



Citación : Barón, M., Huertas, I., Orjuela J.A., (2013). Gestión de la cadena productiva del biodiésel: una revisión de la literatura. En: *Ingeniería*, Vol. 18, Num. 1, págs. 84-117.

Gestión de la cadena de abastecimiento del biodiésel: una revisión de la literatura

Biodiesel supply chain management: A survey paper

Manuel Barón

Universidad Católica
de Colombia
Facultad de Ingeniería
mjbaron@ucatolica.edu.co

Isaac Huertas

Universidad Católica
de Colombia
Facultad de Ingeniería
ihuertas@ucatolica.edu.co

Javier Orjuela

Universidad Distrital
jaorjuela@etb.net.co

Resumen

Los beneficios asociados a los biocombustibles se ven reflejados en un creciente número de países, introduciendo o planeando introducir, políticas para incrementar la proporción de su producción dentro de su matriz energética. Actualmente, sólo pequeñas cantidades de biocombustibles se transan en los mercados internacionales ya que la mayoría se consume domésticamente. Sin embargo, se espera que el comercio de biocombustibles se expanda rápidamente dado que numerosos países no tendrán la capacidad doméstica para abastecer sus mercados internos.

Con base en el tendiente crecimiento del negocio de los biocombustibles, tanto a nivel mundial como local, resulta pertinente contar con herramientas técnicas que apoyen la toma de decisiones en la gestión agroindustrial para aprovechar de mejor manera un mercado por ahora naciente, pero que a mediano y largo plazo se escenifica como un gran sector productivo que podrá generar desarrollo a las regiones productivas. Este trabajo tiene el fin de presentar un estado del arte sobre la cadena de abastecimiento del biodiésel y los modelos matemáticos desarrollados para apoyar la toma de decisiones en la gestión de la cadena de suministro.

Palabras clave: biomasa, biocombustibles, biodiésel, gestión de la cadena de suministro.

Abstract

The benefits of biofuels have been reflected in an increasing number of countries that are introducing (or planning to introduce) policies to increase the proportion of biofuels in their energy mix. Currently, only small quantities of biofuels are traded on international markets because most of these fuels are consumed domestically. However, a rapid ex-

Fecha recibido: mar. 16/2013
Fecha modificado: may. 23/2013
Fecha aceptado: may. 31/2013



pansion of bio-fuel trade is expected since many countries have no domestic capacity to supply their own demand.

Based on the expected-growth trend of the bio-fuels business, both globally and locally, it seems appropriate to have the technical tools to support decision making in agri-business management so as to make better use of a so-far nascent market; yet knowing that in the medium and long term, such a market may become a large manufacturing sector that brings development to its productive regions. This paper attempts to present a comprehensive survey of the bio-diesel supply chain together with mathematical models intended to support decision-making in supply chain management.

Key words: Biomass, Biofuels, Biodiesel, Supply Chain Management (SCM).

1. Introducción

Los combustibles de origen fósil han sido útiles en el desarrollo de la sociedad; en Colombia por ejemplo, han sido históricamente su mayor fuente de energía. Sin embargo, la diversificación de fuentes de energía primarias favorece la seguridad energética al disminuirse la dependencia de una sola fuente. Se hace importante fomentar la diversificación tecnológica para usos de combustibles diferentes a los tradicionales, principalmente la referente a fuentes renovables, tales como: hidroeléctrica, geotérmica, eólica, solar, mareomotriz, biomasa, biogás y cultivos energéticos.

El desarrollo de los sistemas de bioenergía requiere de la acción multidisciplinaria de diversos sectores involucrados en la cadena productiva: productos agrícolas y energéticos. Se requiere pues, plantear lineamientos y estrategias para el desarrollo de la industria del biocombustible biodiesel, lo cual depende de las condiciones locales específicas como son el clima, la disponibilidad de agua y las condiciones del suelo, infraestructura, capacidades de logística y procesamiento industrial de productos, subproductos y residuos orgánicos, necesidades del sector energía y aspectos agronómicos, económicos y sociales implicados en el desarrollo rural sustentable.

En los últimos años, los biocombustibles han comenzado a ser considerados mundialmente como una alternativa seria frente al petróleo [1]. Esto básicamente, obedece a dos razones: se estima que la disponibilidad de las reservas de petróleo llegará pronto a su fin (aproximadamente 100 años) y el precio del crudo, el cual tiende a aumentar.

Ante el panorama anterior, el mercado de los biocombustibles surge como alternativa viable, aunque se encuentra en sus primeros estadios y se localiza principalmente a nivel nacional o regional [2]. La producción, en países en vía de desarrollo (asiáticos y suramericanos) y la refinación concentrada en naciones tecnificadas industrialmente (Norteamérica y Europa del Este). En cuanto a los países de América Latina, estos presentan condiciones ideales para la producción de biocombustibles tales como el alto porcentaje de áreas húmedas (40%) y los recursos hídricos renovables, los bajos costos de producción

en las zonas tropicales o a sus bajos costos salariales [3]. La producción refinación del biodiésel es un área en progreso de la industria de los combustibles, que reclama logros tecnológicos debido a la relevancia y ventajas ambientales [4].

No obstante, un aspecto que todavía es debatido en el mundo, es si el balance energético del biodiésel es positivo entendido como la diferencia entre la energía que produce un kilogramo de combustible (biodiésel en este caso) y la energía necesaria para producirlo, lo cual incluye extracción (cultivo, en este caso), procesamiento, transporte y refinado de la materia prima, entre otros [5].

Este artículo se limita a la cadena productiva del biocombustible biodiesel obtenido a partir de la palma de aceite. Aquí se abordan elementos económicos, ambientales y energéticos pertinentes para avanzar en el desarrollo de una cadena productiva del biocombustible biodiésel. El análisis abarca la cadena productiva del biocombustible desde la producción de palma hasta su utilización como biodiesel, identificando temas que requieren atención por parte de los sectores privado y público.

El artículo se organiza de la siguiente forma. La Sección 2 explica la metodología utilizada para realizar la revisión. La Sección 3 describe el biodiésel como fuente de energía alternativa frente a los combustibles fósiles, sus diferentes formas de producción, sus ventajas y desventajas, su evolución y futuro y, finalmente, su impacto ambiental (uno de los temas más controversiales). La Sección 4 trata la Cadena Productiva del Biodiésel, considerando sus eslabones y estructura, y los indicadores de eficiencia respectivos. Finalmente, la Sección 5, hace una descripción de las herramientas utilizadas para la gestión de la cadena, apoyándose en modelos matemáticos de Programación Matemática, Dinámica de sistemas, Simulación y otros.

2. Metodología

Este documento inicia con la construcción del contexto del biodiesel, para lo cual se recurrió a la recolección, procesamiento y análisis de información secundaria proveniente de: bases de datos científicas (ScienceDirect, SpringerLink, EBSCO-HOST, Scielo y Scopus) y congresos (Congreso Latinoamericano de Dinámica de Sistemas); los Ministerios colombianos de Agricultura y del Medio Ambiente; entes nacionales como Fedebiocombustibles; entes internacionales como USDA (Departamento de Agricultura de Estados Unidos) y NACEPT (Consejo Consultivo Nacional de Políticas Ambientales y Tecnología) y organizaciones multinacionales como IICA (Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura) y Cepal (Comisión Económica para América Latina y el Caribe). El consolidado de número de artículos por fuente se observa en la Figura 1. Finalmente se realizó la revisión, análisis y clasificación de modelos matemáticos de SCM (*Supply Chain Management*) para cadenas productivas de biodiesel y cadenas afines: bioetanol, y otras de biomasa (caña de azúcar, cultivos forestales, entre otros). La fuente de información utilizada fueron las bases de datos científicas enunciadas.

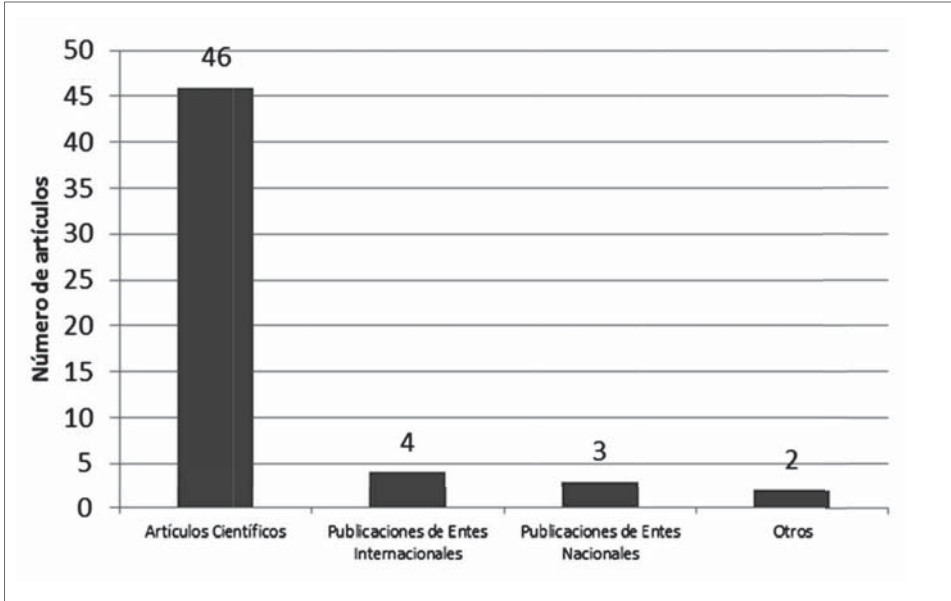


Figura 1. Distribución de información secundaria consultada.
Fuente: Los autores

3. Contexto del biodiésel

3.1. Definición

El biodiésel se ha definido como ésteres monoalquílicos de ácidos grasos de cadena larga, obtenidos a partir de lípidos renovables, tales como aceites vegetales o grasas animales, para su uso en motores por compresión (motores Diesel) [6] [7]. Se trata de un combustible biodegradable, cuyo uso disminuye las emisiones de gases de efecto invernadero y óxidos de azufre y la cantidad de hidrocarburos totales no quemados [5].

El biodiésel es actualmente puesto a la vanguardia como el combustible alternativo viable para los motores de combustión interna, puede ser producido a partir de fuentes renovables, a través de transesterificación, compatible con las infraestructuras tecnológicas existentes [8]. Puede ser usado en cualquier mezcla con el diesel obtenido de petróleo, debido a que tiene características similares, con menores emisiones de gases de escape [9].

Aunque potencialmente se pueden usar múltiples fuentes alternativas para obtenerlo, casi la totalidad del biodiésel que se produce actualmente proviene de los aceites de origen vegetal y, en particular, de tres cultivos: la palma, la soja y la colza (Figura 2). Estos tres cultivos proveen el 76% de la oferta mundial de aceite. El restante 24% se origina en cultivos como maní, algodón, oliva y girasol [5] [10].

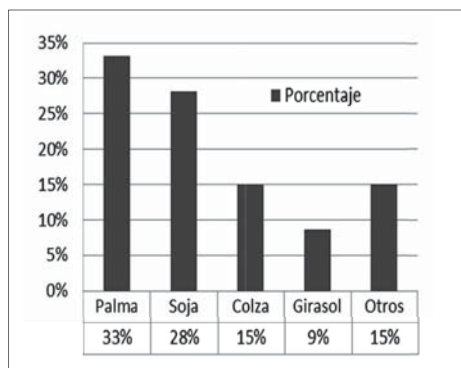


Figura 2. Composición de la oferta de aceite vegetal por fuente
Fuente: Los autores

3.2. Producción del biodiésel

Las principales etapas en la producción de los biocombustibles, dentro de las cuales se encuentra el biodiésel, se presentan en la Tabla I.

