016. Biofuels for Aviation: Feedstocks, Technology and Implementation. Publicacion de: Department of Chemical Engineering, University of Bath. Bath, Inglaterra. Págs. 3-15.

Chuck, C.J. y Donnelly, J. 2014. The compability of potential bioderived fuels with jet A-1 aviation kerosene. **Appl Energy** 2014. 118: 83-91.

ClearFuels-Rentech, 2011. Integrated Pilot Project for Fuel Production by Thermochemical Conversion of Woodwaste. Energy Efficiency and Renewable Energy. U.S. Department of Energy. Colorado, Denver, EE.UU.

Cordeiro, C.S., Arizaga, G.G.C. y Ramos, L.P. 2008. A new zinc hydroxide nitrate heterogeneous catalyst for the esterification of free fatty acids and the transesterification of vegetable oils. *Catalysis Commun.*; 9: 2140–2143.

Costa, R.C. 2004. Potential for producing biofuel in Amazon deforested areas. **Biomass Bioenergy.** 26: 405–415.

Couto, S.R. y Sanroman, M.A. 2006. Application of solid-state fermentation to food industry- a review. **J. Food Eng.** 76: 291-302.

Dale, B.E., Anderson, J.E., Brown, R.C., Csonka, S., Dale, V.H. y Herwick, G., 2014. Take a closer look: biofuels can support environmental, economic and social goals. **Environ. Sci. Technol.** 48: 7200-7203.

Dalri, A.B. y Cruz, R.L. 2002. Effect of subsurface drip irrigation frequency on the development of sugarcane (*Saccharum spp.*). **Irriga.** 7: 29–34.

Davis, R., Aden, A. y Pienkos, P.T. 2011. Techno-economic analysis of autotrophic microalgae for fuel production, **Appl. Energy.** 88: 3524-3531.

Deltares, 2011. The Deltares 2011 R & D Annual Report. Publicación de: Deltares. Delft, Países Bajos.

Derenne, S., Largeau, C., Hetenyi, M., Brukner-Wein, A., Connan, J. y Lugardon, B. 1997. Chemical structure of the organic matter in a Pliocene maar-type shale:

implicated *Botryococcus* race strains and formation pathways, ***Geochim. Cosmochim. Acta.*** 61: 1879-1889.

Deutsche Airbus, 2000. Euro-Quebec Hydro-Hydrogen pilot project: aerospace applications. Final Report.

DOE, 2012. Fermentation of Sugars to Hydrocarbon. Energy Efficiency & Renewable Energy. Biomass Technologies Office. Department of Energy. Washington D.C., EE.UU.

EC, 2001. European aeronautics: a vision for 2020. Meeting society's needs and winning global leadership. Report of the Group of Personalities. Publicación European Comission. Bruselas, Bélgica.

EC, 2013. 2 million tons per year: a performing biofuels supply chain for EU aviation. Publicación de: European Comission. Bruselas, Bélgica.

EC, 2011. Flightpath 2050: Europe's vision for aviation. Report of the high level of group on aviation research. Publicación de: European Comission. Bruselas, Bélgica.

EC, 2015. Reducing emissions from aviation. Publicacion de European Comission. Bruselas, Bélgica.

EIA, 2013. Jet Fuel Monthly Price (US Dollars per Gallon). Publicación de: Energy Information Administration. Washington D. C., EE.UU.

EIA, 2015. International energy statistics. Publicación de: Energy Information Administration. Washington D. C., EE.UU.

EPA, 2010. Program overview for renewable fuel standard program. Environmental Protection Agency. Washington D. C., Estados Unidos.

EPA, 2015. EPA takes first steps to address greenhouse gas emissions from aircraft. Environmental Protection Agency. Washington D. C., Estados Unidos.

EQ2, 2010. Sustainable flying: biofuels as an economic and environmental salve for the airline industry. EQ2 insight, managing the future today.

EurObserv'ER, 2017. Biofuel Barometer. Publicacion de: EurObserv'ER. París, Francia.

Eurostat, 2012. Energy, transport and environment indicators. Eurostat Pocketbooks. Publicaton Office of the European Union. Luxemburgo, Luxemburgo.

FAA, 2012. Aviation Environmental and Energy Policy Statement, Publicación de: Department of Transportation. Federal Aviation Administration. Washington, EE.UU.

