

**DISEÑO DE UNA CADENA DE SUMINISTRO DE BIOCOMBUSTIBLE
INTEGRANDO DECISIONES ESTRATÉGICAS Y TÁCTICAS**

INVESTIGADORA PRINCIPAL

Ph.D. (C) MARCELA MARÍA MORALES CHÁVEZ

Investigadores Auxiliares

YAZMÍN ANDREA VERA JARAMILLO

CRISTHIAN FELIPE MARÍN ARCILA

UNIVERSIDAD LIBRE SECCIONAL PEREIRA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERÍA COMERCIAL

SEMILLERO EN INVESTIGACIÓN DE OPERACIONES Y ESTADÍSTICA SEIO

PEREIRA

2018

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	6
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	8
2. SISTEMA DE OBJETIVOS	12
2.1 Objetivo general	12
2.2 Objetivos específicos	12
3. MARCO REFERENCIAL	13
3.1 Marco teórico	13
3.1.1 Diseño de la cadena de suministro	13
3.1.2 Diseño de cadenas de suministro de biocombustible	17
3.1.3 Biocombustible a partir de residuos de café	19
3.1.4 Colombia como caso de estudio	21
3.2 Estado actual	27
4. MODELO DE OPTIMIZACIÓN	33
5. CASO DE ESTUDIO	44
6. CONCLUSIONES	57
7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59
ANEXOS	65

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Resumen de las revisión de la literatura	27
Tabla 2. Breve revisión bibliográfica de modelos aplicados al diseño de cadenas de suministro integrando decisiones de localización e inventario.....	29
Tabla 3. Componentes del modelo matemático.....	34
Tabla 4. Parámetros de entrada.....	35
Tabla 5. Variables de decisión.....	37
Tabla 6. Disponibilidad residuos por región.....	47
Tabla 8. Inversión Aperturas.....	51
Tabla 7 Suministro no utilizado.....	56

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Partes del grano de café.....	20
Figura 2. Área cultivada de Café por departamentos 2017.....	22
Figura 3. Temporadas de cosecha de café	23
Figura 4. Pulpa obtenida del beneficio del café.....	24
Figura 5. Mucílago obtenido del beneficio del café	25
Figura 6. Tallos de café proveniente de la remoción de cafetales.	26
Figura 7. Campo de aplicación Biocombustible.....	30
Figura 8. Autores representativos de la revisión de la literatura.....	31
Figura 9. Revistas representativas de la revisión de la literatura	31
Figura 10. Cadena de Suministro de Biocombustible a partir de los residuos del Café.	33
Figura 11. Contexto Geográfico	45
Figura 12 Disponibilidad de residuos	46
Figura 13. Características del modelo en GAMS del caso de estudio.....	49
Figura 14. Apertura de instalaciones	50
Figura 15. Flujo de proveedores a centros de Acopio	52
Figura 16.. Inventarios Centros de Acopio.....	53
Figura 17.. Flujo de Centros de Acopio a Biorefinerías	54
Figura 18. Flujo de Biorefinerías a centrales de mezcla.....	54
Figura 19. Flujo de Biorefinerías a centrales de mezcla.....	55

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Costos.....	64
Anexo 2. Capacidades.....	69
Anexo 3. Factores de Conversión.....	71
Anexo 4. Suministro de biomasa.....	72
Anexo 5. Demanda de bioetanol.....	74

INTRODUCCIÓN

Las crecientes preocupaciones sobre la seguridad del suministro de energía y el cambio climático han fomentado la producción y expansión de biocombustibles en todo el mundo, estos ofrecen la posibilidad de contribuir a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (Akgul, Shah, & Papageorgiou, 2012). No obstante, los altos costos logísticos plantean retos importantes en la estructuración de su cadena de suministro.

Una cadena de suministro de biocombustibles es una red de múltiples escalones que consiste en sitios de cultivo de biomasa, instalaciones de producción de bioetanol y centros de demanda. La aplicación de la optimización de la cadena de suministro a estos sistemas implica la consideración de todos estos nodos, así como el transporte de biomasa y bioetanol a lo largo de la cadena (Akgul et al., 2012).

Determinar la ubicación óptima de las instalaciones, sujeto a la demanda del mercado, la idoneidad de la tierra para la producción de biomasa y los costos de transporte es un reto y ha recibido considerable atención en la literatura de ingeniería y gestión de la cadena de suministro. La proximidad de la biorefinería a los usuarios finales y las áreas de producción de materias primas también afecta los sistemas locales de transporte, la calidad ambiental, las economías regionales (He-Lambert et al., 2018).

En esta vía, el objetivo de esta investigación es el diseño de una cadena de suministro de biocombustible, que integre decisiones de instalaciones e inventario, en busca de la maximización del valor presente neto (VPN) del sistema. Un modelo de Programación Lineal

Entera Mixta (PLEM) determina la capacidad y ubicación de centros de acopio y biorefinerías, además de los flujos a lo largo de la cadena.

El modelo propuesto se aplica a la región cafetera de Colombia utilizando los residuos del café (tallos, pulpa, mucílago), lo cuales son materia prima potencial para la producción de biocombustible y se generan en gran medida en el país, debido que es el tercer productor de café a nivel mundial (ICO, 2018).

El modelo se resuelve con GAMS 23.5 y se obtiene un valor máximo del VPN de US\$174.904.129, con una configuración de cadena de tres centros de acopio dos con capacidad media y uno con capacidad pequeña y dos biorefinerías, una de estas con capacidad pequeña y la otra con capacidad media. Se observa que, de los tres residuos disponibles, la pulpa es la que más utiliza el modelo para satisfacer la demanda de bioetanol con una participación de 61.15%.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

Las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) como los niveles de dióxido de carbono (CO₂) están aumentando rápidamente a escala mundial. Esto ha generado el cambio climático con impactos negativos significativos como el incremento de la temperatura, pérdida de biodiversidad y efectos en la seguridad alimentaria. Esta problemática se debe principalmente a la actividad humana, por el inadecuado uso de combustibles fósiles (Cavallaro, Pearce, & Sidortsov, 2018).

A lo largo del siglo XXI, se prevé que el cambio climático ocasione un impacto negativo en la salud debido a olas de calor; una mayor probabilidad de desnutrición derivada de una menor producción de alimentos en las regiones pobres y menor productividad laboral en las poblaciones vulnerables (B. Field, R. Barros, Jon Dokken, J. Mach, & D. Mastrandrea, 2014).

Una solución a estas problemáticas son los biocombustibles, los cuales ofrecen una alternativa atractiva y renovable a los combustibles derivados del petróleo (Toogood & Scrutton, 2018). Los biocombustibles se consideran una forma de reducir el nivel de emisiones de CO₂ y aumentar la seguridad energética, ya que cubren aproximadamente el 10% de la demanda mundial total de energía (Xu, Lv, Huo, & Li, 2018).

Su clasificación está dada en tres generaciones. Los de primera generación producida por la fermentación de plantas de cultivo como el maíz o la caña de azúcar tienen un impacto negativo en la seguridad alimentaria, particularmente cuando la biomasa fermentable se deriva de las partes comestibles de las plantas alimenticias (Toogood & Scrutton, 2018). Esto condujo al desarrollo de biocombustibles de segunda generación, los cuales son producidos principalmente a partir de una variedad de recursos de biomasa, incluidos cultivos no alimentarios y residuos (Rahimi et al., 2018).

Sin embargo, su potencial para satisfacer de manera sostenible las demandas mundiales de energía es un tema de debate, en términos de disponibilidad de materia prima y posibles efectos negativos sobre los balances de carbono y la biodiversidad. Los biocombustibles de tercera generación producidos a partir de biomasa de microalgas pueden superar los inconvenientes de los biocombustibles de primera y segunda generación, siendo más productivos y sostenibles ya que las microalgas tienen tasas de crecimiento más rápidas que otros cultivos y, por tanto, mayores rendimientos por unidad de área, sin embargo aún se encuentran en etapa de experimentación (González-González et al., 2018).

No obstante, la producción y comercialización de biocombustibles se ve obstaculizada por las incertidumbres asociadas con el rendimiento de la materia prima y la estacionalidad (C. W. Chen & Fan, 2012). La incertidumbre de la biomasa junto con la estacionalidad representa un desafío significativo en el proceso de diseño de la red de la cadena de suministro de biocombustibles. Puesto que la cosecha de la materia prima no están disponibles durante todo el año (Quddus, Chowdhury, Marufuzzaman, Yu, & Bian, 2018).

El suministro de biomasa fluctúa altamente de una estación a otra dependiendo de las diversas condiciones climáticas (por ejemplo, lluvia, temperatura, humedad) junto con eventos extremos (huracán, tornado, inundación) (Persson, Garcia y Garcia, Paz, Jones, & Hoogenboom, 2009). Esto causa un gran desafío para mantener el nivel de producción de las biorefinerías. Para remediar este problema, las biorefinerías almacenan biomasa o biocombustibles en diferentes capas de la cadena de suministro durante todo el año. Esto no solo aumenta el costo de mantenimiento del inventario unitario, sino que también aumenta el costo total de la cadena de suministro (Quddus et al., 2018).