Según la Tabla I, el biodiesel puede provenir de plantas oleaginosas como Soja, Palma de aceite, Colza y Jatropha. Los procesos incluyen inicialmente el tratamiento de los cultivos, posteriormente un prensado o extracción del aceite y finalmente transesterificación. También,

MATERIAS PRIMAS			PROCESAMIENTO INDUSTRIAL
CULTIVOS ENERGÉTICOS		CULTIVO	PRE-TRATAMIENTO
PLANTAS OLEAGINOSAS	Soja	Cría (tratamientos genéticos) mejora del contenido en aceites, azúcar y almidón; búsqueda de variedades resistentes a la sequía; tecnología para mejora de los rendimientos	
	Palma aceitera		
	Colza		
	Jatropha		
CULTIVOS AZÚCAR/ALMIDÓN	Caña de azúcar		
	Sorgo dulce		
	Remolacha		
	Mandioca		
BIOMASA LIGNO-CELULÓSICA	Eucalipto	Cría (tratamientos genéticos) reducción del contenido de lignina; selección de las variedades con mayor adaptabilidad	Gasificación
	Sauce		Calentamiento y secado
	Swichgrass		Física: conminación mecánica, explosión a vapor, explosión de fibra de amonio, pirólisis; Química: hidrólisis ácida y alcalina; Biológica: reacción a microbios (hongos blancos, marrones y de pudrición blanda).
	Bermudagrass		
	Miscanthus		
RESIDUOS	Relleno sanitario		
	Desecho animal		

Fuente: A partir de Cepal [11]



el biodiesel se puede obtener de biomasa lignocelulósica pero con un proceso más complejo.

Las materias primas más utilizadas en los procesos productivos para la obtención de biocombustibles se relacionan en la Tabla II. Por su parte, las principales etapas usualmente incorporadas en la *BSC (Biofuels Supply Chain)* son los siguientes (ver Figura 3): producción de materias primas (que se relaciona con la disponibilidad de tierras y la idoneidad, la eficiencia del suelo asociado a diferentes tipos de plantas); la producción de biocombustibles (que se refiere a la transformación de las materias primas en biocombustibles a través de diversos procesos de conversión); mezcla (en el caso de que los biocombustibles se proporcionan a los consumidores finales se mezcla con los combustibles convencionales); el transporte de biocombustibles; y finalmente, el consumo en la red de distribución.

PROCESAMIENTO					PRODUCTO PRIMARIO	PROCESAMIENTO		PRODUCTO FINAL
Prensado o extracción		Aceite vegetal			Transesterificación		Biodiesel	
Molienda e hidrólisis		Azúcar			Fermentación y cofermentación		Purificación	Etanol, butanol
Pirólisis	reacciones gas - sólido	reacciones fase gas	Syngas	Purificación	Síntesis catalítica	Gas natural sintético		
						Diesel Fischer-Tropsch		
						Dimetiléter		
						Metanol		
Digestión anaeróbica		Biogas			Water gas shift reaction		Hidrógeno	
Pirólisis flash		Bio-oil			Tratamiento hídrico y refinado		Biodiesel	
Licuefacción hidrotermal								
Hidrólisis		Azúcar			Fermentación y cofermentación		Purificación	Etanol, butanol
Digestión anaeróbica		Biogas					Biogás	

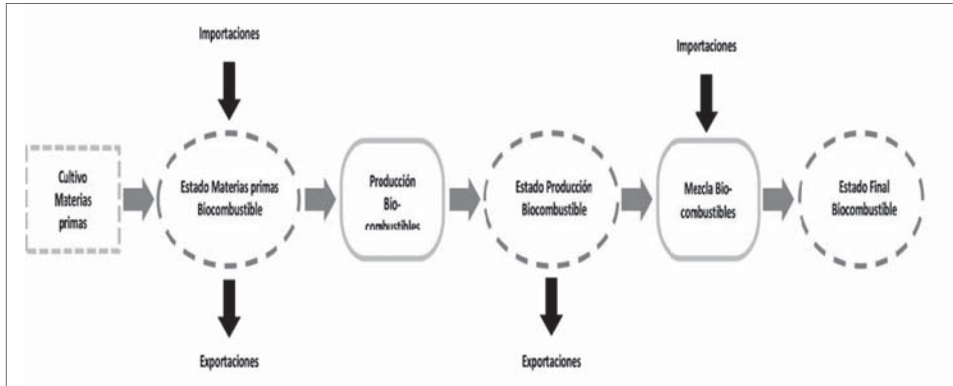


Figura 3. Etapas de la cadena de abastecimiento de los biocombustibles

Fuente: A partir de Papapostolou et al. [13]

Tabla II. Materias primas utilizadas en la producción de Biocombustibles	
Biodiesel	Bioetanol
Palma africana,	Caña de azúcar,
Cocotero, Higuera,	Remolacha azucarera,
Aguacate,	Sorgo dulce, Maíz, Yuca
Jatropha/Piñón,	
Colza/Canola, Maní,	
Soya, Girasol	

Fuente: A partir de Orjuela et al. [12]

otro y de una región a otra: estas diferencias se deben, fundamentalmente, a costos de las materias primas, tipo de energía usado para el procesamiento, tanto calórica como eléctrica, a precios obtenidos para los subproductos derivados durante el proceso de producción [2]. La estructura del costo de producción del biodiesel se presenta en la Figura 4.

Ng et al. [8] sugiere que las estrategias requeridas para una industria de biodiésel estable y sostenida deberán estar basadas principalmente en los principios del libre mercado con un mínimo de “intervenciones artificiales”, por lo que hacen necesarias las políticas pertinentes y los avances tecnológicos apropiados en técnicas de producción y obtención de materias primas para mantener su competitividad económica.

3.3. Ventajas

Según Mittelbach y Remschmidt [14] y Knothe et al. [15], las principales ventajas del biodiésel son su potencial para reducir la dependencia de una determinada economía en el

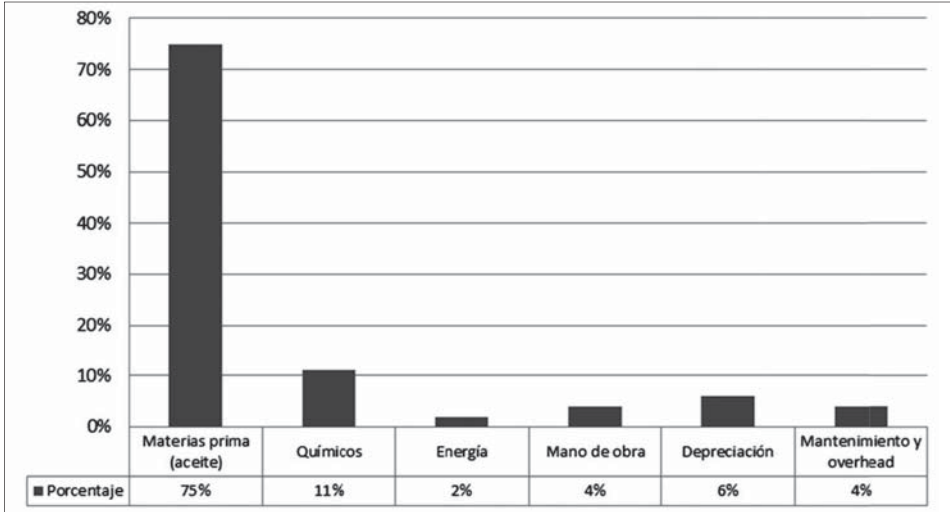


Figura 4. Estructura típica de los costos de producción del biodiésel.

Fuente: Esta investigación, Elaborada a partir de datos reportados en IICA [5]

petróleo, biodegradabilidad, alto punto de inflamación y lubricidad. Por su parte, Knothe et al. [15] proponen otras ventajas del biodiésel tales como: portabilidad, facilidad de obtención, renovación, mayor eficiencia de la combustión, menores contenidos de azufre y compuestos aromáticos.

Para Demirbas [16], la mayor ventaja que el biodiésel tiene sobre el diésel del petróleo es su respeto al medio ambiente. Trae beneficios económicos que incluirían el valor agregado a la materia prima, un mayor número de empleos en la manufactura rural, un aumento de impuestos sobre la renta y la inversión en maquinaria y equipo. El biodiésel puede ofrecer otros beneficios, incluyendo la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, el desarrollo regional y la estructura social, especialmente a los países en desarrollo [17].

Demirbas [9] resalta que el biodiésel tiene mejores propiedades que el combustible diésel de petróleo; es renovable, biodegradable, no tóxico y esencialmente libre de azufre y compuestos aromáticos.

En igual sentido, Yee et al. [18] sostiene que la producción de biodiésel de palma y de colza no trae consecuencias negativas para el medio ambiente, ya que la cantidad de CO_2 emitido a la atmósfera es mucho menor que el CO_2 absorbido por esta. Adicionalmente, argumenta que la combustión de biodiésel de palma es más favorable al medio ambiente que la de los derivados del petróleo, con una reducción significativa del 38% de las emisiones de CO_2 , por cada litro consumido.

Por su parte Fazal et al. [19] en diferentes investigaciones de laboratorio, encontró que: el biodiésel proporciona mejor lubricación que el de combustible fósil diésel; puede

mejorar la combustión y, por lo tanto, tiene un mayor rendimiento térmico que el diésel proveniente del petróleo. La potencia del motor se reduce un poco o nada en absoluto, porque el consumo de biodiésel aumenta lo suficiente para compensar su menor valor de calefacción. No obstante, en general, el biodiésel permite un rendimiento aceptable del motor y podría mejorarse aún más si la viscosidad puede ser reducida.

Por último, Chouinard et al. [20] afirma que el total de gases de efecto invernadero (GEI) de los biocombustibles son reducidos en comparación con los de combustibles fósiles, por absorción de dióxido de carbono por la biomasa durante el crecimiento de las plantas. Por otra parte, mientras que las reservas de combustibles fósiles están disminuyendo y la demanda mundial de energía va en aumento, la biomasa pasa a ser un recurso renovable.

3.4. Desventajas

Según Bala [21], el biodiésel es más caro de producir que el diésel de petróleo, lo que parece ser el factor principal en la no generalización de su uso. La producción actual mundial de aceite vegetal y grasa animal no es suficiente para reemplazar el uso de combustibles líquidos fósiles.

Igualmente, para Ng et al. [8], el biodiésel todavía no es económicamente viable para la adopción a gran escala en el día de hoy, debido principalmente al alto costo de las materias primas convencionales. Estudios de factibilidad realizados han demostrado que el biodiésel no es tan competitivo económicamente como el diésel fósil sin la intervención de los responsables políticos.

Respecto a la producción del biodiesel, Demirbas [9] sostiene que en el proceso se libera glicerina, la cual todavía constituye un problema por su contenido tóxico (aunque éste es moderado) y contaminante. Según IICA [5] el biodiesel aporta un 10% más de óxidos nitrosos a la atmósfera (causantes de la lluvia ácida) con respecto a los combustibles fósiles.

3.5. Evolución y futuro del biodiesel

3.5.1. En el contexto mundial

La producción mundial de biodiésel se mantuvo relativamente estable entre dos y tres millones de toneladas anuales hasta el 2004 (Figura 5). En el 2005 la producción aumenta alcanzando un nivel de 20 mil millones de litros en el 2010 [11] [5].