FAO, 2015. FAO Statistical Pocketbook. Food and Agricultural Organisation of the United Nations. Roma, Italia.

Fazio, S. y Monti, A. 2011. Life cycle assessment of different bioenergy production systems including perennial and annual crops. **Biomass Bioenergy**. 35: 4868-4878.

Fimeche, C. y Fox, T. 2013. Global Food: Waste not, Want Not. Publicación de: Institute of Mechanical Engineers. Londres, Inglaterra.

Finkbeiner, M. 2014. Indirect land use change - Help beyond the hype?. **Biomass Bioenergy**. 62: 218-221.

Gasparatos, A., Stromberg, P. y Takeuchi, K. 2013. Sustainability impacts of first-generation biofuels. **Anim. Front**. 3: 12-26.

Gill, S.S, Tsolakis, A., Dearn, K.D. y Rodriguez-Fernandez, J. 2011. Combustion characteristics and emissions of Fischer-Tropsch diesel fuels in IC engines. **Prog Energy Combust Sci**. 37(4): 503–523.

Gong, D.Y., Kaario, O., Tilli, A., Larmi, M. y Tanner, F.X. 2010. A computational investigation of hydrotreated vegetable oil sprays using RANS and a modified version of the Rng K-e model in OpenFOAM. En Memorias de: SAE World Congress. Detroit, Michigan, EE.UU.

Grierson, S., Strezov, V. y Bengtsson, J. 2013. Life cycle assessment of a microalgae biomass cultivation, bio-oil extraction and pyrolysis processing regime. **Algal Res**. 2: 299–311.

Griffin, W.M. y Scandiffio, M.I.G. 2009. Can Brazil replace 5% of the 2025 gasoline world demand with ethanol? **Energy**. 34: 655-661.

Gupta, A. y Verma, J.P., 2015. Sustainable bio-ethanol production from agro-residues: a review. **Renew. Sustain. Energy Rev**. 41: 550-567.

Hamelinck, C., Cuijpers, M., Spoettle, M. y van den Bos, A. 2013. Biofuels for aviation. ECOFYS. Utrecht, Países Bajos.

Heidenreich, S. y Fuscolo, P.U. 2014. New concepts in biomass gasification. **Prog. Energy Combust. Sci**. 46: 72–95.

Hileman, J., Stratton, R. y Donohoo, P. 2010. Energy content and alternative jet fuel viability. **J Propuls Power**. 26 (6): 1184-1195.

Hlina, M., Hrabovsky, M., Kavka, T. y Konrad, M. 2014. Production of high quality syngas from argon/water plasma gasification of biomass and waste. **Waste Manag.** 34: 63–66.

Hlina, M., Hrabovsky, M., Konrad, M., Kopecky, V., Kavka, T. y Lorcet, H. 2010. Properties of synthetic gas produced by plasma gasification of biomass. (INP Greifswald). Proc. XVIII Int. Conf. Gas Disch. Appl. Department of Flow, Heat and Combustion Mechanics, Ghent University. Ghent, Bélgica.

Ho, D.P., Ngo, H.H. y Guo, W., 2014. A mini review on renewable sources for biofuel. **Bioresour. Technol.** 169: 742-749.

Hoekman, S.K., Broch, A., Robbins, C., Cenicerros, E. y Natarajan, M. 2012. Review of biodiesel compositions, properties, and specifications. **Renew. Sustain. Energy Rev.** 16: 143-169.

Hong, T.D., Soerawidjaja, T.H., Reksowardojo, I.K., Fujita, O., Duniani, Z. y Pham, M.X. 2013. A study on developing aviation biofuel for the tropics: production process – experimental and theoretical evaluation of their blends with fossil kerosene. Faculty of Mechanical and Aerospace Engineering, Institut Teknologi Bandung. Bandung, Indonesia.

IATA, 2009. Alternative fuels foreword. Report on alternative fuels. Publicacion de: International Air Transport Association. La Habana, Cuba.

IATA, 2011. IATA report on alternative fuels. Publicación de: International Air Transport Association. 6th edition. La Habana, Cuba.

IATA, 2012. Annual Report. International Air Transport Association. La Habana, Cuba.

IATA, 2013a. Report on Alternative Fuels, eighth ed. International Air Transport Association. La Habana, Cuba.

IATA, 2013b. Reducing emissions from aviation through carbon-neutral growth from 2020. A Position Paper presented by the Global Aviation Industry. International Air Transport Association. La Habana, Cuba.