En esta vía, el diseño de la cadena de abastecimiento se convierte en una decisión clave para la eficiencia económica de las operaciones a lo largo de la red de suministro. La integración de decisiones estratégicas y tácticas como la localización de instalaciones y políticas de inventario son esenciales para garantizar esa eficiencia. No obstante, en la literatura se tratan por separado, lo que lleva a soluciones subóptimas y aumento del costo total del sistema (Russell, 2017).

Una línea de investigación creciente se centra en el estudio el Problema de Inventario Localización (ILP: *Inventory Location Problem*), el cual surge cuando las decisiones sobre los dos problemas deben tomarse simultáneamente (Shariff, Omar, & Moin, 2016) con el fin de optimizar el diseño de la cadena de suministro y minimizar el costo total (Lerhlaly, Lebbar, Allaoui, Afifi, & Ouazar, 2017).

Con relación a las decisiones de instalaciones, el problema determina la cantidad, ubicación y capacidad de estas. En cuanto al inventario, se define la cantidad y frecuencia de entrega de cada cliente para satisfacer su demanda (Ahmadi-Javid & Seddighi, 2012).

Aunque el diseño de cadenas de suministro es un campo con una extensa literatura disponible, la integración de las decisiones de localización, inventario no han sido ampliamente abordadas (Hiassat, Diabat, & Rahwan, 2017). En esta vía, este proyecto de investigación desarrolla un modelo matemático para el diseño de una cadena de suministro de biocombustible, bajo el enfoque del ILP, que permite lograr objetivos a largo plazo desde las decisiones estratégicas de localización, considerando decisiones como el inventario.

2. SISTEMA DE OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Diseñar una cadena de suministro de biocombustible, que integre decisiones de instalaciones e inventario.

2.2 Objetivos específicos

- Identificar, desde el punto de vista conceptual, los aspectos que deben ser incorporados en el diseño de una cadena de suministro de biocombustible integrando decisiones de instalaciones e inventarios.
- Determinar los objetivos, variables, parámetros y restricciones que debe incorporar el diseño de una cadena de suministro de biocombustible.
- Diseñar un modelo matemático para el diseño de una cadena de suministro de biocombustible, con base en las características identificadas.
- Analizar el desempeño del modelo matemático mediante su aplicación y contextualización en las particularidades de la región cafetera de Colombia.

3. MARCO REFERENCIAL

Este capítulo inicia presentando las temáticas en las cuales se fundamenta la investigación realizada: Diseño de la cadena de suministro, Diseño de cadenas de suministro de biocombustible y Biocombustible a partir de residuos de café (véase el numeral 3.1.1, 3.1.2 y 3.1.3). Posteriormente se contextualiza a Colombia como caso de estudio (véase el numeral 3.1.4). Finalmente, se exponen los hallazgos encontrados en la revisión sistemática de la literatura que se desarrolló alrededor del objeto de estudio (véase el numeral 3.2).

3.1 Marco teórico

3.1.1 Diseño de la cadena de suministro

La cadena de suministro es una red integrada de instalaciones y opciones de transporte para el suministro, fabricación, almacenamiento y distribución de materiales y productos (García & You, 2015). El diseño de esta red es un desafío estratégico para cualquier empresa dado que implica decisiones a largo plazo y una gran inversión de capital.

Los problemas clásicos del Diseño de la red de cadena de suministro (SCND por sus siglas en inglés: *Supply Chain Network Design*) determina el número, las ubicaciones y las capacidades de las instalaciones de producción y los canales de distribución además controla los parámetros inciertos como la oferta, los procesos de distribución, producción y la

estimación de la demanda (Gahremani-Nahr, Kian, & Sabet, 2019). En general incluyen solo flujos hacia adelante, es decir, flujos de proveedores a clientes finales (Jerbia, Boujelben, Sehli, & Jemai, 2018).

La creciente competencia entre las cadenas de suministro ha obligado a las empresas a buscar soluciones que permitan ahorrar costos y mejorar la eficiencia, además de ofrecer un servicio aún más rápido, flexible y confiable a los clientes. El énfasis en la reducción de costos de inventario junto con el creciente costo de transporte y las fechas de entrega competitivas acentúan la importancia de la coordinación y la integración de las funciones y decisiones de la cadena de suministro (Darvish & Coelho, 2018).

Tradicionalmente en la literatura sobre optimización de la cadena de suministro, se ha considerado las decisiones de ubicación de las instalaciones y las decisiones de gestión de inventario de forma independiente (Diabat, Battaia, & Nazzal, 2015). Lo que conlleva a soluciones sub-óptimas y un alto costo de operación del sistema.

Por tanto, en un sistema de planificación integrado el inventario juega un papel importante para satisfacer la demanda de manera oportuna y unir las diferentes funciones de la cadena de suministro (Darvish & Coelho, 2018; Pourhejazy & Kwon, 2016)).

- *Localización de instalaciones*

La literatura sobre la ubicación de las instalaciones se clasifica en dos áreas: evaluación de factores y enfoques matemáticos. La evaluación de factores se enfoca en establecer los factores de éxito críticos del negocio, evaluar las opciones de configuraciones regionales de fabricación, definir un número de sitios potenciales, y clasificar las soluciones más adecuadas (L. Chen, Olhager, & Tang, 2014). Los enfoques matemáticos se formulan típicamente como problemas de minimización de costos y maximización de ganancias (Melo, Nickel, & Saldanha-da-Gama, 2009).

Los problemas de ubicación de instalaciones se definen en términos de dos elementos: espacio y tiempo. Por espacio, se refiere un área de planificación donde se ubican las instalaciones, y por tiempo, se indica el momento de la ubicación (Biajoli, Chaves, Antonio, & Lorena, 2019).

Tanto el espacio como el tiempo pueden analizarse mediante aspectos discretos y continuos. En el espacio discreto, la ubicación de una instalación solo puede ubicarse en puntos específicos, mientras que en un espacio continuo, la instalación puede ubicarse en cualquier parte del área de planificación (Fernandes et al., 2014). Además, el tiempo discreto significa que el establecimiento de una nueva instalación o la modificación de la instalación existente se permiten en puntos de tiempo predeterminados, mientras que dicha restricción no existe para el tiempo continuo (Bolori Arabani & Farahani, 2012).

Hay cuatro componentes que caracterizan los problemas de ubicación; estos son (1) clientes, que se presumen ya están ubicados en puntos o en rutas, (2) instalaciones que se

ubicarán, (3) un espacio en el que se encuentran los clientes y las instalaciones, y (4) una métrica que indica distancias o tiempos entre clientes e instalaciones (ReVelle, 2005).

Las decisiones sobre la ubicación de las instalaciones tienden a ser costosas y su impacto abarca un horizonte a largo plazo, y la ubicación óptima para hoy puede no ser óptima en condiciones futuras (Diabat et al., 2015).

- *Inventario*

La literatura de la teoría del inventario tiende a centrarse en encontrar el reabastecimiento de inventario óptimo, estrategias en los centros de distribución y en los puntos de venta de los minoristas (Shen, 2002).

Mantener los niveles de inventario apropiados es una tarea esencial para una empresa, ya que los niveles de inventario altos aumentan la capacidad de respuesta a los clientes al tiempo que aumentan los costos, mientras que los niveles de inventario bajos pueden causar escasez (Duan & Ventura, 2018).

Ampliar la capacidad del almacén generalmente implica una inversión a largo plazo que es una decisión estratégica. Tal inversión requeriría un incremento cierto o predecible en la demanda durante un largo período. Por otro lado, muchas cadenas de suministro tienen cierto tiempo pico de demanda en un período corto debido a promociones de ventas a corto plazo o emergencias (Feng, Moon, & Ryu, 2017).

La gestión de inventario y la ubicación de las instalaciones son dos cuestiones principales en el diseño eficiente de una red de cadena de suministro (Gunasekaran, Patel, & McGaughey, 2004).

No obstante, la literatura sobre la optimización de la cadena de suministro tradicionalmente ha considerado estos problemas de forma independiente no solo debido a los diferentes horizontes de planificación, sino principalmente a la complejidad computacional del problema de optimización conjunta. Sin embargo, tal integración ofrece la posibilidad de mejorar considerablemente la gestión de la cadena de suministro y reducir los costos (Diabat et al., 2015).

3.1.2 Diseño de cadenas de suministro de biocombustible

Las crecientes preocupaciones sobre la seguridad del suministro de energía y el cambio climático han fomentado la producción y expansión de biocombustibles en todo el mundo, estos ofrecen la posibilidad de contribuir a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (Akgul et al., 2012).

Los biocombustibles cubren aproximadamente el 10% de la demanda mundial total de energía, y están catalogados como de "máxima prioridad" en el desarrollo de combustibles alternativos para el transporte (Mirhashemi, Mohseni, Hasanzadeh, & Pishvae, 2018). La fermentación microbiana, las tecnologías de conversión avanzada y eficiente ahora permiten la extracción de biocombustibles a partir de biomasa, como madera, cultivos y material de desecho (Xu et al., 2018).