A pesar de que en la actualidad los biocombustibles representan poco más del 1% de la demanda total de combustible para transporte (y entre el 4% y el 7% para

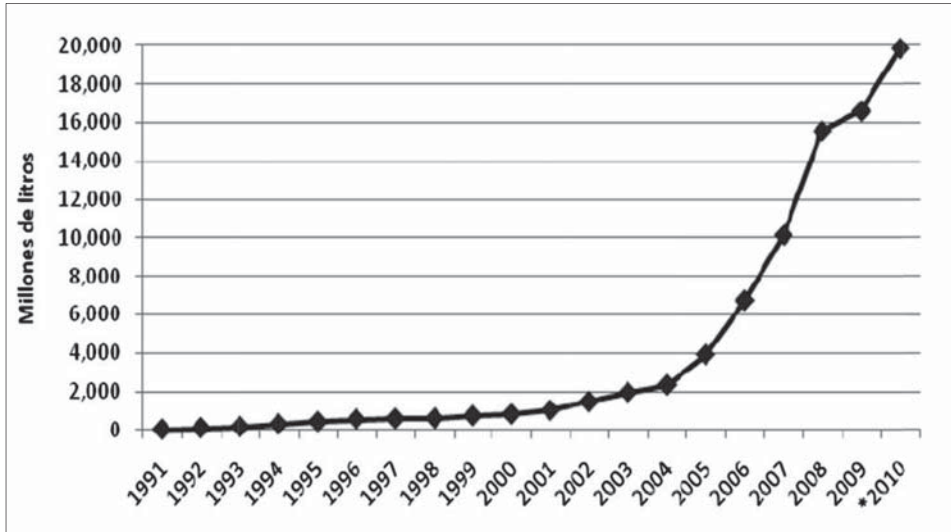


Figura 5. Producción de biodiésel en el mundo desde el año 1991 hasta el 2010.

Fuente: Gráfico obtenido de Cepal [11]

el 2030 según las proyecciones de la Agencia Internacional de Energía, AIE), los biocombustibles parecen una buena oportunidad frente a los elevados precios del crudo internacional [2].

Hoy en día los costos de producción del biodiésel son entre 1, 5 y 3 veces más altos que para el diésel fósil. No obstante, cuando esto se haya atenuado, el biodiésel será un combustible de motor razonablemente disponible en un futuro cercano [9]. Igualmente, debido al incremento de los precios de la gasolina y el diésel fósil en todos los escenarios internacionales, y teniendo en cuenta el resto de exenciones fiscales, los biocombustibles se volverán competitivos en próximos años [22].

El reciente aumento en el uso potencial de biodiésel se debe no sólo al incremento del número de plantas productoras, sino también al tamaño de las instalaciones utilizadas en su producción. El crecimiento en la industria del biodiésel se espera que tenga un impacto significativo en el precio de las materias primas del biodiésel. Este crecimiento en la industria del biodiésel aumentará la competencia [9].

Con la inminente disponibilidad comercial de la futura generación de biodiésel, económicamente cada vez más factible, este combustible debe permanecer como un sustituto del diésel fósil que potencialmente puede satisfacer a mediano plazo las necesidades de energía para formar parte de la solución total a la energía en todo el mundo y los problemas ambientales [8]. Según Bala [21], el biodiésel es más caro de producir que el diésel de petróleo, lo que parece ser el factor principal en la no generalización de su uso. La producción actual mundial de aceite vegetal y grasa animal no es suficiente para reemplazar el uso de combustibles líquidos fósiles.

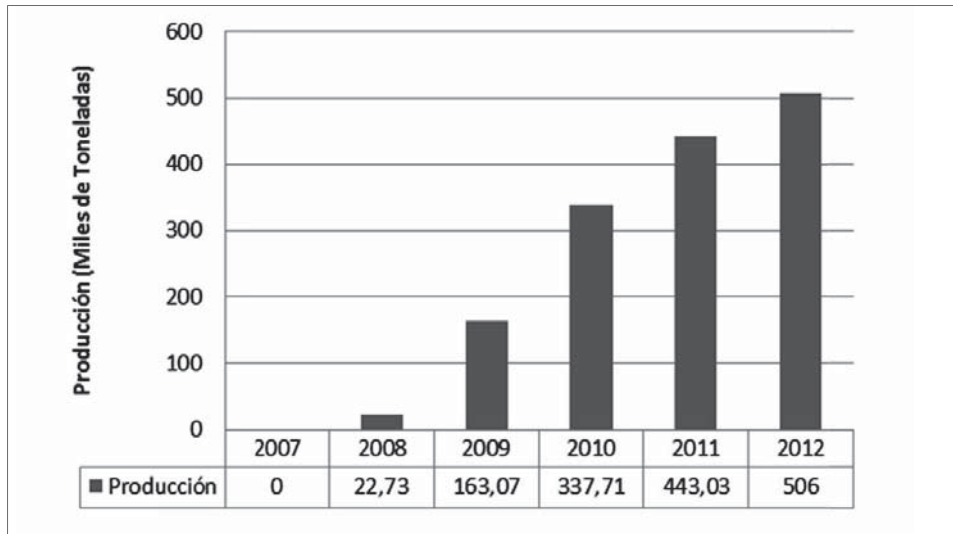


Figura 6. Producción de Biodiesel en Colombia, desde el año 2007 hasta el 2012.

Fuente: Esta investigación. Elaborado a partir de datos reportados en Fedebiocombustibles [23]

3.5.2. En Colombia

La producción de biodiesel en Colombia se presenta en la Figura 6 [23]. Como se observa, la producción de Biodiesel comienza en el año 2008 y su nivel ha aumentado hasta superar las 440.000 toneladas en el año 2011. La producción para el año 2012 se proyecta considerando la producción hasta el mes de Julio donde se alcanza un total de 282.600 toneladas.

En 2011 el biodiesel se constituyó en el principal mercado local para el aceite de palma. Las plantas de refinación de biodiesel y sus capacidades se presentan en la Tabla III [23] [24].

Adicionalmente existen dos plantas de una producción mucho menor: una en Tuma-co (Nariño), con una capacidad de 3.000 litros/día, y otra en Zulía (Norte de Santander) con una capacidad de 20.000 litros/día.

En Colombia se observa una tendencia favorable para los productores de biocombustibles en cuanto a legislación y políticas [25]. Colombia regula mediante la ley 939 de 2004 la producción de biodiesel y bioetanol los cuales deben ser usados en una mezcla con gasolina que irá aumentando a través de los años [3].

También es relevante la clara intención gubernamental por ganar mercado y competitividad en el campo internacional. Sin embargo, se evidencian los conflictos entre las políticas agrícolas y las de biocombustibles [25].

**Tabla III.** Capacidad de producción de Biodiesel en Colombia.

Empresa	Región	Capacidad (toneladas/año)	Capacidad (litros/día)	Fecha entrada en operación
Oleoflores	Codazzi, Cesar	70.000	169.000	Enero 2008
Odin Energy	Santa Marta, Magdalena	36.000	121.000	Junio 2008
Biocombustibles sostenibles del Caribe	Santa Marta, Magdalena	100.000	337.000	Marzo 2009
Bio D	Facatativá, C/marca	100.000	337.000	Febrero 2009
Manuelita	San Carlos de Guaroa, Meta	100.000	337.000	Julio 2009
Clean Energy	Barranquilla, Atlántico	40.000	134.976	Octubre 2009
Ecodiesel	Barrancabermeja, Santander	100.000	337.000	Junio 2010
Biocastilla	Castila la Nueva, Meta	10.000	33.744	Diciembre 2009
Total		556.000	1.806.720	

Fuente: Esta investigación. Elaborada a partir de datos reportados en Fedebiocombustible [23] y MinAgricultura [24]

3.6. Aspecto Ambiental

Los biocombustibles podrían brindar mayores ganancias económicas, desarrollo rural, reducción de la pobreza y menores emisiones de gases con efecto invernadero respecto de los combustibles fósiles. La producción de cultivos energéticos podría llevar a una expansión de la frontera agrícola, deforestación, monocultivos, contaminación del agua, difusión de organismos genéticamente modificados, problemas sobre la seguridad alimentaria y un empeoramiento de las condiciones laborales, son entre otras las preocupaciones de su crecimiento [1].

Contrario a algunos reportes que cuestionan la sostenibilidad del aceite obtenido de palma africana como fuente ecológica de energía, los resultados de este estudio del Análisis del Ciclo de Vida, ACV, han demostrado que el diésel de palma tiene el potencial para convertirse en la principal energía renovable en el futuro, con una relación de energía positiva y una reducción significativa de las emisiones de CO₂. Una investigación encontró que la utilización de biodiésel de palma podría generar una tasa de rendimiento de energía de 3.53 (la producción de energía / energía de entrada), lo que indica una energía positiva neta [18].

Sin embargo, Dufey [1] sostiene que los beneficios y costos de los biocombustibles varían ampliamente, de acuerdo al tipo de cultivo energético, método de cultivo, tecnología de conversión y las condiciones naturales de cada país o subregión. El uso de biodiésel debe permitir un equilibrio que debe buscarse entre la agricultura, el desarrollo económico y el medio ambiente [16].

Conviene resaltar que las políticas relativas a la producción de biocombustibles requieren ser analizadas en Colombia, así como en otros países de América del Sur, debido

a que la población de este continente presenta altos niveles de hambre y la utilización de suelo para los dos propósitos pondría en riesgo la seguridad alimentaria [3].

4. Cadena productiva del biodiesel

Gualteros [26] a partir de la información recopilada de la cadena productiva del biodiésel en diferentes países y del estado actual de la cadena en Colombia, propone un esquema de la cadena productiva del biodiésel a partir de palma africana, en el cual se incluyen no solo los eslabones de producción de biodiésel sino el entorno institucional y organizacional de la cadena, con el fin de tener una visión global del proceso y poder, además, identificar los posibles actores de la cadena que puedan participar en el estudio de la misma.

La Figura 7 describe la estructura detallada de la cadena. En ella se destacan los diferentes eslabones pertenecientes al proceso productivo, a la comercialización del biodiésel y a sus interacciones. Como se puede apreciar, la cadena productiva se divide en tres grandes sectores: el Agrícola, el Industrial y el de Servicios; y cada uno de ellos se subdivide en otros eslabones los cuales conforman la totalidad de la cadena.

Según Gualteros [26], en Colombia las materias primas de biomasa son transportadas generalmente en camiones desde las fincas a la planta de refinación de biocombustibles. Las instalaciones de almacenamiento son necesarias entre las fincas y las biorrefinerías. El almacenamiento de pre-tratamiento también se proporciona para garantizar la frescura de las materias primas y aumentar la tasa de rendimiento. En la mayoría de los casos, la materia prima o las materias primas son transportadas desde las fincas directamente a la refinería. Las materias primas de biomasa se convierten en productos terminados. Una breve descripción del funcionamiento de los elementos o subsistemas de la cadena de suministro de biocombustibles se presenta en la Tabla IV [27].

Según IICA [5], se reconocen cuatro grandes sectores interrelacionados en la cadena productiva de biodiésel: 1) Un sector productor del aceite, materia prima fundamen-



Figura 7. Esquema general de la cadena productiva.

Fuente: A partir de [26]



Tabla IV. Principales sistemas en la cadena de abastecimiento de los Biocombustibles	
Sistema de la cadena de abastecimiento	Descripción de las actividades
Producción de mate-rias primas	De biomasa herbácea y de madera disponible regionalmente, incluidos los residuos agrícolas y forestales, cultivos energé-ticos y materiales de desecho.
Logística de materias primas	Implementar la infraestructura para biomasa, equipos, mano de obra, y los sistemas para llevar a cabo la cosecha, recolección, almace-namiento, pre-procesamiento, y las operaciones de transporte.
Producción de Bio-combustibles	Implementar de forma rentable las instalaciones de conversión de la biomasa a biocombustibles, cumpliendo con todos los reglamentos de seguridad y medio ambiente para producir biocombustibles que cumplan con los estándares de calidad.
Distribución de los biocombustibles	Implementar la infraestructura de distribución de biocombus-tibles para llevar a cabo el almacenamiento, mezcla, transporte, y las opera-ciones de dispensación.
Uso final de los biocombustibles	Facilitar la disposición al público de los biocombustibles con un rendi-miento similar al diesel derivado del petróleo.