IATA, 2014. The Alternative Fuels Report. Publicación de: International Air Transport Association. La Habana, Cuba.

ICAO, 1975. Civil Aviation Statistics of the World. International Civil Aviation Organization. Montréal, Canadá.

ICAO, 1999. Civil Aviation Statistics of the World. International Civil Aviation Organization. Montréal, Canadá.

ICAO, 2011. Alcohol to Jet (ATJ) engineering through ASTM. ICAO aviation and sustainable alternative fuels workshop. Publicación de: International Civil Aviation Organization Montréal, Canadá.

ICAO, 2013. Assembly resolutions in force. Publicación de: International Civil Aviation Organization. Montreal, Canadá.

ICAO, 2014. Annual Report of the ICAO Council. International Civil Aviation Organization. Montreal, Canadá.

IEA, 2006. World energy outlook, Chapters 2, 3, 14. International Energy Agency. París, Francia.

IEA, 2015. Energy balances from OECD and Non-OECD Countries. Publicación de: International Energy Agency/OECD. París, Francia.

IEA, 2016. CO₂ emissions from fuel combustion statistics. International Energy Agency. París, Francia.

IPCC, 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Publicación de: Intergovernmental Panel on Climate Change. Ginebra, Suiza.

Jenkins, R.W., Munro, M., Nash, S. y Chuck, C.J. 2013. Potential renewable oxygenated biofuels for the aviation and road transport sectors. ***Fuel* 2013**. 103: 593–599.

Jenkins, R.W., Stageman, N.E., Fortune, C.M. y Chuck, C.J. 2014. Effect of the type of bean, processing, and geographical location on the biodiesel produced from waste coffee grounds. ***Energy Fuels***. 28: 1116-1174.

Jenkins, R.W., Sargeant, L.A., Whiffin, F.M., Santomauro, F., Kaloudis y Mozzanega, P. 2015. Crossmetathesis of microbial oils for the production of advanced biofuels and chemicals. ***ACS Sustain, Chem. Eng.*** 3: 1526-1535.

Jin, C., Yao, M., Liu, H., Lee, C.F. y Ji, J. 2011. Progress in the production and application of n-butanol as a biofuel. ***Renew Sustain. Energy Rev.*** 15: 4080–4106.

Jung, K.A., Lim, S.-R., Kim, Y. y Park, J.M., 2013. Potentials of macroalgae as feedstocks for biorefinery. ***Bioresour. Technol.*** 135: 182-190.

Kalnes, T., McCall, M. y Shonnard, D. 2010. Renewable diesel and jet-fuel production from fats and oils. Thermochemical conversion of biomass to liquid fuels and chemicals. Publicación de: Royal Society of Chemistry. Londres, Inglaterra.

Knorz, D. y Szodruch, J. 2012. Innovation for Sustainable Aviation in a Global Environment. En: Proceedings of the Sixth European Aeronautics Days. IOS Press. Madrid, España.

Koh, M.Y. y Ghazi, T.I.M. 2011. A review of biodiesel production from *Jatropha curcas* L. Oil. **Renew. Sustain. Energy Rev.** 15: 2240-2251.

Kraan, S. 2013. Mass-cultivation of carbohydrate rich macroalgae, a possible solution for sustainable biofuel production. **Mitig. Adapt. Strategies Glob. Change.** 18: 27-46.

Kubickova, I. Kubicka, D. 2010. Utilization of triglycerides and related feedstocks for production of clean hydrocarbon fuels and petrochemicals: a review. **Waste Biomass Valor 2010.** 1: 293-308.

Kucek, K.T., MAFC, Oliveira, Wilhelm, H.M., Ramos, L.P.J. 2007. Ethanolysis of refined soybean oil assisted by sodium and potassium hydroxides. **Am Oil Chem. Soc.** 84: 385–392.

Kulkarni, M. y Dalai, A. 2006. Waste cooking oil an economical source for biodiesel: a review. **Ind. Eng. Chem. Res.** 45: 2901-2913.

Kumar, A. 2010. Bio-Jet fuels: a step towards green aviation. Indian Oil Corporation R & D Centre. Faridabad, Haryana, India.

Kumar, A. y Sharma, S. 2008. An evaluation of multipurpose oil seed crop for industrial uses (*Jatropha curcas* L.): a review. **Ind. Crops Prod.** 28: 1-10.