Sin embargo, se ha generado una gran polémica por la utilización de materias primas que se emplean para alimentación humana y animal, como el caso de la caña de azúcar, cereales y aceite de palma, y por el balance energético del proceso productivo que, en algunos casos, es negativo. Por tanto, se está investigando en la generación de biocombustibles de segunda generación, provenientes de biomasa residual o de especies vegetales que no se utilizan para la alimentación (Rodríguez Valencia & Zambrano Franco, 2010).

En esta vía, la biomasa lignocelulósica es un recurso para la producción sostenible de biocombustibles. Para tal fin se han desarrollado una variedad de enfoques de ingeniería de sistemas de procesos para el diseño y operación de cadenas de suministro de biocombustibles que representan aspectos económicos, ambientales y sociales (Barbosa-Póvoa, 2012).

Una cadena de suministro de biocombustibles es una red de múltiples escalones que consiste en sitios de cultivo de biomasa, instalaciones de producción de bioetanol y centros de demanda. La aplicación de la optimización de la cadena de suministro a estos sistemas implica la consideración de todos estos nodos, así como el transporte de biomasa y bioetanol a lo largo de la cadena (Akgul et al., 2012).

Las decisiones generalmente consideradas en el SCND se pueden dividir en tres niveles: estratégico (a largo plazo), como la ubicación de la biorefinería y la planificación de la capacidad; táctico (mediano plazo), como la planificación de inventario, y operativo (a corto plazo), como la programación de producción detallada (Rex T.L. Ng et al., 2018).

Determinar la ubicación óptima de las instalaciones, sujeto a la demanda del mercado, la idoneidad de la tierra para la producción de biomasa y los costos de transporte es un reto y ha recibido considerable atención en la literatura de ingeniería y gestión de la cadena de

suministro. La proximidad de la biorefinería a los usuarios finales y las áreas de producción de materias primas también afecta los sistemas locales de transporte, la calidad ambiental, las economías regionales (He-Lambert et al., 2018).

3.1.3 Biocombustible a partir de residuos de café

A medida que las poblaciones en todo el mundo continúan creciendo, las cantidades de materiales de desecho producidos anualmente, incluidos los desechos agrícolas e industriales, también aumentan (Kim, Choi, Lee, Kim, & Bae, 2017). Al mismo tiempo, la tendencia hacia la utilización de recursos renovables como materia prima sostenible está impulsando su uso para producir diversos productos (alimentos, productos químicos, energías y medicamentos) y también puede reducir la emisión de dióxido de carbono (Isikgor & Becer, 2015).

Los residuos de café contienen compuestos tóxicos que pueden estar expuestos al medio ambiente y causar contaminación ambiental. En el proceso del café se estima que menos del 5% de la materia vegetal generada se aprovecha en la elaboración de la bebida, el resto queda en forma residual, representado en materiales fibrosos como hojas, ramas y tallos, generados en el proceso de renovación de los cafetales; frutos verdes que se caen durante la recolección o que se retiran de la masa de café recolectado; pulpa y mucílago producidos en el proceso de beneficio del fruto; la cascarilla generada en la etapa de trilla, y la borra o ripio que se genera en las fábricas de producción de café soluble y cuando se prepara la bebida a partir del grano tostado y molido (Cenicafé, 2016).

Todo este material vegetal, si no se maneja y dispone de forma apropiada, se convierte en fuente de contaminación de los recursos naturales presentes en las zonas cafeteras (Cenicafé, 2016). No obstante, son un recurso de biomasa alternativo prometedor para la producción de bioetanol (Choi, Wi, Kim, & Bae, 2012).

El bioetanol es un combustible líquido que se puede adaptar a los sistemas de suministro de combustible existentes, reemplazando en última instancia los combustibles fósiles en el sector del transporte (Choi et al., 2012), contribuyendo a la reducción de las emisiones de dióxido de carbono (Nguyen, Yang, & Bae, 2017).

En particular, los tallos, la pulpa y el mucílago son potenciales para la producción de bioetanol, debido a su alto contenido de azúcar (Morales-Chávez et al., 2018). En la Figura 1 se muestra las principales partes por las cuales está compuesto el grano de café.

Figura 1. Partes del grano de café



Fuente: Federación Nacional de Cafeteros

3.1.4 Colombia como caso de estudio

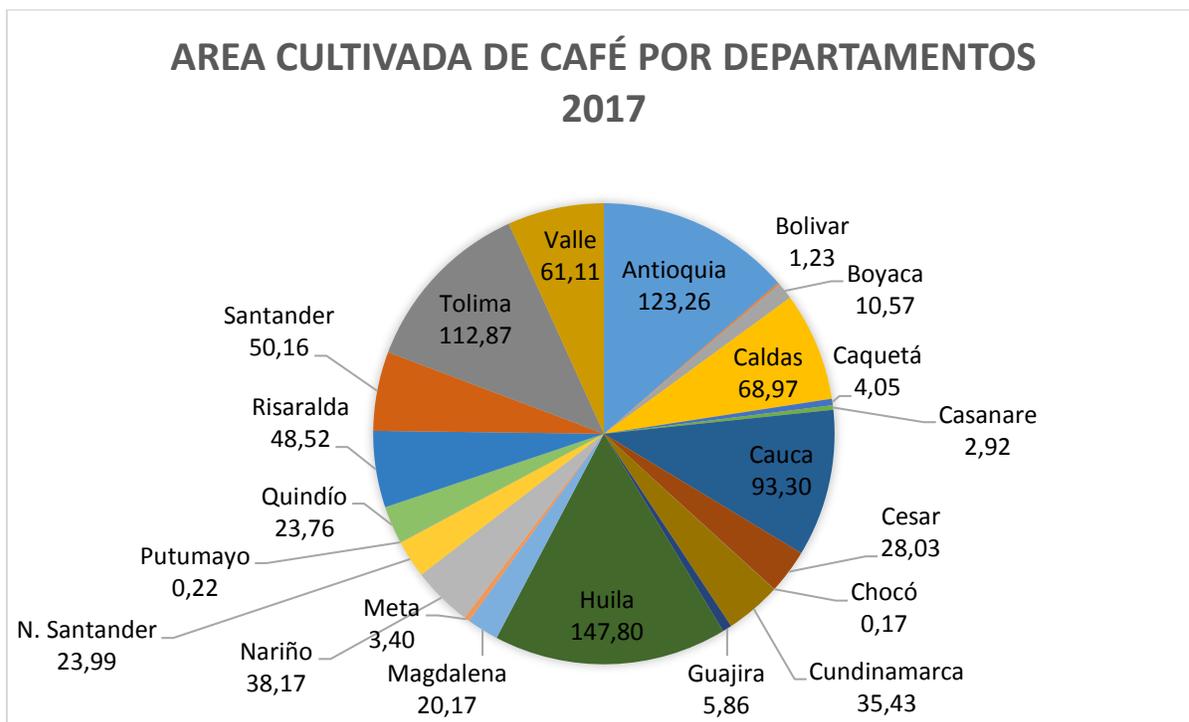
El café colombiano es 100% arábico lavado, lo que convierte a Colombia en el mayor productor de café de calidad en el mundo. Éste tiene una merecida reputación en los mercados internacionales por ser un producto de alta calidad, dadas las condiciones ambientales existentes en Colombia y al sistema de gestión y respaldo a la calidad que han diseñado los productores colombianos. Muchos elementos combinados hacen que el café colombiano sea único (FNC, 2018b).

Son 563.000 familias caficultoras colombianas, en 588 municipios en 22 departamentos de Colombia, se encuentra una extraordinaria diversidad de lenguajes, culturas y razas. El país cuenta con una gran variedad climática entre calor, frío, templado y helado dependiendo de la altitud en las zonas cafeteras. Tiene costas en los océanos Pacífico y Atlántico. Las fuentes hídricas son múltiples y Colombia goza de lluvias bimodales que proveen una ventaja competitiva para la producción de café.

En su gran mayoría los cafeteros colombianos viven en pequeñas fincas o parcelas cuyos cultivos de café, en promedio, no superan las 2 hectáreas. Solamente algo más del 5% de los productores colombianos de café tienen plantaciones de un tamaño superior a las 5 hectáreas (FNC, 2018b).

En el año 2017 se cultivaron un total de 903,95 mil hectáreas. Los departamentos con mayor producción son: Huila (16%), Antioquia (14%), Tolima (12), Cauca (10%). La Figura 2 muestra participación en cuanto al área cultivada para los 22 departamentos de la zona cafetera de Colombia dada en miles de hectáreas.