Fuente: A partir de NACEPT [27]

tal para la obtención del biodiésel, el cual comprende dos subcomponentes: un sub-sector de producción de las fuentes, vegetales y animales, de aceite, y otro subsector que transforma la fuente en aceite. 2) Un sector de producción de biodiésel, en el cual se procesa el aceite para la producción de biodiésel. 3) Un sector de mercado de biodiésel, donde se documenta el consumo aparente de biodiésel a nivel nacional, definido como consumo + (importaciones -exportaciones). Y 4) El marco legal y regulatorio, fundamental para el funcionamiento de la industria de producción y consumo sostenible de biodiésel.

Awudu y Zhang [28] proponen, como se observa en la Figura 8, el marco general de la cadena de suministro de biocombustibles. Los principales elementos de la cadena de suministro de biocombustibles que se consideraron son los siguientes: (1) granjas o fincas, (2) instalaciones de almacenamiento, (3) plantas de biorrefinería, (4) instalaciones de mezcla, (5) puntos de venta y el transporte (estación).

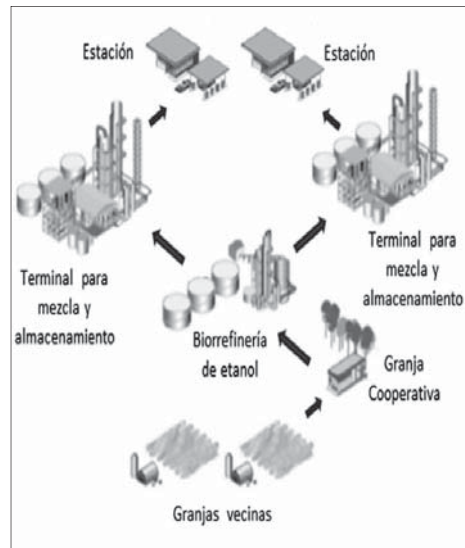


Figura 8. Cadena de suministro de biocombustibles según Awudu y Zhang.
Fuente: A partir de [28]

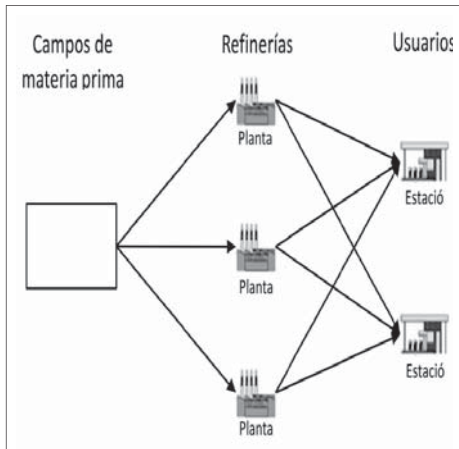


Figura 9. Cadena productiva de biocombustibles según Huang [29].

Fuente: A partir de Huang [29]

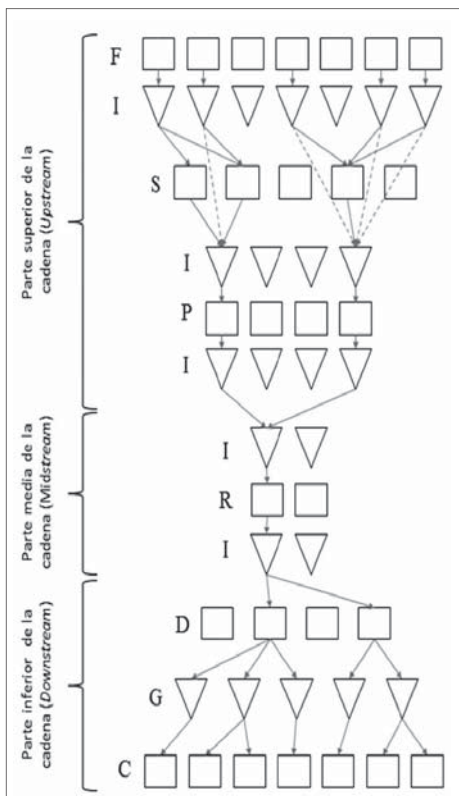


Figura 10. Estructura general de la cadena de biocombustible según An et al.

Fuente: A partir de [30]

De una manera más simplificada, Huang et al. [29] representa la cadena productiva de biocombustibles como una típica cadena de suministro. Por lo tanto, el problema de diseño de sistemas de biocombustibles lo considera dentro de la categoría general de los problemas de localización de la cadena de suministro (Figura 9).

Para An et al. [30], la estructura de flujo de red basada en materias primas de biomasa agrícola se muestra en la Figura 10. Esta red multinivel muestra las potenciales ubicaciones y capacidades de las fincas (F) y sitios de almacenamiento de la biomasa (S); pre-instalaciones de procesamiento (P), biorrefinerías (R), centros de distribución (D); y estaciones de servicio (G), que abastecen a los clientes (C). Los posibles lugares para los inventarios se denotan por I (Ss, Ds y Gs son los inventarios por naturaleza).

5. Herramientas matemáticas utilizadas para la Gestión de la cadena productiva del biodiesel

5.1 Clasificación

An et al. [30] en su artículo de revisión sobre modelos aplicados a la cadena productiva de biocombustibles y combustibles fósiles, concluyen que los estudios sobre biodiésel se relacionan principalmente con los procesos en los niveles superiores de la cadena, o los procesos “upstream”, (es decir, de los proveedores de biomasa a las plantas de conversión) especialmente a niveles de decisión operacional o integrados



Tabla V. Resumen artículos de SCM de biocombustibles				
N°	Autor	Año	País	Herramienta
1	Chien y Yueyue	2011	USA	MISP
2	Kim et.al.	2011	USA y Corea	MILP Dinámica de sistemas
3	Orjuela et. al.	2011a	Colombia	Análisis multivariado Redes neuronales
4	Orjuela et. al.	2011b	Colombia	Dinámica de Sistemas
5	Papapostolou et. al.	2011	Grecia	MILP
6	Zhang et.al.	2011	China y Portugal	MILP
7	Zhu et. al.	2011	USA	MILP
8	Eksioglu y Petrolia	2010	USA	MILP
9	Flórez	2010	Colombia	Dinámica de sistemas
10	Huang et. al.	2010	USA	MILP
11	Zapata et. al.	2010	Colombia	Dinámica de sistemas
12	Eksioglu et. al.	2009	USA	MILP
13	Constantino, et. al	2008	Portugal	Programación entera
14	Lejars et. al.	2008	Francia	Paquete de simulación MAGI
15	Ravula et.al.	2008	USA	Simulación discreta
16	Dunnett et. al.	2007	Inglaterra	MILP
17	Kumar y Sokhansanj	2007	USA y Canadá	Modelo IBSAL
18	Sokhansanj et. al.	2006	USA y Canadá	Modelo IBSAL
19	Martins et. al.	2005	Portugal	MILP, column generation
20	Troncoso y Garrido	2005	Chile	MILP
21	Gunnarsson et. al.	2004	Suecia	MILP
22	Higgins y Postma	2004	Australia	MILP
23	Gigler et. al.	2002	Holanda	Programación dinámica (DP)
24	De Mol et. al.	1997	Holanda	Simulación (Prosim) Programación entera mixta (MIP)
25	Cundiff	1996	USA	Programación lineal
26	Gallis	1996	Grecia	Simulación

MISP: programación estocástica entera mixta.

MILP: Programación lineal entera mixta.

IBSAL: Logística y análisis de la Cadena de Biomasa Integrada (Integrated Biomass Supply Analysis and Logistics)

Fuente: Los autores

(de estratégico a operacional). La razón es que inicialmente las investigaciones se han enfocado en evaluar varios tipos de materias primas y probar la eficiencia de la logística del mismo.

En la revisión de la literatura no se encontraron estudios que optimicen las operaciones de conversión, en los niveles medios de la cadena o “*midstream*”, porque muchas

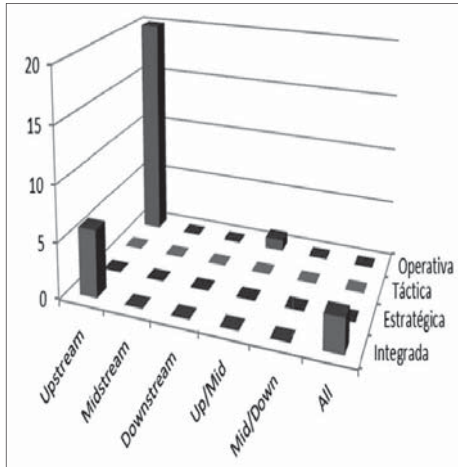


Figura 11. Categorización de los artículos relacionados a SCM de biocombustibles.

Fuente: A partir de [30]

características semejantes a las de la cadena del biodiesel (bioetanol y biomasa en general), hasta abril de 2012. Los artículos, país y herramienta matemática utilizada se recopilan en la Tabla V.

En la medida de los años recientes se ha notado un incremento en el número de artículos escritos con modelos matemáticos para SCM de biocombustibles y afines (Biomasa, Bioetanol, entre otras), tal como se presenta en la Tabla VI. En ella se observa que el país con mayor cantidad de estudios es USA, con un total de 10 artículos (38% del total de artículos revisados), mientras que la mayoría de los artículos restantes son de países de Europa (38%). El porcentaje restante (24%) se distribuye entre el Pacífico Sur y Suramérica. Algunos estudios fueron realizados colaborativamente entre dos países: USA - Canadá, USA – Corea del sur y Portugal – China. (En este caso se han asignado al país con más artículos). En los dos últimos casos, se observa una participación de países asiáticos como China y Corea del sur.

Dentro de los artículos revisados, nueve van destinados a cadenas de Biomasa Ligno-celulósica y ocho a biomasa de residuos. Estas biomásas pueden ser utilizadas para la obtención de biodiesel, bioetanol, generación de calor u otros usos. Cinco artículos estudian la biomasa procedente de cultivos de azúcar y almidón, para la producción de bioetanol y alimento. Finalmente, cuatro artículos se refieren a biomasa de plantas oleaginosas para la producción de biodiesel y alimento. En la Figura 12 se representa el porcentaje correspondiente a las cadenas tratadas en los artículos.

En la Tabla VII se observa que la herramienta más utilizada para la formulación de modelos matemáticos es la programación matemática, y dentro de esta, la más utilizada es

tecnologías están todavía siendo desarrolladas y evaluadas. Adicionalmente, los autores afirman que varios estudios se han basado en un modelo de programación lineal entera mixta (MILP por sus siglas en inglés) de producción / distribución.

Una clasificación de los 30 artículos revisados por An et al. [30] se muestra en la Figura 11. En la figura se clasifican los modelos matemáticos según el nivel de la cadena productiva (*upstream*, *midstream* y *downstream*) y nivel de decisión (estratégico, táctico, operativo e integral).

En el presente estudio se revisaron 26 artículos sobre modelos matemáticos para apoyar la toma de decisiones en cadenas de biodiesel, y cadenas productivas con ca-



Países	1996-1999	2000-2003	2004-2007	2008-2011	Total
Australia			1		1
Colombia				4	4
Chile			1		1
Francia				1	1
Grecia	1			1	2
Holanda	1	1			2
Inglaterra			1		1
Portugal			1	2	3
Suecia			1		1
USA	1		2	7	10

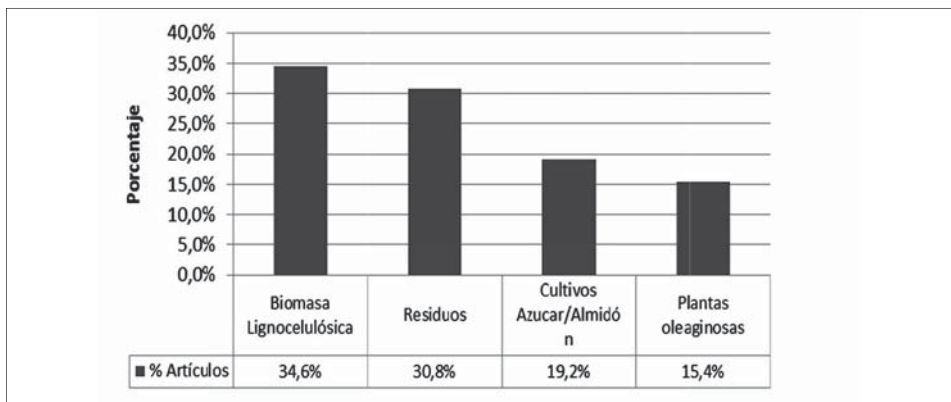


Figura 12. Distribución de los artículos de Supply Chain Management por cadena.