Laborde, M. 2010. Potencialidades del hidrógeno como vector de energía en Iberoamérica. Ediciones CYTED. Buenos aires, Argentina.

Laipe, E.M.O., Fernandes, P.D., Oliveira, D.C.S., Freire, E.A. 2011. Technological possibilities for the allocation of vinasse: a review [in portuguese]. **Revista Trópica: Ciências Agrárias e Biológicas.** 5: 16–29.

Lapuerta, M., Villajos, M., Agudelo, JR. y Boehman, AL. 2011. Key properties and blending strategies of hydrotreated vegetable oil as biofuel for diesel engines. **Fuel Process Technol.** 2011. 92: 2406-2411.

Lee, D S., Fahey D W., Forster, P M., Newton, P J., Wit, R C N. y Lim, LL. 2009. Aviation and global climate change in the 21st century. **Atmos Environ.** 43: 3520-3527.

Lewandowski, I., Scurlock, J.M.O, I, Lindvall E. y Christou M., 2003. The development and current status of perennial rhizomatous grasses as energy crops in the US and Europe. **Biomass Bioenergy** 25: 335-361.

Li, Q., Du, W. y Liu, D. 2008. Perspectives of microbial oils for biodiesel production. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 80: 749-756.

Lin, C.S.K., Pfaltzgraff, L.A., Herrero-Davila, L., Mubofu E.B., Abderrahim S., Clark J.H. 2013. Food waste as valuable resource for the production of chemicals, materials and fuels. *Curr. Situat. Global Perspect. Energy Environ. Sci.* 6: 426-464.

Liu, G., Yan, B., & Chen, G. 2013a. Technical review on jet fuel production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* 25: 59-70.

Liu, X., Saydah, B. y Eranki, P. 2013b. Pilot-scale data provide enhanced estimates of the life cycle energy and emissions profile of algae biofuels produced via hydrothermal liquefaction. *Bioresour. Technol.* 148: 163–171.

Liu, Y., Xu, Y., Zhang, F., Yun, J. y Shen, Z. 2014. The impact of biofuel plantation on biodiversity: a review. *Chin. Sci. Bull.* 59: 4639-4651.

Llamas, A., Garcia-Martinez, M., Al-Lal, A., Canoira, L. y Lapuerta, M. 2012. Biokerosene from coconut and palm kernel oils: production and properties of their blends with fossil kerosene. *Fuel* 2012. 102: 483-490.

Long, S.P., Marshall-Colon y Zhu, X.G. 2015. Meeting the global food demand of the future by engineering crop photosynthesis and yield potential. *Cell* 161: 56-66.

López-Bellido, L., Wery, J. y López-Bellido, R., 2014. Energy crops: prospects in the context of sustainable agriculture. *Eur. J. Agron.* 60: 1-12.

MAPA, 2010. National balance of sugar cane and Agroenergy. Publicación de: Ministério da Agricultura, Pecuária E Abastecimento. Brasília, Brasil.

MAPA, 2013. Anuário Estatístico da Agroenergia 2012 [Statistical Year book of Agroenergy]. Publicación de: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Secretaria de produção e agronergia. Brasília, Brasil.

Marsh, G. 2008. Biofuels: aviation alternative? *Renew Energy Focus.* 9(4): 48–51.

Mata, T.M., Martins, A.A., Caetano, N.S., 2010. Microalgae for biodiesel production and other applications: a review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* Págs. 217-232.

Materazzi, M., Lettieri, P., Mazzei, L., Taylor, R. y Chapman, C. 2013. Thermodynamic modeling and evaluation of a two-stage thermal process for waste gaseification. *Fuel* 2013. 108: 356–369.

Matsuoka, S., Kennedy, A.J., dos Santos, E.G.D, Tomazela, A.L., y Rubio, L.C.S., 2014. Energy cane: its concept, development, characteristics, and prospects. *Adv. Bot.* 2014.

McGlade, C. y Ekins, P. 2015. The geographical distribution of fossil fuels unused when limiting global warming to 2° C.º. **Nature**. 517: 187-190.

McManus, M. y Taylor, C. 2015. The changing nature of life cycle assessment. *Biomass Energy*.