Figura 2. Área cultivada de Café por departamentos 2017



Fuente: Elaboración propia a partir de información de la FNC

- *Cosechas del Café*

La ubicación geográfica de cada región cafetera colombiana determina unas condiciones particulares de disponibilidad de agua, temperatura, radiación solar y régimen de vientos para el cultivo de grano. Las zonas cafeteras centrales del país presentan periodos secos y lluviosos intercalados a lo largo de diferentes meses. En la mayoría de las regiones cafeteras del país existe un período de floración que va de enero a marzo, y otro que va de julio a septiembre. La cosecha principal en estas zonas se realiza entre septiembre y diciembre, y hay una cosecha secundaria entre abril y junio que se denomina "mitaca". La cosecha

- *Residuos de café*

Pulpa de café

Es el primer producto que se obtiene en el procesamiento del fruto de café y representa, en base húmeda, alrededor del 43,58% del peso del fruto fresco. El promedio de la producción de pulpa es de 2,25 t/ha-año. Por cada millón de sacos de 60 kg de café almendra que Colombia exporta, se generan 162.900 t de pulpa fresca, que si no se utilizan adecuadamente producirían una contaminación equivalente a la generada durante un año, en excretas y orina, por una población de 868.736 habitantes (Rodríguez Valencia & Zambrano Franco, 2010)

Figura 4. Pulpa obtenida del beneficio del café



Fuente: Rodríguez Valencia & Zambrano Franco (2010)

Mucílago de café

El mucílago (Figura 5) se genera en la etapa del desmucilaginado, y en base húmeda, representa alrededor del 14,85% del peso del fruto fresco. En términos de volumen, por cada kilogramo de café cereza sin seleccionar se producen 91 ml de mucílago fermentado. Su producción media es de 768 kg/ ha-año. Por cada millón de sacos de 60 kg de café que Colombia exporta, se generan aproximadamente 55.500 t de mucílago fresco, que si no se utilizan adecuadamente producirían una contaminación equivalente a la generada en un año, en excretas y orina, por una población de 310.000 habitantes (Rodríguez Valencia & Zambrano Franco, 2010).

Figura 5. Mucílago obtenido del beneficio del café



Fuente: Rodríguez Valencia & Zambrano Franco (2010)

Tallos de café

Los tallos de café (Figura 6), provenientes de la práctica de zoqueo, son utilizados por los productores para la cocción de alimentos y el secado del grano, contribuyendo a la conservación del bosque nativo, lo cual tiene una influencia directa en beneficio del ciclo hidrológico y en la regulación del calentamiento global (Rodríguez Valencia & Zambrano Franco, 2010).

Figura 6. Tallos de café proveniente de la remoción de cafetales.



Fuente: Rodríguez Valencia & Zambrano Franco (2010)

3.2 Estado actual

De acuerdo con la problemática planteada, se realizó una revisión sistemática de la literatura utilizando como fuente de consulta la base de datos especializada SCOPUS, con las siguientes ecuaciones de búsqueda:

Ecuación 1: "*Supply chain design*"

Ecuación 2: "*Supply chain design*" and "*Biofuel*"

Las cuales permitieron identificar a través de las contribuciones de los autores en las diferentes revistas científicas, los aspectos considerados en el diseño de cadenas de suministro en el caso de la primera ecuación y particularmente para el sector biocombustibles en la segunda.

En ambos casos se analizó si el documento abordaba las decisiones de localización de instalaciones y políticas de inventario de manera simultánea. En la tabla 1, se presenta el resumen de los hallazgos.

Tabla 1. Resumen de la revisión de la literatura

Decisión	Ecuación 1	Ecuación 2
Localización	16	16
Inventario	15	3
Localización + Inventario	20	5
No relacionados	84	15
Total	135	39

Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la Tabla 1, para la ecuación de búsqueda “*Supply chain design*”, 31 contribuciones sólo abordan una decisión, 16 artículos corresponden a decisiones de localización y 15 de inventario. Con relación a las investigaciones en donde se consideran de manera simultánea las dos decisiones, se obtuvieron 20 artículos. Por otro lado, de la literatura analizada, 84 documentos no tienen relación con el tema abordado no tienen relación con el tema abordado.

En esta vía, se observa que la localización de las instalaciones es la decisión predominante, seguida por la de definir políticas de inventario para una cadena de suministro. De igual manera se evidencia la necesidad de considerar simultáneamente estas decisiones.

Por otro lado, en cuanto a la ecuación de búsqueda “*Supply chain design and "Biofuel"*”, en coherencia con los resultados anteriores, se destacan las contribuciones enfocadas en decisiones de localización y limitados aportes con respecto a la integración de las decisiones objeto de estudio, en las cuales sólo se obtuvieron 5 documentos.

De acuerdo al objetivo de esta investigación, se realizó una revisión exhaustiva a las 20 contribuciones que tiene más relación con la temática abordada en esta investigación. La Tabla 2. Resume las características encontradas en los artículos. Como se puede observar, 5 de las contribuciones abordan cadenas de suministro de biocombustibles, 9 se centran en cadenas directas, 5 en ciclo cerrado y 1 en cadena inversa. Se evidencia una tendencia de investigaciones en el modelamiento de cadenas de suministro clásicas (directas), y la

necesidad de fortalecer la investigación en cadenas que fomenten el aprovechamiento de los residuos.

Con relación a las decisiones de localización, los modelos pese a ser multiperiodos se centran en la apertura de instalaciones en el periodo inicial, a excepción de Moradi Nasab y Amin-Naseri (2016) quienes permiten la apertura en cualquier momento a lo largo del periodo de planificación.

En cuanto a las políticas de inventario, las contribuciones que presentan el manejo de múltiples productos, en todos los casos utilizan la misma política para todos los productos considerados.

Tabla 2. Breve revisión bibliográfica de modelos aplicados al diseño de cadenas de suministro integrando decisiones de localización e inventario

<i>Autores</i>	<i>Tipo de cadena de suministro</i>	<i>Número de productos</i>	<i>Periodos de tiempo</i>	<i>Políticas de inventario</i>	<i>Tiempo de apertura</i>
(R.T.L. Ng & Maravelias, 2016)	Biocombustible	M	M	1	0
(Bairamzadeh, Pishvae, & Saidi-Mehrabad, 2016)	Biocombustible	M	M	1	0
(Lin et al., 2014)	Biocombustible	S	M		0
(You, Tao, Graziano, & Snyder, 2012)	Biocombustible	M	M	1	0
(Ekşioğlu et al, 2009)	Biocombustible	M	M	1	0
(Vahdani et al, 2017)	Directa	S	S		0
(Hammami et al, 2017)	Directa	M	S	1	0
(Ahmadzadeh & Vahdani, 2017)	Ciclo cerrado	S	S		0
(Ross et al, 2017)	Inversa	M	S	1	0
(Hiassat et al, 2017)	Directa	S	M		0
(Ghorbani & Akbari Jokar, 2016)	Directa	M	M	1	0
(Moradi Nasab & Amin-Naseri, 2016)	Directa	M	M	1	T
(Zhalechian, Tavakkoli-Moghaddam, Zahiri, & Mohammadi, 2016)	Ciclo cerrado	M	M	1	0
(Vanajakumari et al, 2016)	Directa	M	M	1	0
(Tang et al, 2016)	Directa	S	S		0
(Deng et al, 2016)	Ciclo cerrado	S	S		0
(Yuchi et al, 2016)	Ciclo cerrado	M	S	1	0
(Liu et al, 2015)	Ciclo cerrado	S	S		0
(Guerrero et al, 2015)	Directa	S	M		0
(Nekooghadirli et al, 2014)	Directa	M	M	1	0

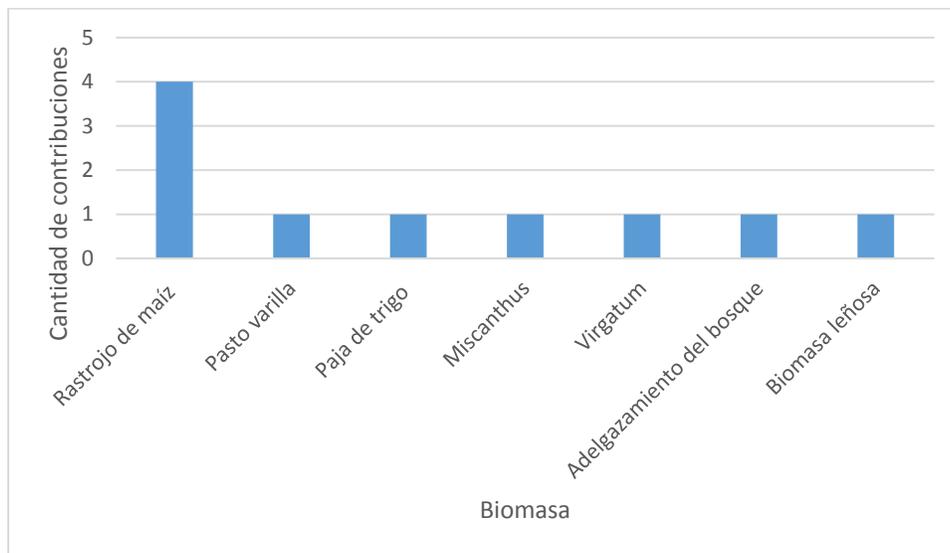
Fuente: Elaboración propia

M: Múltiples productos/periodos

S: Un producto/periodo

En el caso de las cinco investigaciones de biocombustibles, la Figura 7 muestra las materias primas utilizadas, en donde se destaca el rastrojo de maíz como potencial biomasa. No obstante, no se evidencia el aprovechamiento de residuos agrícolas como el café.