Fuente: Los autores

Objetivo	Herramienta							Total
	DP	IBSAL	LP	MILP	MISP	Simulación	DS	
Diseño		2		1				3
Diseño y gestión				7	1	1		9
Gestión			1	2				3
Programación cosechas				3		1		4
Otros	1					2	4	6
Total	1	2	1	13	1	4	4	

DP: Programación Dinámica

IBSAL: Logística y análisis de la Cadena de Biomasa Integrada (Integrated Biomass Supply Analysis and Logistics)

LP: Programación lineal

MILP: Programación lineal entera mixta

MISP: Programación estocástica entera mixta

DS: Dinámica de Sistemas

Fuente: Los autores

la programación lineal entera mixta (MILP) (con un 50% de los artículos revisados). En segunda instancia, la herramienta más utilizada es la simulación y dinámica de sistemas (31%), teniendo en cuenta que se han desarrollado en diferentes aplicaciones computacionales.

El diseño y gestión de la cadena es el objetivo utilizado con mayor frecuencia en los modelos de SCM evaluados (35% del total de artículos revisados). En segunda instancia se encuentran modelos con objetivos varios (Otros) los cuales corresponden a análisis y cuantificación de variables en las cadenas productivas, evaluadas principalmente por las herramientas simulación y dinámica de sistemas.

Los objetivos de los modelos matemáticos encontrados se presentan detalladamente en la Tabla VIII. Se observa que la mayoría de los modelos se dirigen a optimizar los costos o ganancia de la cadena, independientemente si el modelo busca el diseño, gestión o programación de la cadena.

Tabla VIII. Objetivos y características de los modelos desarrollados en los artículos de SCM		
Autor	Año	Objetivo
Chien y Yueyue	2012	Diseño y gestión de la cadena del bioetanol Minimización los costos de la cadena
Kim et.al.	2011	Diseño y gestión de la cadena de biocombustibles Maximización ganancia total de la cadena
Orjuela et. al.	2011a	Pronostico del comportamiento de la producción de bioetanol Identificación de factores y variables relevantes en el sistema
Orjuela et. al.	2011b	Identificación y análisis de factores y variables relevantes en lo que respecta a la problemática de la dicotomía en el uso del suelo.
Papapostolou et. al.	2011	Diseño y gestión de la cadena de biocombustibles Maximización el rendimiento total de la cadena
Zhang et.al.	2011	Gestión de la cadena forestal Maximización el beneficio económico de los boques Minimización el impacto negativo en el hábitat forestal
Zhu et. al.	2011	Gestión de la cadena de biomasa Maximización ganancia
Eksioglu y Petrolia	2010	Diseño y gestión de la cadena de biocombustibles Minimización del costo de la cadena
Flórez et. al.	2010	Análisis de políticas actuales de producción de biocombustibles y de cambios posibles para alcanzar la producción deseada.



Huang et. al.	2010	Gestión de la cadena de suministro en un horizonte de planeación Minimización el costo de la cadena
Zapata et. al.	2010	Búsqueda de políticas que contribuyan al aumento de la oferta de biodiesel proveniente de palma de aceite.
Eksioglu et. al.	2009	Diseño de la cadena de suministro y gestión de una biorrefinería Minimización el costo de la cadena
Constantino, et. al	2008	Secuenciación de la cosecha
Lejars et. al.	2008	Programación de cosechas de la caña de azúcar Maximización ganancia
Ravula et.al.	2008	Disminución el tiempo de transporte del sistema
Dunnett et. al.	2007	Diseño de la cadena de Biomasa Minimización el costo total de la cadena
Kumar y Sokhansanj	2007	Diseño de la cadena de Biomasa Asegurar una producción neta de energía con una huella de carbono aceptable
Sokhansanj et. al.	2006	Diseño de un modelo operacional para el abastecimiento y transporte de la biomasa que cuantifique los recursos necesarios y el costo de operación
Martins et. al.	2005	Programación de cosechas Maximización el volumen de madera cortada
Troncoso y Garrido	2005	Diseño y gestión de la cadena Minimización el valor presente del costo de la cadena
Gunnarsson et. al.	2004	Gestión de la cadena Minimización costo total
Higgins y Postma	2004	Secuenciación de las cosechas Maximización rentabilidad
Gigler et. al.	2002	Ruteo y asignación de actividades Minimización el costo total de la cadena
De Mol et. al.	1997	Diseño de la cadena Minimización coto de la cadena Evaluación de costos y consumo de energía
Cundiff	1996	Gestión de la cadena de suministro Minimización los costos de la cadena
Gallis	1996	Evaluación de los efectos de variables logísticas sobre el costo

Fuente: Los autores

Las características y variables de decisión de cada uno de los modelos evaluados se relacionan en la Tabla IX. Se encuentra que la mayoría de modelos incluyen variables relacionadas con el flujo de mercancía (materias primas, productos intermedios y productos terminados) a través de la red, y variables relacionadas con la ubicación y tamaño (capacidad) de las instalaciones.

Tabla IX. Características y variables de los modelos matemáticos			
Autor	Año	Características	Variables
Chien y Yueyue	2012	El modelo busca definir: tamaño y lugares de las biorrefinerías y las terminales, estrategia de asignación de recursos como materia prima, plan de producción de etanol, y plan de transporte de la materia prima y del combustible.	Localización de las biorrefinerías Localización de las terminales Capacidad (galones) de las biorrefinerías Galones de etanol producidos en las biorrefinerías Toneladas de Materias primas enviadas de las fuentes a las biorrefinerías Galones transportados de las biorrefinerías a las terminales Galones transportados de las terminales a las ciudades Déficit de galones en las ciudades
Kim et.al.	2011	El modelo se aplica para diseñar un sistema de refinamiento distribuido y uno más centralizado. El estudio evalúa los beneficios totales, valores, costo, y los diseños de la red de suministro de ambos sistemas.	Número óptimo, localización y tamaño de varios tipos de plantas de procesamiento La cantidad de biomasa, productos intermedios y producto final a ser transportado entre las locaciones en cada periodo de tiempo
Orjuela et. al.	2011 ^a	El modelo busca la predicción del comportamiento futuro de la producción de caña panelera. La dinámica de la cadena productiva frente a la problemática es estudiada a partir de la identificación de factores y variables relevantes y su diagrama causal.	Producción Rendimiento Participación de la caña panelera en la valoración de la producción Participación del número de personas en el sector Variación y superficie cosechada
Orjuela et. al.	2011b	Con el modelo se analiza la problemática de la producción de bioetanol a partir de la caña panelera y la repercusión que tiene en la seguridad alimentaria de la población colombiana.	Sector Población Empleo Parque Automotor Combustible Panela y Siembra
Papapostolou et. al.	2011	Facilita y apoya la toma de decisiones en la planificación de diversas cuestiones operacionales, tales como las inversiones en infraestructura, las cantidades de materias primas que se cultivan, las cantidades de biocombustibles que se producen en el mercado nacional o importados, identificando la mejor	Cantidad de producción de cada cultivador en cada escenario de clima Cantidad transportada de cada cultivador a la planta central, en cada momento de tiempo, proveniente de cada tipo de bodega, en cada escenario de clima Capacidad de cada tipo de almacenaje, en cada periodo de tiempo, de cada cultivador, en cada escenario de clima



Papapostolou et. al.	2011	importados, identificando la mejor solución disponible para el diseño óptimo y el funcionamiento de la cadena de suministro de biocombustibles	Exceso de capacidad de almacenaje a la intemperie, en cada periodo de tiempo, de cada cultivador, en cada escenario de clima. Déficit en la biomasa enviada a la planta central en cada periodo, en cada escenario de clima.
Zhang et.al.	2011	El modelo considera la maximización del valor presente neto de los bosques, sujeto a restricciones de área de explotación total en cada período, y en la sostenibilidad de los flujos de madera aserrada.	Selección (si o no) de los sitios de recolección, planta de energía, sitios de pretratamiento Cantidad de flujo en la red
Zhu et. al.	2011	Sistema logístico de biomasa para la producción de biocombustible. Abarca desde la siembra y la cosecha hasta la entrega a la biorrefinería, incluyendo el manejo de residuos, centrándose en la integración de las decisiones estratégicas en el diseño de la cadena de suministro y las decisiones tácticas sobre el programa de operación anual	Cantidad de biomasa cosechada en cada periodo Cantidad de biomasa procesada en cada periodo en cada refinera Cantidad de biocombustible producido en cada periodo en cada refinera Niveles de inventario de biomasa y residuos en cada periodo Flujo de Biomasa y residuos en la cadena
Eksioglu y Petrolia	2010	Análisis del impacto de una instalación intermodal en las decisiones de localización y transporte para las plantas de producción de biocombustible, en este caso Etanol proveniente de maíz.	Localización y capacidad de las biorrefinerías Localización y capacidad de los sitios de recolección Cantidad de biomasa cosechada en cada sitio, en cada período de tiempo Cantidad de biomasa y combustible almacenado en cada facilidad, en cada periodo de tiempo Cantidad de flujo en la red, en cada periodo de tiempo Modo de transporte utilizado Cantidad de biocombustible producido en cada biorrefinería en cada unidad de tiempo
Flórez et. al.	2010	El modelo permite el análisis de la cadena productiva de biocombustibles, teniendo en cuenta el cultivo de las materias primas y la refinación de los biocombustibles.	Capacidades Rentabilidad Inversión Demandas Incentivos Precios
Huang et. al.	2010	El modelo matemático desarrolla la planeación estratégica, en un horizonte de tiempo, para la producción de biocombustibles a partir de diferentes biorresiduos.	Cantidad de flujo en la red en cada periodo Capacidad asignada a las biorrefinerías Asignación de biorrefinerías en cada periodo
Zapata et. al.	2010	El modelo estudia el comportamiento del aceite de palma y se propone diferentes políticas que ayuden a que se produzca un incremento en la oferta de biodiesel sin afectar lo que se dedica para el consumo humano.	Hectáreas sembradas de palma Hectáreas disponibles de palma Precios Costos Incentivos del gobierno Demandas Demandas no atendidas Inversiones Importaciones y exportaciones de palma

Eksioglu et. al.	2009	Determina el número, tamaño y ubicación de los bio-refinerías necesarias. Determina la cantidad de biomasa enviada, procesada e inventariada cada período de tiempo (Multi periodo)	Número de biorrefinerías Ubicación de las biorrefinerías Capacidad de las biorrefinerías Flujo de la biomasa en la red Niveles de inventario
Constantino, et. al	2008	Solución del modelo con Branch and bound (bifurcación y acotamiento) Restricciones de área máxima	Flujo en la agrocadena Asignación de actividades a los actores de la cadena
Lejars et. al.	2008	Planificación de la cosecha de caña de azúcar para mejorar la productividad y la ganancia	Cierre y reubicación de zonas de entrega Políticas de manejo del flujo de la caña en la cadena Técnicas utilizadas de cosecha y procesamiento
Ravula et.al.	2008	Secuenciación de las operaciones de transporte usando un número limitado de equipos especializados para la cosecha de la biomasa (algodón)	Asignación de Cosecha de cada región, por cada vía, en cada día de cosecha
Dunnett et. al.	2007	Determinar la selección de las facilidades logísticas, la capacidad y la asignación de tareas a las facilidades.	Utilización (o no) de cada facilidad logística en cada fase (momento) Asignación de tareas a cada facilidad logística Capacidad de cada refinería asignada en cada momento de tiempo Producción de cada refinería en cada momento de tiempo
Kumar y Sokhansanj	2007	Costos, energía de entrada y emisiones de carbono	Localización de cada tipo de planta Capacidad de cada tipo de planta Tasa de flujo de materia prima, producto intermedio y producto final en la red Cantidad de producto intermedio consumido en cada planta
Sokhansanj et. al.	2006	Simular la recolección, almacenamiento y operaciones de transporte para el abastecimiento de biomasa agrícola a la biorrefinería	Estado (húmedo o seca) y forma de recolección de la materia prima. Estado (húmedo o seca) y forma en que se transporta de la materia prima.
Martins et. al.	2005	Modelo de programación entera para un problema de cosecha forestal no-temporal con restricciones en el tamaño de la tala rasa y en el área total de parcelas de edad madura con un tamaño mínimo requerido.	Estructura de la zona de suministro del ingenio Duración de las temporadas de procesamiento Capacidad de la cadena por unidad de tiempo Reglas de asignación de despachos
Troncoso y Garrido	2005	Localización y tamaños óptimos de las facilidades logísticas forestales. Adicionalmente los niveles de producción y flujos a generar en un horizonte de planeación.	Posibilidad de cosecha de cada sección de cada tipo de bosque