Metz, B., Davidson, O., Bosch P., Dave, R. y Meyer L. 2007. IPCC Climate change 2007: mitigation, contribution of working group 3 to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, Cambridge University Press: Cambridge, Inglaterra y New York, EE.UU.

Mikkonen, S., Hartikka, T., Kuronen, M. y Saikkonen, P.H.V.O. 2012. Hydrotreated vegetable oil-a premium renewable biofuel for diesel engines. Publicación de: Neste Oil Proprietary. Espoo, Finlandia.

Mitchell, P. 2012. Aviation biofuels. All energy. University of Aberdeen. Aberdeen, Escocia

MME, 2014. Boletim Mensal dos Combustíveis Renováveis. Publicación de: Ministerio de Minas e Energia. Brasília, Brasil.

Moreira M., Gurgel A.C. y Seabra J.E., 2014. Life cycle greenhouse gas emissions of sugar cane renewable jet fuel, **Environ. Sci. Technol.** 48: 14756-14763.

Mosqueira-Salazar, K.J., Palacios-Bereche, R., Cháves-Rodríguez, M., Seabra, J. y Nebra, S.A. 2013. Reduction of water consumption in an integrated first- and second-generation ethanol plant. **Energy Sustain. Dev.** 17: 531–535.

Mussato, S.I., Dragone, G., Guimaraes, P.M., Silva, J.P.A., Carneiro, L.M., Roberto, I.C. 2010. Technological trends, global market, and challenges of bio-ethanol production. **Biotechnol. Adv.** 28: 817-830.

Natarajan, K., Leduc, S., Pelkonen, P., Tomppo, E. y Dotzauer, E. 2014. Optimal locations for second generation Fischer Tropsch biodiesel production in Finland. **Renew Energy** 2014. 62: 319–330.

Nguyen, T.L.T., Hermansen, J.E., Mogensen, L., 2013. Environmental performance of crop residues as an energy source for electricity production: the case of wheat straw in Denmark. **Appl. Energy**. 104: 633-641.

NOAA, 2015. ESRL data. Trends in atmospheric carbon dioxide. National Oceanic and Atmospheric Administration. Silver Spring, Maryland, EE.UU.

OECD, 2012. Green growth and the future of aviation. Paper prepared for the 27th Round Table on Sustainable Development to be held at OECD Headquarters. París, Francia.

OECD/FAO, 2013. Agricultura Outlook. Organização de Cooperação e Desenvolvimento Econômico. Food and Agriculture Organization. París, Francia.

Oost, G.V., Hrabovsky, M., Kopeky, V., Konrad, M., Hlina, M. y Kavka, T. 2009 Pyrolysis/gasification of biomass for synthetic fuel production using a hybrid gas–water stabilized plasma torch. **Vacuum**. 83: 209–212.

Patil, V., Trank, K.Q. y Giselrod, H.R. 2008. Towards sustainable production of biofuels from microalgae. **Int. J. Mol. Sci.**: 1188-1195.

Park, K. y Ihm, S. 2000. Comparison of Pt/zeolite catalysts for n-hexadecane hydroisomerization. **Appl. Catal. A-Gen**. 203: 201–209.

Pearlson, M.N. 2011. A techno-economic and environmental assessment of hydroprocessed renewable distillate fuels. Master thesis. Massachusetts Institute of Technology. Massachusetts, EE.UU.

Penner, J., Lister, D., Griggs, J., Dokken, D. y McFarland, M. 1999. IPCC aviation and the global atmosphere. Cambridge University Press. Cambridge, Inglaterra.

Pilate, G., Guiney, E., Holt, K., Petit-Conil, M., Lapierre, C. y Leplé, J.C. 2002. Field and pulping performances of transgenic trees with altered lignification. **Nat. Biotechnol**. 20: 607-612.

Pittman, J.K., Dean, A.P., Osundeko, O. 2011. The potential of sustainable algal biofuel production using wastewater resources. **Bioresour. Technol**. 17-25.

Pleguezuelo, C., Zuazo, V., Biolders, C., Bocanegra, J., PereaTorres, F. y Martinez, J. 2015. Bioenergy farming using woody crops. A review. **Agron. Sustain. Dev**. 35: 95-119.

Rakopoulos, D.C., Rakopoulos, C.D., Giakoumis, E.G., Dimaratos, A.M. y Kyritsis, D.C. 2010. Effects of butanol–diesel fuel blends on the performance and emissions of a high-speed DI diesel engine. **Energy Convers. Manag**. 51: 1989–1997.