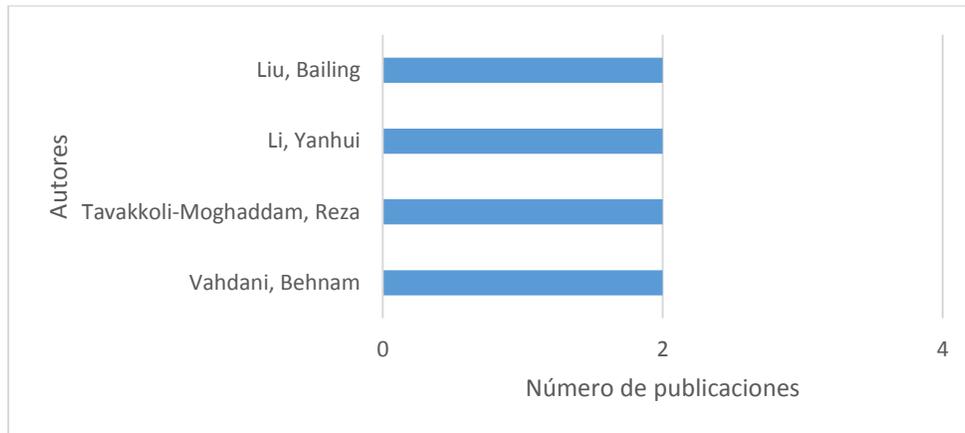
Figura 7. Campo de aplicación Biocombustible



Fuente: Elaboración propia

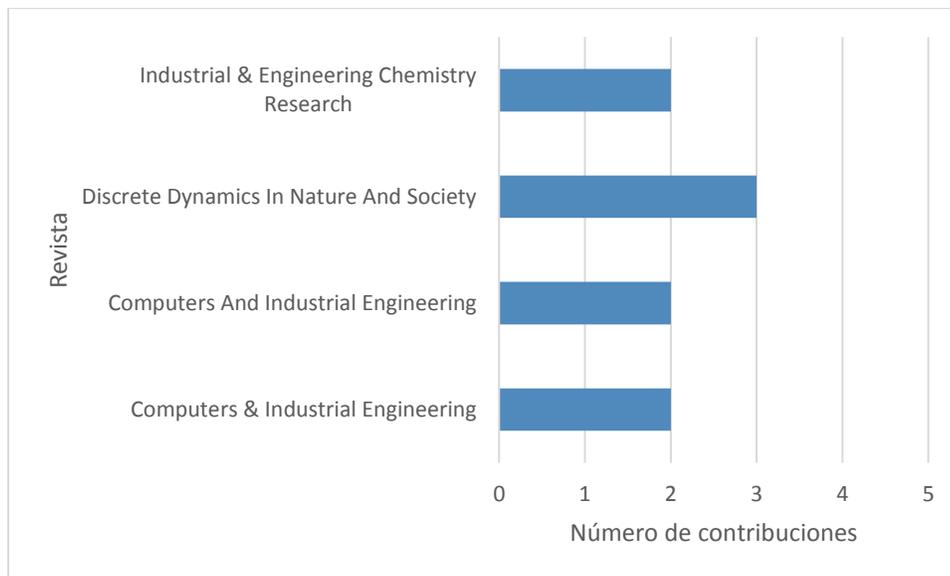
Como referentes teóricos se observa en la Figura 8 los autores que cuentan con más de 2 investigaciones en la revisión de la literatura, quienes pertenecen a universidades de China, Irán y Francia. Los otros autores contribuyen con solo un documento. De igual manera se presenta en la Figura 9 las revistas con más participación dentro de la revisión realizada.

Figura 8. Autores representativos de la revisión de la literatura



Fuente: Elaboración propia

Figura 9. Revistas representativas de la revisión de la literatura



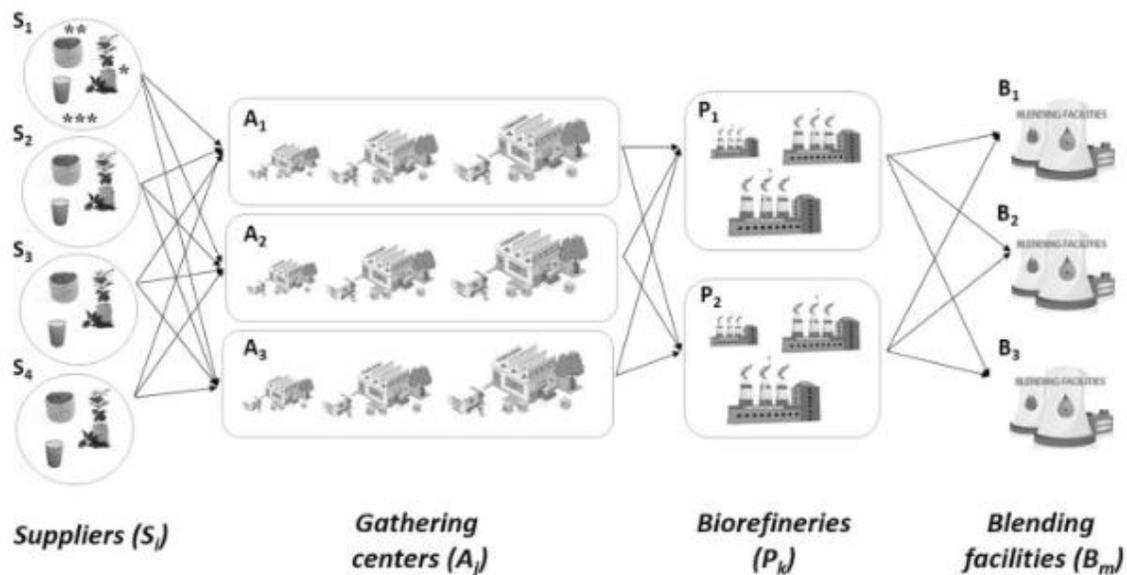
Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con los hallazgos identificados en la revisión de la literatura, el diseño de cadenas de suministro, aunque es un campo con una extensa literatura disponible, registra un número limitado de contribuciones aplicadas al campo de los biocombustibles que integren decisiones de localización e inventario, con enfoques multiproducto, multiperiodo. En esta vía, esta propuesta de investigación pretende aportar a los vacíos encontrados.

4. MODELO DE OPTIMIZACIÓN

La cadena de suministro de biocombustible a partir de los residuos del café está conformada por los siguientes eslabones: a) proveedores de residuos (S_i); b) centros de acopio que permiten el almacenamiento de tallos de café (A_i); c) biorefinerías; estructuras donde se realiza el proceso de conversión de la biomasa para producir el bioetanol (P_i); y d) centrales de mezcla donde se realiza la mezcla del alcohol carburante con combustibles fósiles (B_i). El modelo establece decisiones tales como el número, capacidad y ubicación de los centros de acopio y biorefinerías en el periodo de tiempo inicial, así como también las decisiones de flujo e inventario. Ver Figura 10.

Figura 10. Cadena de Suministro de Biocombustible a partir de los residuos del Café.



Fuente: (Morales-Chávez et al., 2018)

Un resumen de los componentes del modelo se presenta en la Tabla 3. Se puede observar en los conjuntos planteados que se contemplan varios tipos de residuo, y capacidades tanto para los centros de acopio como para las biorefinerías. Por otro lado, los parámetros de entrada del modelo matemático, y las variables de decisión se presentan de manera detallada en las Tablas 4 y 5 respectivamente.