Gunnarsson et. al.	2004	Cuándo y dónde los residuos forestales deben ser convertidos en combustible y cómo deben ser transportados y almacenados	Volumen de flujo en la red de cada presentación del producto Lugar de procesamiento de los productos
Higgins y Postma	2004	Incrementar la utilización de la infraestructura de transporte a través de la mejora en la secuenciación de las cosechas en la ferrovía y la carretera, suministrando la posibilidad de reducir los costos de transporte y cosecha.	Momento en que los módulos (dispositivos de proceso primario) son recogidos del campo de cultivo a la planta de proceso Días de programación del camión que recoge los módulos
Gigler et. al.	2002	Incluye dos características de los productos: Presentación (influenciada por la manipulación) y Calidad (influenciada por procesamiento, transporte y almacenamiento)	Asignación de recursos (mano de obra, equipo y estructura) Cantidad de biomasa producida y transportada
De Mol et. al.	1997	Desarrollo de dos modelos para obtener información sobre los costos y el consumo energético de la logística: uno de simulación y uno de optimización. La cadena estudiada incluye facilidades como: cultivos, recolección, transbordo, pre-tratamiento y plantas de energía.	Cantidad de hectáreas que se cortan por período en cada uno de las áreas de cultivo disponibles. Flujo en la red por periodo Ubicación de las instalaciones capacidad de las instalaciones Número de camiones utilizados por periodo Capacidad de expansión adicional en cada periodo
Cundiff	1996	Considera los problemas de almacenamiento, programación de cosechas y transporte	Flujo de biomasa en la cadena en cada momento de tiempo Capacidad de cada tipo de almacenamiento (almacén cubierto y a la intemperie) Cantidad de exceso y faltante de biomasa
Gallis	1996	Varios escenarios observados se utilizaron para definir el efecto del tiempo de inventario, la tasa de interés, y la pérdida de valor debido al deterioro de la fibra y los sistemas operativos sobre el costo por unidad y el costo total	Tiempo de inventario Tasa de interés Estado de la fibra Costo unitario y total

5.2 Cronología de los modelos matemáticos para la gestión de la cadena productiva del biodiésel

A partir de la revisión de la literatura sobre modelos matemáticos para la gestión de la cadena de biodiésel y cadenas afines que este documento ha considerado, se presenta una taxonomía de los mismos, basándose en la clasificación dada por CEPAL [11]. En la Figura 13, las líneas punteadas representan estudios aplicados a una cadena productiva específica, por lo que va referida a un número, que corresponde al número del artículo (ver Tabla V). Las líneas continuas representan la clasificación genérica de los tipos de biomasa y sus usos.

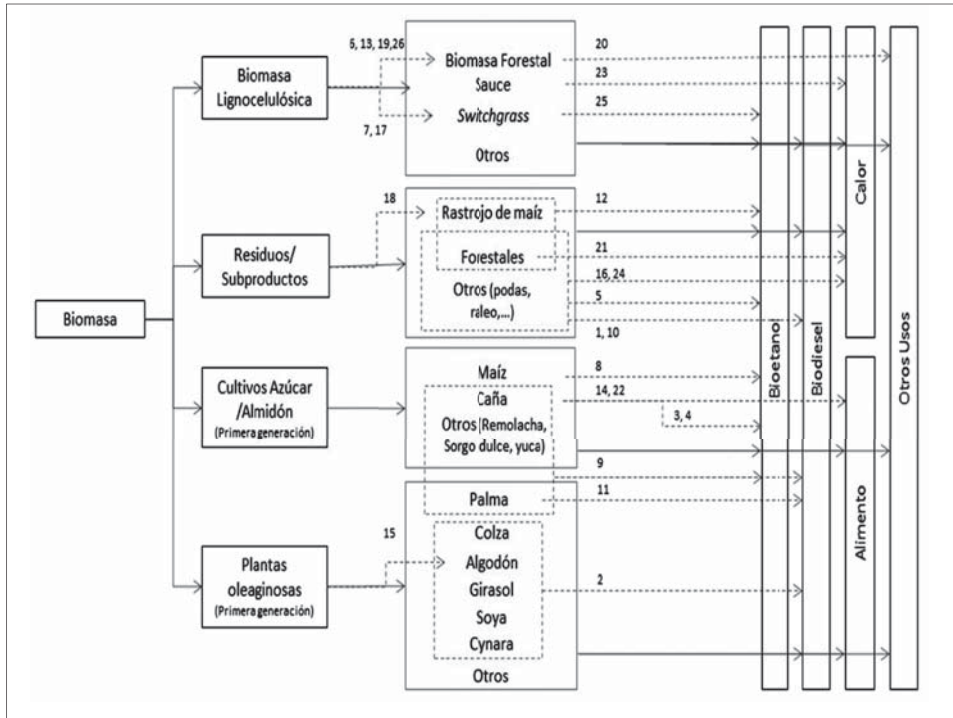


Figura 13. DTaxonomía de los modelos revisados.
Fuente: Los autores

En la Tabla X, se presentan los autores, las herramientas y el tipo de biomasa trabajada en los modelos estudiados en el presente estudio.

5.2.1. Biomasa Lignocelulósica

En este grupo se muestran nueve artículos, de los cuales cinco tratan de biomasa forestal, entendiéndose ésta como biomasa de bosque. Los otros artículos, se refieren a cadenas de Sauce y *Switchgrass* (conocido también como pasto varilla). A su vez, la mayoría de estos modelos se enfocan en la cadena productiva de la biomasa, sin especificar el uso final; sólo tres se dirigen a usos concretos, como obtención de bioetanol, generación de calor y la industria de la madera (clasificados como otros usos).

- Biomasa Forestal

En 1996 Gallis [31], en Grecia, realizó un modelo de simulación de la cadena de biomasa forestal de Grecia, que constituye uno de los recursos renovables existentes de las materias primas no sólo para la generación de energía, sino también para la industria de transformación de la madera. El objetivo fue evaluar los efectos de variables logísticas sobre el costo de la cadena mediante la observación de varios escenarios.



En 2005, Troncoso y Garrido [32], en Chile, proponen un modelo MILP de producción y logística de la industria forestal, donde se consideran variables de decisión sobre: el flujo de la cadena; el diseño de la cadena, como tamaño y ubicación de las facilidades logísticas; y de producción, como el momento de cosecha de cada sección (parcela) de cada tipo de terreno.

De manera independiente, en 2005 en Portugal, Martins et al. [33], proponen un modelo MILP para la programación de cosechas, con el fin de maximización del volumen de madera cortada. A diferencia de los anteriores estudios realizados, este modelo se centra en la parte operativa de la cadena productiva de la madera. Para resolver el mismo problema de programación de cosechas de madera, en 2008, Constantino et al. [34] presentaron un nuevo modelo que comprende un número polinomial de variables y restricciones, utilizando la técnica “bifurcación y acotamiento” para solucionarlo. Como último estudio realizado en cadenas forestales se encuentra el de Zhang et al. [35] en 2011 en el cual presenta un modelo MILP para el diseño y gestión de la cadena maximizando su Valor Presente Neto, disminuyendo el impacto causado al hábitat forestal y asegurando la sostenibilidad de los flujos de madera.

- Otra biomasa lignocelulósica

Cundiff [36], en 1996, plantea su modelo de programación lineal para la minimización del costo de la cadena de biomasa herbácea, aplicándolo en la cadena de *switchgrass*, considerando los costos de transporte, almacenamiento, y los costos de incertidumbre (faltante y exceso) de la producción causada por la variación del clima.

En 2007, Kumar y Sokhansanj [37] describen un modelo IBASAL (*Integrated Biomass Supply Analysis and Logistics*) para cuantificar variables ecológicas como energía utilizada y huella de carbono en la cadena de biomasa de *switchgrass*.

Zhu et al. [38], en 2011, proponen un modelo matemático para la gestión de la cadena de biomasa a la biorrefinería, para la producción de biocombustible, en el cual se integran decisiones estratégicas para la planeación (a un año) y decisiones tácticas de programación de cosechas. Incluye características propias de la cadena de *switchgrass*: frecuencia y temporada de cosecha, variación del contenido de la biomasa según las condiciones del tiempo, efectos del clima y la distribución dispersa de los cultivos.

En 2002, Gigler et al. [39] desarrollaron un modelo de programación dinámica (PD) para la optimización de costos de agrocadenas, aplicándolo a biomasa de Sauce. Este modelo se basa en dos características propias de los productos agrícolas: Presentación en cada etapa de la cadena (árbol, tronco, trozos o astillas) y Calidad del producto, influenciada por las actividades de procesamiento, transporte y almacenamiento de la biomasa.

5.2.2. Cultivos de azúcar o almidón

En este grupo se enuncian cuatro artículos, de los cuales dos tratan la cadena productiva de la caña de azúcar para la producción de azúcar (alimentos). El otro se refiere a la cadena productiva de maíz para la producción de bioetanol.

En 2004, Higgins y Postma [40], de Australia, presentaron un modelo de MILP para la programación de cosechas, procesamiento primario y transporte de caña de azúcar, con el objetivo de maximización la rentabilidad, haciendo el mejor uso de sus recursos.

Lejars et al. [41], de Francia, en 2008 utilizaron simulación para planificar la cosecha de caña de azúcar con el fin de mejorar el rendimiento de esta, y por lo tanto, aumentar la ganancia de la cadena.

Posteriormente, en 2010, Eksioglu y Petrolia [42], desarrollaron otro modelo para el diseño y coordinación de la cadena de biomasa para la producción de biocombustibles, pero esta vez analizaron el impacto de diferentes modos de transporte en la cadena. El modelo se aplicó para la producción de bioetanol a partir de maíz.

Igualmente en 2010, Flórez et al. [43] exponen un modelo de dinámica de sistemas para analizar las políticas actuales de producción de biocombustibles y los cambios posibles para alcanzar la producción esperada. En este modelo se trabaja la producción de biocombustibles, siendo fuente de etanol la caña y la yuca.

En 2011, Orjuela et al. [3] presentan una caracterización de la caña panelera en Colombia, así como los proyectos vigentes y el desarrollo para la producción de biocombustibles en este país. Los datos históricos son tratados con estadística multivariada y redes neuronales, con el fin de predecir el comportamiento futuro de la producción de caña panelera. También se presenta un diagrama causal donde se identifican los factores y variables relevantes en este sistema productivo.

En el mismo año, Orjuela et al. [44] mediante dinámica de sistemas realizan un análisis de factores y variables relevantes en lo que respecta a la problemática sobre la repercusión que tienen los cultivos de caña panelera para bioetanol sobre la seguridad alimentaria de la población colombiana.