Ratlidge C., Cohen Z., 2008, Microbial and algal oils: do they have a future for biodiesel or as commodity oils. **Lipid Technol**. 20, 155-160.

RFA, 2015. Going Global 2015 Ethanol Industry Outlook. Publicación de: Renewable Fuels Association. Washington D.C., EE.UU.

Roberts, W.L. 2008. Bio jet fuels. In: The 5th international biofuels conference. North Carolina State University. Carolina del Norte, EE.UU.

- Rosa, A.P.C., Carvalho, L.F., Goldbeck, L. y Costa, J.A.V. 2011. Carbon dioxide fixation by microalgae cultivated in open bioreactors. ***Energy Convers. Manag.*** 3071-3073.
- Rosillo-Calle, F.D., Thrän, M., Seiffert, Teelucksingh, S. 2012. The potential role of biofuels in commercial air transport – biojetfuel. IEA Bioenergy Task 40 Sustainable International Bioenergy Trade 2012.
- Rutz, D. y Janssen, R. 2007. Biofuel technology handbook. Publicación de: WIP Renewable Energies. Munchen, Germany.
- Rye, L., Blakey, S. y Wilson, C. W. 2013. Sustainability of supply or the planet: a review of potential drop-in alternative aviation fuels. ***Energy Env. Sci.*** 3: 17–27.
- SAFN, 2011. Sustainable aviation fuels northwest: powering the next generation of flight, SAFN report.
- Sander, K. y Murthy, GS. 2010. Life cycle analysis of algae biodiesel. ***Int J Life Cycle Assess.*** 15: 704–714.
- Sargeant, L.A., Mardell, M., Saad-Allah K.M., Hussein, A.H., Whiffin, F., Santomauro, F., 2015. Production of lipid from depolymerised lignocellulose using the biocontrol yeast, *Rhodotorula minuta*: the fatty acid profile remains stable irrespective of environmental conditions. ***Eur. J. Lipid Sci. Technol.*** 118 (5): 777-778.
- Sarkar, N., Ghosh, S.K., Bannerjee, S. y Aikat, K. 2012. Bioethanol production from agricultural wastes: an overview. ***Renew. Energy.*** 37: 19-27.
- Schafer, A., Evans, A. D., Reynolds, T.G. y Dray, L. 2016. Costs of mitigating CO2 emissions from passenger aircraft. ***Nature Climate Change*** 6: 412-417.
- Schafer, A., Heywood, J. B., Jacoby, H.D. y Waitz, I.A. 2009. Transportation in a Climate-Constrained World. MIT Press. Cambridge, EE.UU.
- Seiler, J.M., Hohwiller, C., Imbach, J. y Luciani, J.F. 2010. Technical and economical evaluation of enhanced biomass to liquid fuel process. ***Energy.*** 35 (9): 3587–3592.
- Sills, D.L., Paramita, V., Franke, M.J., Johnson, M.C., Akabas, T.M. y Greene, C.H., 2012. Quantitative uncertainty analysis of life cycle assessment for algal biofuel production. ***Environ. Sci. Technol.*** 47: 687-694.
- Simacek, P., Kubicka, D., Kubickova, I., Homola, F., Pospisil, M. y Chudoba, J. 2011. Premium quality renewable diesel by hydroprocessed of sunflower oil. ***Fuel*** 2011: 902473-902479.

Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M. y Averyt, KB. 2007. IPCC Climate change 2007: the physical science basis, Contribution of working group 1 to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge University Press. Cambridge, Reino Unido.

Sosounov, V., 1989. Some aspects of hydrogen and other alternative fuels for application in air-breathing engines. IX International Symposium on Air-Breathing Engines. International Society for Air-Breathing Engines. Atenas, Grecia.

Stevenson, D. 2000. Future estimates of tropospheric ozone radiative forcing and methane turnover – the impact of climate change. *Geophys. Res. Lett.* 27(14), págs. 2073-2076.

Sticklen, M.B. 2008. Plant genetic engineering for biofuel production: towards affordable cellulosic ethanol. *Nat. Rev. Genet.* 9: 433-443.

STORA ENSO, 2009. Stora Enso and Neste Oil Inaugurate Biofuels demonstration facility at varkaus in Finland. Publicado por Neste Oil. Espoo, Finlandia.