Tabla 3. Componentes del modelo matemático

<i>Componente</i>	<i>Descripción</i>
	<i>W: Conjunto de residuos</i>
Conjuntos	<i>I: Conjunto de proveedores</i>
	<i>J: Conjunto de ubicaciones potenciales para los centros de acopio</i>
	<i>K: Conjunto de ubicaciones potenciales para las biorefinerías</i>
	<i>M: Conjunto de centrales de Mezcla</i>
	<i>B: Conjunto de capacidades para los centros de acopio</i>
	<i>C: Conjunto de capacidades para las biorefinerías</i>
	<i>T: Conjunto de periodos de tiempo</i>
Función objetivo	<i>Maximizar el valor presente neto</i>
Decisiones	<i>Localización de instalaciones</i>
	<i>Niveles de inventario</i>

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4. Parámetros de entrada

<i>Parámetro</i>	<i>Término</i>	<i>Descripción</i>	<i>Unidades</i>
<i>Ingresos</i>	PBE_t	Precio de venta del bioetanol en el periodo de tiempo t	\$/litro
<i>Costo Materia Prima</i>	PBM_{tw}	Precio de compra del residuo w en el periodo de tiempo t	\$/tonelada
<i>Costos de apertura</i>	$cosA_{jb}$	Costo de apertura del centro de acopio j con capacidad b	\$
	$cosP_{kc}$	Costo de apertura de la biorefinería k con capacidad c	\$
<i>Costos fijos</i>	$cosfA_{jbt}$	Costo fijo del centro de acopio j con capacidad b, en el periodo de tiempo t	\$/t
	$cosfP_{kct}$	Costo fijo de la biorefinería k con capacidad c, en el periodo de tiempo t	\$/t
<i>Costos variables</i>	$cosvA_{wjb}$	Costo variable del centro de acopio j con capacidad b para el residuo w, en el periodo de tiempo t	\$/tonelada
	$cosvP_{kct}$	Costo variable de la biorefinería k con capacidad c, en el periodo de tiempo t	\$/tonelada

Tabla 4. Continuación

<i>Parámetro</i>	<i>Término</i>	<i>Descripción</i>	<i>Unidades</i>
<i>Costos de inventario</i>	cos_stoA_{wjb}	Costo de inventario por mantener una tonelada del residuo w en el centro de acopio j con capacidad b, en el periodo de tiempo t	\$/tonelada
	$costSA_{wij}$	Costo de transporte desde el proveedor i al centro de acopio j para el residuo w, en el periodo de tiempo t	\$/tonelada
<i>Costos de transporte</i>	$costAP_{wjkt}$	Costo de transporte desde el centro de acopio j a la biorefinería k para el residuo w, en el periodo de tiempo t	\$/tonelada
	$costPB_{kmt}$	Costo de transporte desde la biorefinería k a la central de mezcal m, en el periodo de tiempo t	\$/litro
<i>Capacidades</i>	S_{iwt}	Cantidad disponible del residuo w que tiene el proveedor i, en el periodo de tiempo t	toneladas/t
	$capA_{wb}$	Cantidad máxima del residuo w que puede procesar un centro de acopio con capacidad b en un periodo de tiempo	toneladas/t
	$capP_c$	Cantidad máxima de residuo que puede procesar una biorefinería con capacidad c, en un periodo de tiempo	toneladas/t
	cap_stoA_{wb}	Cantidad máxima del residuo w que puede almacenar un centro de acopio con capacidad b	toneladas

Tabla 4. Continuación

<i>Parámetro</i>	<i>Término</i>	<i>Descripción</i>	<i>Unidades</i>
<i>Operación de instalaciones</i>	IC	Índice de conversión de residuos de café (tallos, pulpa y mucílago) a bioetanol	litros/tonelada
<i>Demanda</i>	D_{mt}	Demanda de bioetanol de la central de mezcla m, en el periodo de tiempo t	litros/t

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5. Variables de decisión

<i>Parámetro</i>	<i>Término</i>	<i>Descripción</i>	<i>Unidades</i>
<i>Variables de apertura de instalaciones</i>	A_{jb}	1= Se abre el centro de acopio j con capacidad b 0= En caso contrario	Binario
<i>Variables de inventario</i>	P_{kc}	1= Se abre la biorefinería k con capacidad c 0= En caso contrario	Binario
<i>Variables de inventario</i>	$IA_{wjb t}$	Nivel de inventario del residuo w en el centro de acopio j con capacidad b, en el periodo de tiempo t	toneladas/t

Tabla 5. Continuación

<i>Parámetro</i>	<i>Término</i>	<i>Descripción</i>	<i>Unidades</i>
<i>Variables de flujo</i>	SA_{wijbt}	Cantidad del residuo w enviado desde el proveedor i al centro de acopio j con capacidad b, en el periodo de tiempo t	toneladas/t
	AP_{wjbkct}	Cantidad del residuo w enviado desde el centro de acopio j con capacidad b a la biorefinería k con capacidad c, en el periodo de tiempo t	toneladas/t
	$PB_{kcm t}$	Cantidad de bioetanol enviado desde la biorefinería k con capacidad c a la central de mezcal m, en el periodo de tiempo t	litros/t
<i>Variables de demanda</i>	UD_{mt}	Demanda insatisfecha de la central de mezcla m, en el periodo de tiempo t	litros/t

Fuente: Elaboración propia

La función objetivo maximiza el valor presente neto considerando: ingresos por ventas del bioetanol, costos de compra de materia prima (residuos), costo de apertura de instalaciones, sus costos fijos, variables, de inventario en el caso de los centros de acopio y finalmente el costo de transporte tanto para la biomasa como para el bioetanol (ver Ecuaciones 1- 11).

$$Max F = NPV = \sum_{t \in T} \frac{Flujo\ de\ efectivo_t}{(1 + tasa\ de\ interes)^t} \quad (1)$$

$$\text{Ingreso por ventas} = \sum_{m \in M} \sum_{k \in K} \sum_{c \in C} PBE_t PB_{kcmt} \quad \forall t \in T \quad (2)$$

$$\text{Costo materia prima} = \sum_{j \in J} \sum_{b \in B} \sum_{i \in I} \sum_{w \in W} PBM_{tw} SA_{wijbt} \quad \forall t \in T \quad (3)$$

$$\text{Costo apertura centros de acopio} = \sum_{j \in J} \sum_{b \in B} \text{cos} A_{jb} A_{jb} \quad (4)$$

$$\text{Costo apertura biorefinerías} = \sum_{k \in K} \sum_{c \in C} \text{cos} PC_{kc} PC_{kc} \quad (5)$$

$$\text{Costo fijo centros de acopio} = \sum_{j \in J} \sum_{b \in B} \text{cos} f A_{jbt} A_{jb} \quad \forall t \in T \quad (6)$$

$$\text{Costo fijo biorefinerías} = \sum_{k \in K} \sum_{c \in C} \text{cos} f P_{kct} P_{kc} \quad \forall t \in T \quad (7)$$

$$\text{Costo variable centros de acopio} = \sum_{j \in J} \sum_{b \in B} \sum_{i \in I} \sum_{w \in W} \text{cos} v A_{wjb} SA_{wijbt} \quad \forall t \in T \quad (8)$$

$$\text{Costo variable biorefinerías} = \sum_{j \in J} \sum_{b \in B} \sum_{k \in K} \sum_{c \in C} \sum_{w \in W} \text{cos} v P_{kct} AP_{wjbkct} \quad \forall t \in T \quad (9)$$

$$\text{Costo inventario centros de acopio} = \sum_{j \in J} \sum_{b \in B} \sum_{w \in W} \text{cos}_{sto} A_{wjb} IA_{wjb} \quad \forall t \in T \quad (10)$$

$$\begin{aligned}
\text{Costo de transporte} = & \sum_{j \in J} \sum_{b \in B} \sum_{i \in I} \sum_{w \in W} \text{costSA}_{wijt} SA_{wijbt} + \\
& \sum_{j \in J} \sum_{b \in B} \sum_{k \in K} \sum_{c \in C} \sum_{w \in W} \text{costAP}_{wjkt} AP_{wjbkct} \\
& + \\
& \sum_{m \in M} \sum_{k \in K} \sum_{c \in C} \text{costPB}_{kmt} PB_{kcmt} \quad \forall t \in T \quad (11)
\end{aligned}$$

Las restricciones del modelo se representan a partir de las ecuaciones 12-24. Sobre la base de las operaciones que intervienen en las decisiones de localización e inventario de instalaciones de la cadena de suministro analizada, se proporciona una descripción detallada de la siguiente manera:

Restricciones de apertura de instalaciones

Las instalaciones pueden abrirse en múltiples lugares, con diferentes capacidades. Adicionalmente ser abastecidas por múltiples proveedores. No obstante, sólo podrá abrirse una instalación por ubicación, lo que se garantiza en las ecuaciones 12 y 13 para centros de acopio y biorefinerías respectivamente.

$$\sum_{b \in B} A_{jb} \leq 1 \quad \forall j \in J \quad (12)$$

$$\sum_{c \in C} P_{kc} \leq 1 \quad \forall k \in K \quad (13)$$

Restricciones de inventario

La pulpa y el mucílago se caracterizan por su rápida velocidad de descomposición, que no permite el almacenamiento a largo plazo. De acuerdo con Duarte (2017) tienen un tiempo límite de 72 horas para ser procesados. Por tanto, estas materias primas se envían a los centros de recolección solo para la consolidación de carga. A partir de ahí, se envían directamente a las biorefinerías. Por el contrario, los tallos se pueden almacenar para garantizar el flujo de material hacia las biorefinerías. El nivel de inventario de los tallos se calcula en la Ecuación 14.

$$IA_{wjb}t = \sum_{r \in T/rst} \sum_{i \in I} SA_{wijbr} - \sum_{r \in T/rst} \sum_{k \in K} \sum_{c \in C} AP_{wjbkcr} \quad (14)$$

$$\forall w \in W ; \forall b \in B ; \forall j \in J ; \forall t \in T$$

Restricciones de capacidad

Por otro lado, garantizar que la cantidad de residuo que llega a los centros de acopio no supere la capacidad seleccionada tanto de procesamiento como de almacenaje es la función de las ecuaciones 15 y 16 respectivamente. En el caso de la pulpa y el mucílago, como se mencionó por su rápida descomposición el parámetro cap_stoA_{wb} que corresponde a la capacidad de almacenaje es igual a cero, garantizando que se redireccione de inmediato a las biorrefinerías. Por otro lado, la ecuación 17 restringe la producción de bioetanol de acuerdo con la capacidad asignada de las biorrefinerías.