5.2.3. Plantas oleaginosas

En este grupo se muestran dos artículos. Uno hace referencia a la cadena de biomasa de algodón, sin especificar su uso final; el otro trata la cadena productiva de biodiesel de primera generación a partir de diferentes materias primas.

En 2008, Ravula et al. [45] de Estados Unidos, desarrollaron un modelo de simulación discreta de la cadena de biomasa de algodón, con el fin de disminuir el tiempo de reco-



lección (desde los cultivos hacia las instalaciones de procesamiento) de la biomasa con restricciones de equipos especializados para la cosecha.

Flórez et al. [43] en 2010 en su modelo de dinámica de sistemas sobre producción de biocombustibles en Colombia, (explicado en la sección 5.2.2 de cultivos de azúcar/almidón) también consideran la producción de biodiesel a partir de palma de aceite. Igualmente, Zapata et al. [46] hacen un análisis en dinámica de sistemas específico sobre la producción de biodiesel en Colombia a partir de palma de aceite. Éste modelo pretende probar políticas nacionales que contribuyan al aumento de la oferta de biodiesel buscando no afectar lo que se dedica para el consumo humano.

Kim et al. [47], en 2011, plantearon un modelo MILP para el diseño y gestión de la cadena de biocombustibles, esta vez aplicado a la producción de biodiesel a partir de fuentes como residuos forestales, raleo, podas, hierbas y virutas. A diferencia del modelo de Papapostolou et al. [13], este modelo se enfocó en biomasa lignocelulósica, la cual requiere un proceso diferente del biodiesel de primera generación.

5.2.4. Subproductos y residuos

En este grupo se encuentran ocho artículos, de los cuales seis tratan la cadena productiva de biomasa de residuos; uno la de subproductos (rastreo de maíz); y el otro, trata conjuntamente la de residuos y subproductos. A su vez, la mayoría de estos modelos dirigen la biomasa a un uso específico: en esta caso para la producción de biodiesel, bioetanol o para generación de calor.

Sokhansanj et al. [48] en 2006, describen un modelo IBSAL para cuantificar los recursos necesarios y el costo de operación en el abastecimiento y transporte de la biomasa. Este modelo fue aplicado a la biomasa del rastreo de maíz.

En 2009, Eksioglu et al. [49], proponen un modelo matemático para la cadena de biomasa dirigida a biorrefinerías para la producción de biocombustibles. En este modelo se toman en cuenta variables de decisión a largo plazo (diseño de la cadena) y a mediano y corto plazo (gestión de la cadena), integrando estos dos niveles de decisión. El modelo es aplicado para la obtención de bioetanol a partir de rastreo de maíz y biomasa leñosa (residuos forestales, pulpa de madera y madera de aserrío).

En 1997 De Mol et al. [50], desarrollaron dos modelos: uno de simulación, para cuantificar los costos y consumo de energía en la cadena, y otro de optimización MILP, para Minimización el costo de la cadena. El objetivo de los modelos era el diseño de cadenas de biomasa de diferentes residuos de papel, madera, podas, raleo y sanitario para plantas de energía.

Gunnarsson et al. [51] en 2004, en Suecia, desarrollaron un modelo de programación lineal entera mixta (MILP por sus siglas en inglés) donde también trabajo la cadena de

biomasa forestal para obtener combustible forestal, pero esta vez la fuente fue residuos forestales. El objetivo de este modelo fue minimización el costo total generando una estrategia de distribución y procesamiento de los residuos.

Dunnet et al. [52] en 2007, presentaron un modelo MILP enfocado al diseño de la cadena de biomasa para centrales de combustión en la que se asignan las facilidades logísticas a utilizar en cada momento de tiempo, especificando sus capacidades y tareas asignadas: recolección, compresión, secado, almacenamiento y transporte de la biomasa.

Por su parte, Huang et al. [29] en 2010 formularon un modelo MILP para la planeación de operaciones en un horizonte de tiempo determinado, para la producción de biocombustibles a partir de biorresiduos. Este modelo se aplicó para evaluar el potencial económico y las necesidades de infraestructura para la producción de bioetanol a partir de residuos de biomasa en California, USA.

Así mismo, Papapostolou et al. [13], en Grecia, en 2011, propusieron un modelo MILP genérico aplicado al diseño y gestión de la cadena de biocombustibles, considerando opciones de producción o importación de materias primas. El modelo se implementó en Grecia, en la cadena de biodiesel de primera generación, proveniente de materias primas como colza, algodón, girasol, cynara y soya.

Por último Chien y Fan [53], en 2011, plantearon un modelo de programación estocástica entera mixta para soportar la planeación estratégica de cadenas productivas de bioetanol a partir de residuos. Este modelo involucra tanto el diseño de la cadena (localización y capacidad de refinerías y terminales) y coordinación de la cadena (plan de transporte) en un ambiente de decisión, bajo incertidumbre.

6. Clasificación de los modelos matemáticos para SCM de petrocombustibles

An et al. [30] en 2011 evalúan artículos referentes a modelos matemáticos aplicados a cadenas productivas de combustible basado en petróleo. Al igual que con los modelos de biocombustibles, los artículos son categorizados de acuerdo a dos dimensiones (nivel en la cadena de suministro y nivel de decisión) como se muestra en la Figura 14.

Los modelos matemáticos desarrollados para la toma de decisiones en las cadenas productivas de combustible basado en petróleo se enfocan principalmente con los niveles medio y bajo de la cadena, es decir, “*midstream*” y “*downstream*”, correspondientes a los procesos de refinado y distribución a las estaciones de servicio. Adicionalmente, se evidencia una mayor concentración en modelos que apoyan las decisiones a nivel táctico; sin embargo, también se presentan modelos para los niveles operativo e integrado y ninguno para el nivel estratégico.

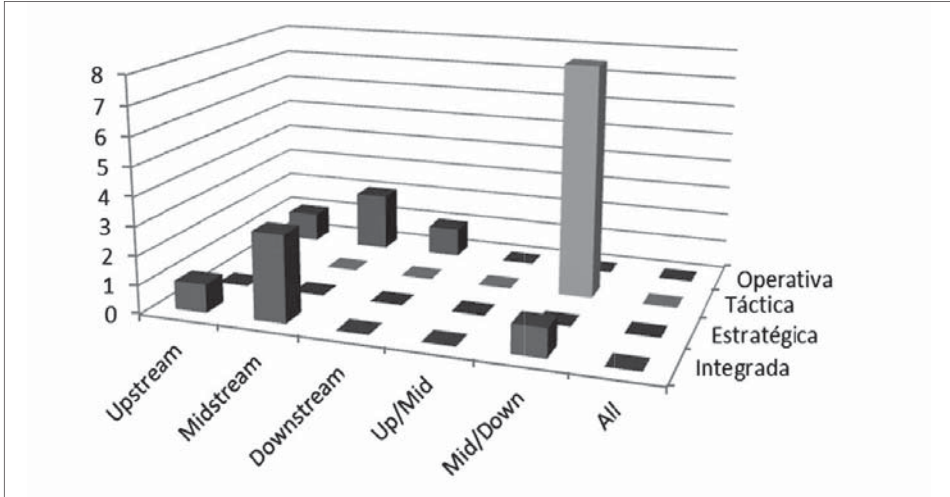


Figura 14. Categorización de los artículos relacionados a SCM de combustibles basados en petróleo.
Fuente: A partir de [30]

Conclusiones

En la revisión de la literatura no se encontraron artículos científicos de modelos matemáticos de SCM de biocombustibles. La mayoría de artículos provienen de países refinadores de biocombustibles, como USA y varios países de la Unión Europea. Pero prácticamente nada de los países más productores de biomasa son Malasia, Indonesia (Oriente), México, Brasil y Argentina (América). Así mismo, no se encontró ningún artículo para el diseño de la cadena productiva de biodiesel a partir de palma de aceite. En razón de lo anterior, se presenta una referencia importante en este trabajo.

Es evidente que la herramienta más utilizada en el diseño de modelos matemáticos de SCM es la programación lineal entera mixta (MILP). La mayor parte de los modelos buscan apoyar la toma de decisiones en el diseño de la cadena (localización y plan de ampliación de capacidades), en las cuales se utilizan variables de decisión booleanas (variables enteras); y en la gestión de la cadena que contemplan los flujos a lo largo de la cadena desde materias primas, productos intermedios y productos terminados (como variables continuas).

Los modelos matemáticos para la cadena de los biocombustibles son diferentes a los de la cadena de los combustibles basados en petróleo. Mientras los modelos matemáticos para el biocombustible se concentran en un nivel alto de la cadena (*upstream*), los combustibles basados en petróleo se concentra en los niveles medio y bajo de la cadena (*downstream* y *midstream*). Esto probablemente debido a que mientras en la producción del biocombustible son importantes las decisiones relacionadas con la materia prima (a nivel operativo, táctico y estratégico), en el petróleo las decisiones en la cadena de los petro-

combustibles se dirigen a los procesos de refinamiento y distribución, y a la extracción en yacimientos.

A partir de la revisión realizada en este estudio, se evidencia que la mayoría de modelos matemáticos se concentran en el diseño y gestión de cadenas de biomasa de residuos y plantas lignocelulósicas. Pocos modelos tratan cadenas de biocombustibles de primera generación (plantas oleaginosas para la producción de biodiesel y de azúcar o almidón para la producción de etanol). Lo anterior sugiere un campo de investigación abierto en relación a desarrollar modelos matemáticos de SCM para el biodiesel, que sirvan para apoyar la toma de decisiones en el diseño y gestión de estas cadenas productivas.

Referencias bibliográficas

- [1] DUFEY, Annie. (2006). Producción y comercio de biocombustibles y desarrollo sustentable: los grandes temas. Instituto Internacional para el Medio Ambiente y Desarrollo. Londres. Documento de Discusión Número 2 de Mercados Sustentables.
- [2] ARÍSTEGUI, Juan Pablo. (2009). Los biocombustibles desde la perspectiva del comercio internacional y del derecho de la organización mundial del comercio. *Revista de Derecho (Austral)*, vol. XXII, núm. 1, julio, 2009, pp. 113-134 Universidad Austral de Chile.
- [3] ORJUELA, Javier. HUERTAS, Isaac. FIGUEROA, Juan. KALENATIC, Dusko. CADENA, Katherine. (2011). Potencial de producción de bioethanol a partir de caña panelera: Dinámica enre contaminación, seguridad alimentaria y uso del suelo. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. *Revista de Ingeniería Vol 16, N° 1*. Bogotá.
- [4] BALAT, Mustafa. (2010). Potential alternatives to edible oils for biodiesel production – A review of current work. Trabzon, Turquía. *Energy Conversion and Management* 52 1479–1492.
- [5] IICA. (2010). Atlas de la Agroenergía y los Biocombustibles en las Américas: II Biodiesel. - Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. Costa Rica.
- [6] KRAWCZYK, T. (1996). Biodiesel - alternative fuel makes inroads but hurdles remain. *INFORM*;7:800–15
- [7] BENJUMEA, Pedro. AGUDELO, John. RÍOS, Luis. (2009). Biodiésel: Producción, calidad y caracterización. Editorial Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia.
- [8] NG, J.-H. NG, Hoon Kiat, GAN, S. (2009). Recent trends in policies, socioeconomy and future directions of the biodiesel industry. Malasia. *Clean Techn Environ Policy* 12: 213–238
- [9] DEMIRBAS, Ayhan. (2009). Progress and recent trends in biodiesel fuels. Trabzon, Turquía. *Energy Conversion and Management* 50 14–34.
- [10] USDA. (2012). Oilseeds: World Markets and Trade. United States Department of Agriculture. Foreign Agricultural Service. Circular Series FOP 06-12.
- [11] CEPAL. (2011). Análisis comparativo de patentes en la cadena de producción de biocombustibles entre América Latina y el resto del mundo. Santiago, Chile. Comisión económica para América Latina y el Caribe. Diálogo de Políticas sobre desarrollo institucional e innovación en biocombustibles en América Latina y el Caribe Santiago de Chile, 28 y 29 de marzo, 2011.
- [12] ORJUELA, Javier. RAMÍREZ, Carmen. LINARES, Karina. (2010). Procesos productivos para la obtención de agro combustibles. Universidad Católica de Colombia. Studiositas, edición de diciembre, vol5, núm.3.