Stratton, R.W., Wong, H.M. y Hileman, J.I. 2010. Life Cycle Greenhouse Gas Emissions from Alternative Jet Fuels. Institute of Technology. Cambridge, Massachusetts, EE.UU.

Stump, D. 2011. The application of multi-fuel technology in air transport.

Swain, P.K., Das, L.M. y Naik, S.N. 2011. Biomass to liquid: A prospective challenge to research and development in 21st century. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 15(9): 4917–3493.

Tan, K., Lee, K., Mohamed, A. y Bhatia, S. 2009. Palm oil: addressing issues and towards sustainable development. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 13: 420-427.

Toor, S.S., Rosendahl, L. y Rudolf, A. 2011. Hydrothermal liquefaction of biomass: a review of subcritical water Technologies. *Energy.* 36: 2328–2342.

UN, 2004. United Nations statistical yearbook. United Nations. New York, EE.UU.

UN, 2008. United Nations statistical yearbook. United Nations. New York, EE.UU.

UN, 2010. United Nations statistical yearbook. United Nations. New York, EE.UU.

UN, 2013. United Nations statistical yearbook. United Nations. New York, EE.UU.

UN, 2015. Framework convention on climate change. Conference of the Parties. Twenty-first session. Adoption of the Paris Agreement. Publicación de las Naciones Unidas. Nueva York, EE.UU.

- Valdez, P.J., Tocco, V.J. y Savage, P.E. 2014. A general kinetic model for the hydrothermal liquefaction of microalgae. **Bioresource Technol.**; 163: 123–127.
- Valencia, M.J. y Cardona, C.A. 2014. The Colombian biofuel supply chains: the assessment of current and promising scenarios based on environmental goals. **Energy Policy**. 67: 232-242.
- van der Hagen, 2012. The application of bio jet fuels until 2050 scenarios for future developments. Master thesis, Utrecht University. Países Bajos.
- van Putten, R.-J., van der Waal, J.C., de Jong, E., Rasrendra, C.B., Heeres, H.J. y de Vries, J.G. 2013. Hydroxymethylfurfural, a versatile platform chemical made from renewable resources. **Chem. Rev.** 113:1499–1597.
- Velásquez, R.S.G., Kubotani, R.T. y Velásquez, S.M.S.G. 2012. New fuels for aviation: a case study. **Rev Mackenzie de Engenharia e Comput.**; 12 (1): 77–93.
- Von Blottnitz, H. y Curran, M.A., 2007. A review of assessments conducted on bio-ethanol as a transportation fuel from a net energy, greenhouse gas, and environmental life cycle perspective. **J. Clean. Prod.** 15: 607-619.
- Wagner, J.L., Ting, V. P. y Chuck, C. J., 2014. Catalytic cracking of sterol-rich yeast lipid. Fuel, in press.
- Wang, W. y Tao, L. 2014. Bio-jet fuel conversión technologies. Research Center for Energy Technology and Strategy, National Cheng Kung University. Tainan, Taiwan.
- Wei, N., Oh, E.J., Million, G., Cate, J.H.D, y Jin, Y.-S. 2015. Simultaneous utilization of cellobiose, xylose, and acetic acid from lignocellulosic biomass for biofuel production by an engineered yeasts platform. **ACS Synth. Biol.** 4: 707-713.
- Wei, N., Quarterman, J., y Jin, Y.S. 2013. Marine macroalgae: an untapped resource for producing fuels and chemicals. **Trends. Biotechnol.** 31: 70-77.
- Weissermel, K. y Arpe, H. 2008. Industrial organic chemistry. 3rd ed. Editado por John Wiley & Sons. Hoboken, Nueva Jersey, EE.UU.
- Winchester, N., McConnachie, D., Wollersheim, C. y Waitz, I. 2013. Economic and emissions impacts of renewable fuel goals for aviation in the US. **Transp. Res Part A** 2013. 58: 116-128.
- Yaakob, Z., Mohammad, M., Alherbawi, M., Alam, Z. y Sopian, K., 2013. Overview of the production of biodiesel from waste cooking oil. **Renew. Sustain. Energy Rev.** 18: 184-193.

Zeng, G. y Pyle, J.A. 2003. Changes in tropospheric ozone between 2000 and 2100 modeled in a chemistry-climate model. ***Geophys. Res. Lett.*** 30 (7).