$$\sum_{i \in I} SA_{wijbt} \leq capA_{bw} A_{jb} \quad \forall w \in W; \forall b \in B; \forall j \in J; \forall t \in T \quad (15)$$

$$IA_{wjb} \leq cap_stoA_{wb} A_{jb} \quad \forall w \in W; \forall b \in B; \forall j \in J; \forall t \in T \quad (16)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{b \in B} \sum_{w \in W} AP_{wjbkct} \leq capP_c P_{kc} \quad \forall c \in C; \forall k \in K; \forall t \in T \quad (17)$$

Restricciones de flujo

La capacidad de los proveedores se considera en la ecuación 18. La continuidad de flujo a través de los centros de acopio se considera en las restricciones de inventario. A su vez, la ecuación 19 asegura que todo el residuo que llega a las biorrefinerías se convierte en bioetanol

y es enviado a las centrales de mezcla. Por último, la ecuación 20 permite calcular la demanda no satisfecha en función de la demanda de las centrales de mezcla y el bioetanol generado.

$$\sum_{j \in J} \sum_{b \in B} SA_{wijbt} \leq S_{iwt} \quad \forall w \in W; \forall i \in I; \forall t \in T \quad (18)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{b \in B} \sum_{w \in W} IC AP_{wjbkct} = \sum_{m \in M} PB_{kcmt} \quad \forall c \in C; \forall k \in K; \forall t \in T \quad (19)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{c \in C} PB_{kcmt} + UD_{mt} = D_{mt} \quad \forall m \in M; \forall t \in T \quad (20)$$

Finalmente, las ecuaciones 21 y 22 indican la naturaleza de las variables de decisión.

$$A_{jb}, P_{kc} \in (0,1) \quad (21)$$

$$IA_{wjb}, SA_{wijbt}, AP_{wjbkct}, PB_{kcmt}, UD_{mt} \geq 0 \quad (22)$$

5. CASO DE ESTUDIO

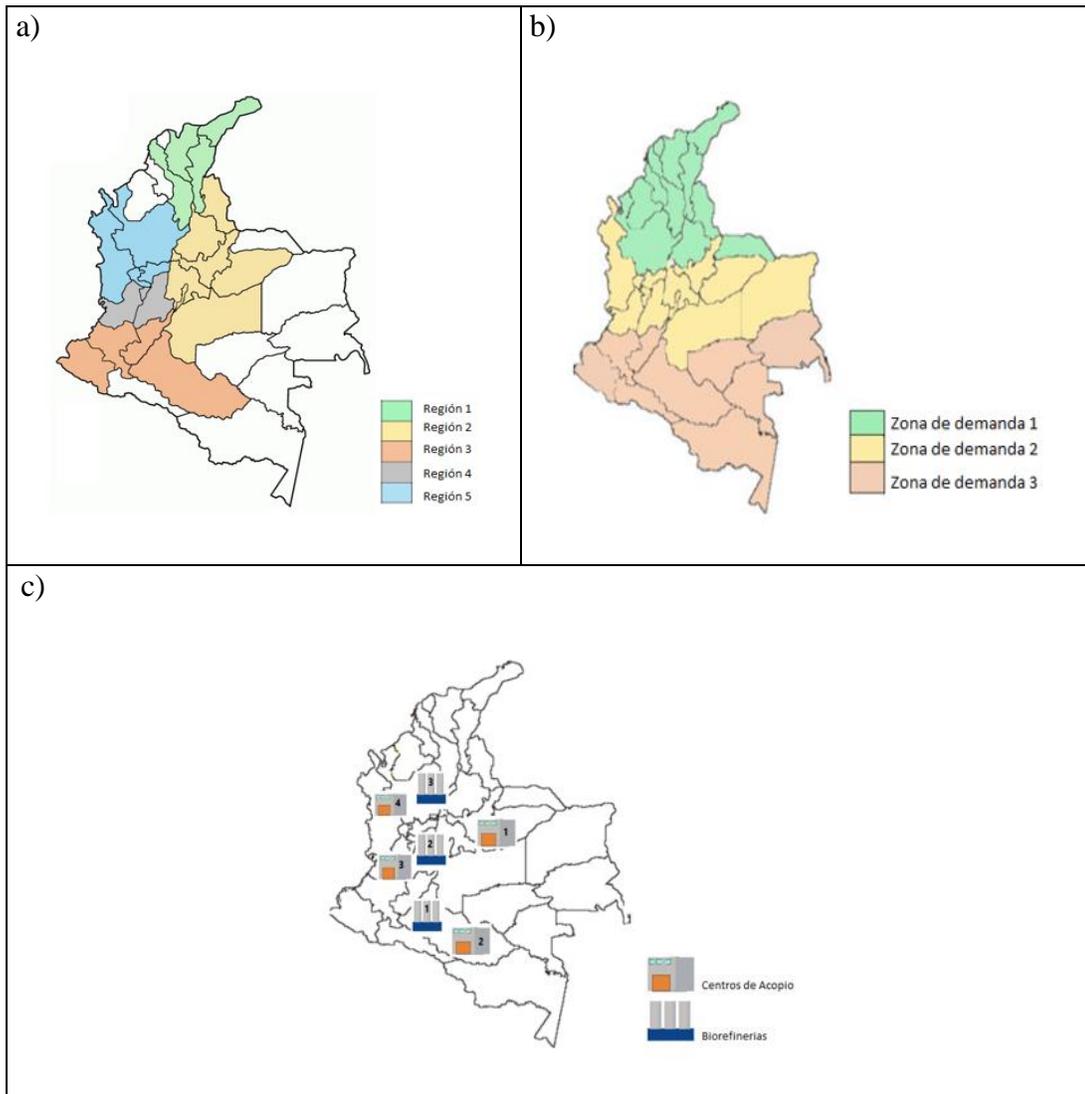
El modelo es aplicado en Colombia teniendo en cuenta que según la Organización Internacional del Café es el tercer país productor de café a nivel mundial después de Brasil y Vietnam, por tanto genera grandes cantidades de residuos que se pueden aprovechar para la producción de bioetanol y al mismo tiempo contribuir positivamente al medio ambiente (FNC, 2018a).

La zona cafetera colombiana la conforman 22 de los 32 departamentos del país. Teniendo en cuenta que el número de actores en la cadena define la complejidad computacional del problema. Para el diseño de la cadena de suministro se agruparon los departamentos en cinco regiones que serán los proveedores de la biomasa.

La disponibilidad de cada uno de los residuos se determina de acuerdo con las hectáreas cultivadas reportadas por la Federación Nacional de Cafeteros con corte a diciembre 2017, las temporadas de cosecha (ver sección 3.4 - Figura 11-a) y los factores de conversión contenidos en el Anexo 3.

Adicionalmente se seleccionan cuatro ubicaciones potenciales para la ubicación de los centros de acopio y tres para las biorefinerías (Figura 11-c). Finalmente, se consolida la demanda de bioetanol en tres zonas que corresponden al norte, centro y sur del país (Figura 11-b). La cantidad de bioetanol requerido se determina a partir de la demanda de combustible para cada uno de los meses de 2017, según reporte del ministerio de minas y energía multiplicada por el porcentaje de mezcla establecido para cada departamento.