- [13] PAPAPOSTOLOU, Christiana. KONDILI, Emilia. KALDELLIS, John K. (2011). Development and implementation of an optimisation model for biofuels supply chain. Grecia. Energy 36 6019 - 6026.
- [14] MITTELBAACH, M. REMSCHMIDT, C. (2004). Biodiesels – the comprehensive handbook. Graz, Austria: Karl-Franzens University Press.
- [15] KNOTHE, G. SHARP, CA. RYAN, TW. (2006). Exhaust emissions of biodiesel, petrodiesel, neat methyl esters, and alkanes in a new technology engine. Energy Fuels; 20:403–8.
- [16] DEMIRBAS, Ayhan. (2007). Importance of biodiesel as transportation fuel. Trabzon, Turquía. Energy Policy 35 4661–4670.
- [17] DEMIRBAS, Ayse Hilal. DEMIRBAS, Imren. (2007). Importance of rural bioenergy for developing countries. Trabzon, Turquía. Energy Conversion and Management 48 2386–2398.
- [18] YEE, Kian Fei. TAN, Kok Tat, ABDULLAH. Ahmad Zuhairi. LEE, Keat Teong. (2009). Life cycle assessment of palm biodiesel: Revealing facts and benefits for sustainability. Pulau Pinang, Malasia. Applied Energy 86 S189–S196.
- [19] FAZAL, M.A. HASEEB, A.S.M.A. MASJUKI, H.H. (2010). Biodiesel feasibility study: An evaluation of material compatibility; performance; emission and engine durability. Kuala Lumpur, Malasia. Renewable and Sustainable Energy Reviews 15 1314–1324.
- [20] CHOUINARD, Pascale. BRADT, Laura. PONCE José M. EL-HALWAGI, Mahmoud M. (2010). Incorporation of process integration into life cycle analysis for the production of biofuels. USA y Mexico. Clean Technologies and Environmental Policy. Volume 13, Number 5, 673-685.
- [21] BALA, BK. (2005) Studies on biodiesels from transformation of vegetable oils for diesel engines. Energy Educ Sci Technol.15:1–43.
- [22] AJANOVIC, A. HAAS, R. (2010). Economic challenges for the future relevance of biofuels in transport in EU countries. Austria. Energy 35 3340 - 3348.
- [23] FEDEBIOCOMBUSTIBLES. (2012). Cifras Informativas del Sector Biocombustibles - biodiésel de palma de aceite. Federación nacional de biocombustibles de Colombia.
- [24] MINAGRICULTURA. (2009). Política Nacional de Biocombustibles - Visión desde el sector Agropecuario. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de la República de Colombia.
- [25] RODRÍGUEZ, Isaías. ORJUELA, Javier. (2009). Panorama de las políticas y leyes del gobierno colombiano frente a la producción de alimentos agropecuarios y de producción de agrocombustibles. Estudios en derecho y gobierno, Vol. 2, N° 2. Universidad Católica de Colombia.
- [26] GUALTEROS S, Juan Manuel. (2011). Estudio prospectivo de la cadena productiva del biodiésel a partir de palma africana en Colombia. Universidad Nacional. Bogotá, Colombia.
- [27] NACEPT. (2007). Strategic Framework for Biofuels Efforts. National Advisory Council for Environmental Policy and Technology. Washington DC, Estados Unidos.
- [28] AWUDU , Iddrisu. ZHANG, Jun. (2012). Uncertainties and sustainability concepts in biofuel supply chain management: A review. Estados Unidos. Renewable and Sustainable Energy Reviews 16 1359– 1368.
- [29] HUANG, Yongxi. CHEN, Chien-Wei. FAN, Yueyue. (2010). Multistage optimization of the supply chains of biofuels. Estados Unidos. Transportation Research Part E 46 820–830.
- [30] AN, Heungjo. WILHELM, Wilbert E. SEARCY, Stephen W. (2011). Biofuel and petroleum-based fuel supply chain research: A literature review. Estados Unidos. biomass and bioenergy 35 3763 – 3774.
- [31] GALLIS, Christos TH. (1996). Activity oriented stochastic computer simulation of forest biomass logistics in Greece. Forest Engineering Researcher, Greece. Biomass and Bioenergy Vol. 10. Nos 516, pp. 377-382.

- [32] TRONCOSO, Juan J. GARRIDO, Rodrigo A. (2005). Forestry production and logistics planning: an analysis using mixed-integer programming. Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago de Chile, Chile. *Forest Policy and Economics* 7: 625–633.
- [33] MARTINS, Isabel. CONSTANTINO, Miguel. BORGES, José G. (2005). A column generation approach for solving a non-temporal forest harvest model with spatial structure constraints. Lisboa, Portugal. *European Journal of Operational Research* 161: 478–498.
- [34] CONSTANTINO, Miguel. MARTINS, Isabel. BORGES, José G. (2008). A New Mixed-Integer Programming Model for Harvest Scheduling Subject to Maximum Area Restrictions. Lisboa, Portugal. *OPERATIONS RESEARCH*, Vol. 56, No. 3, May–June, pp. 542–551.
- [35] ZHANG, Huizhen. CONSTANTINO, Miguel. FALCÃO, André. (2011). Modeling forest core area with integer programming. Centro de Investigação Operacional, Universidade de Lisboa, Portugal. *Ann Oper Res* 190:41–55.
- [36] CUNDIFF, John S. DIAS, Neil. SHERALI, Hanif D. (1996). A linear programming approach for designing a herbaceous biomass delivery system. Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA, USA. *Bioresource Technology* 59: 47-55.
- [37] KUMAR, Amit. SOKHANSANJ Shahab. (2007). Switchgrass (*Panicum virgatum*, L.) delivery to a biorefinery using integrated biomass supply analysis and logistics (IBSAL) model. *Bioresource Technology* 98 (2007) 1033–1044.
- [38] ZHU, Xiaoyan. LI, Xueping. YAO, Qingzhu. CHEN, Yuerong. (2011). Challenges and models in supporting logistics system design for dedicated-biomass-based bioenergy industry. USA. *Bioresource Technology* 102. 1344–1351.
- [39] GIGLER, J.K. HENDRIX, E.M.T. HEESEN, R.A. VAN DEN HAZELKAMP, V. MEERDINK, G. (2002). On optimisation of agri chains by dynamic programming. Wageningen, Netherlands. *European Journal of Operational Research* 139: 613–625.
- [40] HIGGINS, Andrew J. POSTMA, Steve. (2004). Australian Sugar Mills Optimise Siding Rosters to Increase Profitability. Australia. *Annals of Operations Research* 128, 235–249.
- [41] LEJARS, Caroline. LE GAL, Pierre-Yves. AUZOUX, Sandrine. (2008). A decision support approach for cane supply management within a sugar mill area. Francia. *computers and electronics in agriculture* 60: 239–249.
- [42] EKŞIOĞLU, Sandra D. PETROLIA, Daniel. (2010). Analyzing the Impact of Intermodal Facilities to the Design and Management of Biofuels Supply Chain. Mississippi State University, USA.
- [43] FLÓREZ B., Ana M. , FRANCO C., Carlos J. , IDYNER, saac . (2010). Análisis de la producción de biocombustibles en Colombia. Universidad Nacional de Colombia. 8° Congreso Latinoamericano y 8° Encuentro Colombiano de Dinámica de Sistemas.
- [44] ORJUELA C, Javier A., CADENA O., Katherine, BERNAL H., Milena, FIGUEROA G., Juan C. HUERTAS, Isaac . (2011). Dinámica de Producción de Bioetanol a partir de la Caña Panelera, Incidencia en la Seguridad Alimentaria. IX Congreso Latinoamericano de Dinámica de sistemas y II Congreso Brasileño de Dinámica de Sistemas.
- [45] RAVULA, Poorna P. GRISSO, Robert D, CUNDIFF John S. (2008). Cotton logistics as a model for a biomass transportation system. *Biological Systems Engineering*, Virginia Tech, USA. *BIOMASS AND BIOENERGY* 32: 314 – 325.
- [46] Sebastián ZAPATA R. Carlos J. FRANCO C. Ana M. FLÓREZ B. (2010). Modelo de producción de palma de aceite. 8° Congreso Latinoamericano y 8° Encuentro Colombiano de Dinámica de Sistemas.
- [47] KIM, Jinkyung. REALFF Matthew J. LEE, Jay H. WHITTAKER Craig. FURTNER, Ludwig. (2011). Design of biomass processing network for biofuel production using an MILP model. *Biomass and bioenergy* 35 853 – 871.



- [48] SOKHANSANJ Shahab, KUMAR Amit, TURHOLLOW, Anthony F. (2006). Development and implementation of integrated biomass supply analysis and logistics model (IBSAL). *Biomass and Bioenergy* 30: 838–847.
- [49] EKŞIOĞLU, Sandra D. ACHARYA, Ambarish. LEIGHTLEY, Liam E. ARORA, Sumesh. (2009). Analyzing the design and management of biomass to biorefinery supply chain. USA. *Computers & Industrial Engineering* 57: 1342–1352.
- [50] DE MOL, R.M. JOGEMS, M.A.H. VAN BEEK, P. GIGLER, J.K. (1997). Simulation and optimization of the logistics of biomass fuel collection. Wageningen, Netherlands. *Netherlands Journal of Agricultural Science* 45: 219-228.
- [51] GUNNARSSON, Helene. RÖNNQVIST, Mikael. LUNDGREN, Jan T. (2004). Supply chain modelling of forest fuel. Linköping Institute of Technology, Suecia. *European Journal of Operational Research* 158: 103–123.
- [52] DUNNETT, A. ADJIMAN, C. SHAH, N. (2007). Biomass to heat supply chains Applications of Process Optimization. Centre for Process Engineering, Department of Chemical Engineering, Imperial College, London, UK.
- [53] CHEN, Chien-Wei. FAN, Yueyue. (2011). Bioethanol supply chain system planning under supply and demand uncertainties. Universidad de California. USA. *Transportation Research Part E* 48 150–164.

Manuel José Barón Molina

Es Ingeniero Industrial de la Universidad Autónoma de Colombia, de Bogotá, Colombia. Cursó una especialización en Gerencia de Negocios Internacionales en la Universidad Jorge Tadeo Lozano, en Bogotá, Colombia. Actualmente realiza su investigación para obtener su título de Maestría en Ingeniería Industrial en la Universidad Católica de Colombia, en Bogotá, Colombia.

Actualmente se desempeña como profesor en las áreas de Logística e Investigación de Operaciones, en la Universidad Católica de Colombia. e-mail: mjbaron@ucatolica.edu.co

Isaac Huertas Forero

Es Estadístico Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. Obtuvo su título de Maestría en Investigación y Estadística en la Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia.

Actualmente se desempeña como profesor en las áreas de Logística e Investigación de Operaciones en la Universidad Católica de Colombia y Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Pertenece como líder al grupo GEGI, en la Universidad Católica de Colombia, en Bogotá, Colombia. e-mail: ihuertas@ucatolica.edu.co

Javier Arturo Orjuela Castro

Es Ingeniero de Alimentos, Ingeniero Industrial, Especialista en Ingeniería de producción de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia. Obtuvo su título de Maestría en Investigación y Estadística en la Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia.

Actualmente se desempeña como profesor en las áreas de Logística e Investigación de Operaciones en varias universidades a nivel de pregrado y posgrado en la Universidad Católica de Colombia y Universidad Distrital Francisco José de Caldas. e-mail: jaorjuela@etb.net.co