Figura 11. Contexto Geográfico

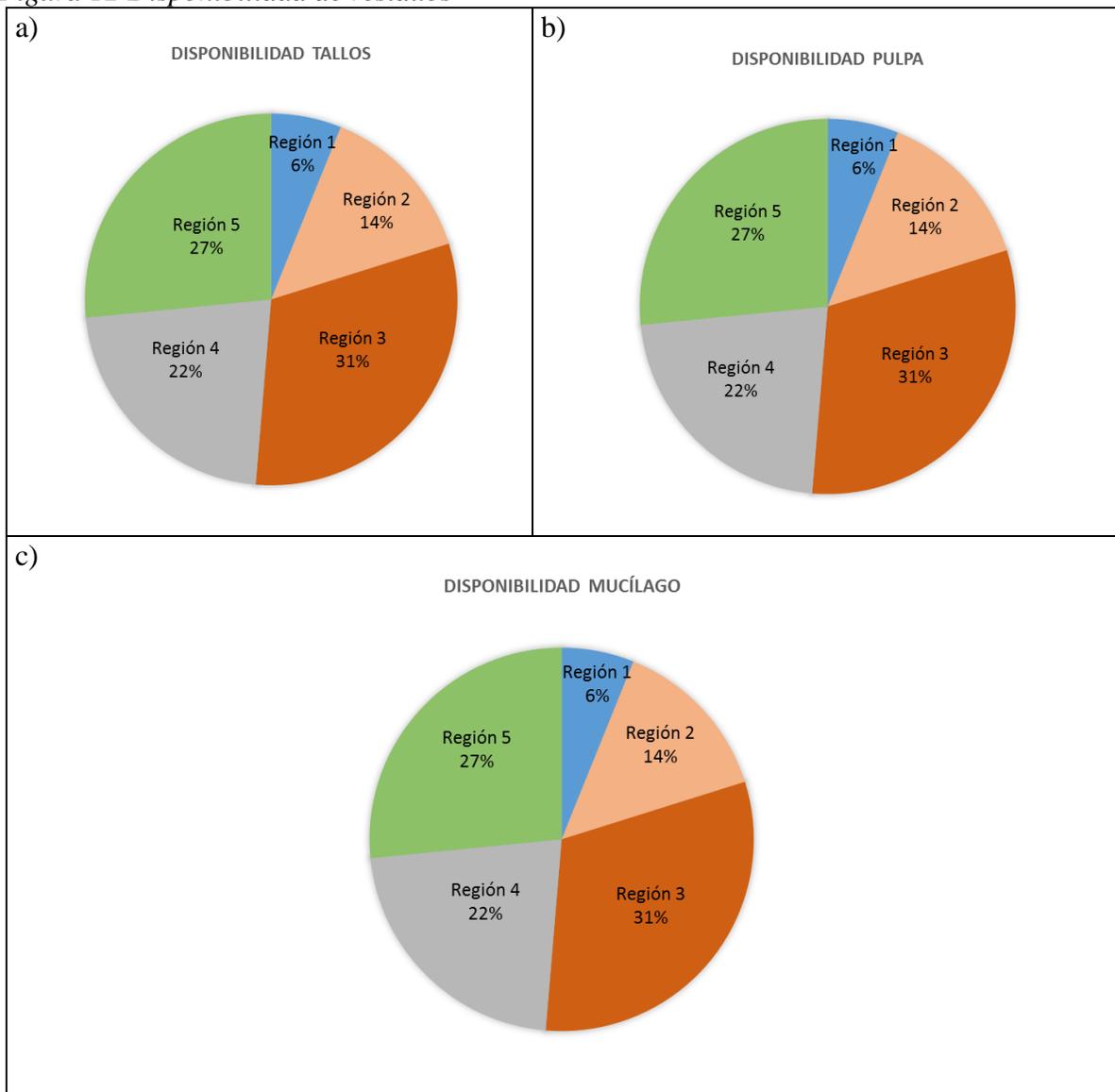


Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla 6 se presentan las regiones de suministro y sus respectivos departamentos, para cada una de ellas se muestran la disponibilidad de toneladas de cada residuo, los cuales se obtuvieron de acuerdo con los factores de conversión que se incluyen en el Anexo 3. Se evidencia que la región 3 cuenta con una disponibilidad superior para los 3 residuos puesto que el residuo 1 (tallos) tiene un equivalente de 184.419,57 toneladas, en el residuo 2 (pulpa)

cuenta con 656.008,11 toneladas y para el residuo 3(mucílago) tiene disponibilidad de 223.124,11 toneladas (ver Figura 12). En general el residuo que menor disponibilidad tiene para todas las regiones es el residuo 1 puesto que contiene un total de 591.451,89 toneladas y el residuo que mayor disponibilidad tiene es el 2 cuenta con un total de 2.103.883,191 toneladas.

Figura 12 Disponibilidad de residuos



Fuente: Elaboración Propia

Tabla 6. Disponibilidad residuos por región

Regiones proveedores		Disponibilidad de Tallos [t]	Disponibilidad de Pulpa [t]	Disponibilidad de Mucílago [t]
Región 1	Bolívar	36.086,890	128.366,487	43.660,523
	Cesar			
	La Guajira			
	Magdalena			
Región 2	Boyacá	83.062,188	295.464,674	100.494,628
	Cundinamarca			
	Casarane			
	Meta			
	Norte de Santander			
	Santander			
Región 3	Caquetá	184.419,574	656.008,114	223.124,106
	Cauca			
	Huila			
	Nariño			
Región 4	Quindío	130.709,868	464.954,625	158.142,229
	Tolima			
	Valle			
Región 5	Antioquia	157.173,374	559.089,290	190.159,688
	Caldas			
	Chocó			
	Risaralda			
Total		591.451,894	2.103.883,191	715.581,174

Fuente: Elaboración propia

Todos los parámetros de entrada como costos (apertura, fijos, variables, inventario, transporte, materia prima), capacidades (centros de acopio y biorefinerías), factores de conversión, suministro de biomasa y demanda de bioetanol se presentan en los Anexos 1, 2, 3, 4 y 5 respectivamente.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

El modelo se resuelve con GAMS 23.5, en una computadora con procesador Intel® Core™ i5-3317U, CPU @ 1.70 GHz y 8 GB de memoria RAM. Las características del modelo se observan en la figura 13, en donde un valor máximo del VPN de US\$174.904.129 se obtiene como solución final con un GAP de 5,72%.

En la Figura 13 se observa la configuración de la cadena de suministro, en donde se da apertura a tres centros de acopio potenciales, dos con capacidad media y uno con capacidad pequeña. Por otro lado, de las tres biorefinerías candidatas se seleccionan las alternativas 1 y 2 con capacidad media y pequeña respectivamente.

Figura 13. Características del modelo en GAMS del caso de estudio

```

General Algebraic Modeling System
Model Statistics      SOLVE Modelo_AperT1SinExp_Cier Using MIP From line 1697

MODEL STATISTICS

BLOCKS OF EQUATIONS      42      SINGLE EQUATIONS      12,012
BLOCKS OF VARIABLES      40      SINGLE VARIABLES      37,586
NON ZERO ELEMENTS      1,174,249      DISCRETE VARIABLES      921

GENERATION TIME      =      1.687 SECONDS      50 Mb      WIN235-235 Jul  2, 2010

EXECUTION TIME      =      1.687 SECONDS      50 Mb      WIN235-235 Jul  2, 2010

          S O L V E      S U M M A R Y

MODEL      Modelo_AperT1SinExp_Cier      OBJECTIVE      VAN
TYPE      MIP      DIRECTION      MAXIMIZE
SOLVER      CPLEX      FROM LINE      1697

**** SOLVER STATUS      1 Normal Completion
**** MODEL STATUS      8 Integer Solution
**** OBJECTIVE VALUE      174904129.0147

RESOURCE USAGE, LIMIT      36.826 100000000.000
ITERATION COUNT, LIMIT      36556 2000000000

IBM ILOG CPLEX      Jul  4, 2010 23.5.1 WIN 18414.18495 VS8 x86/MS Windows
Cplex 12.2.0.0, GAMS Link 34
GAMS/Cplex licensed for continuous and discrete problems.

Cplex MIP uses 1 of 4 parallel threads. Change default with option THREADS.
MIP status(102): integer optimal, tolerance
Fixed MIP status(1): optimal
Solution satisfies tolerances.

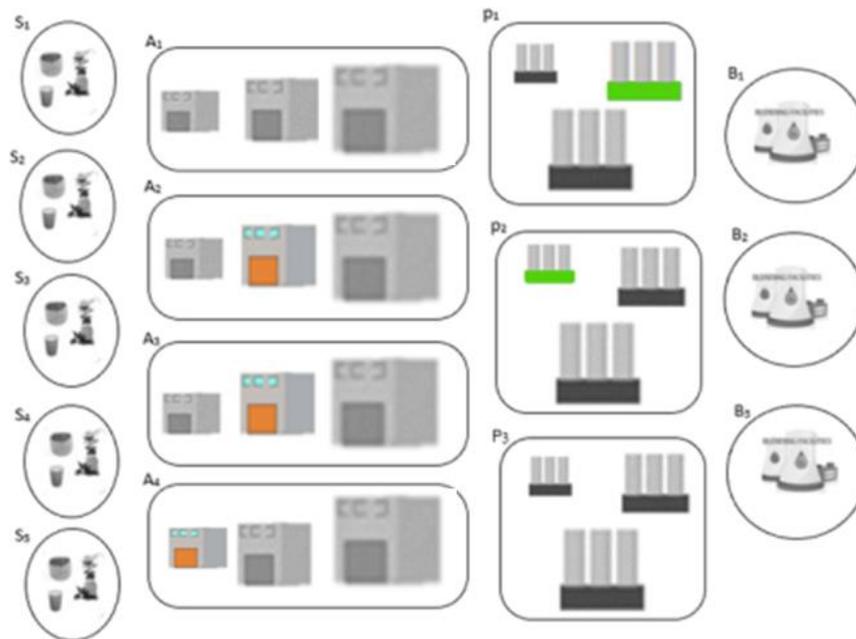
MIP Solution:      174904129.014739      (35411 iterations, 0 nodes)
Final Solve:      174904129.014739      (1145 iterations)

Best possible:      184904726.630544
Absolute gap:      10000597.615805
Relative gap:      0.057178

```

Fuente: Elaboración propia

Figura 14. Apertura de instalaciones



Fuente: Elaboración propia

La configuración de la cadena requiere una inversión inicial de US\$ \$ 49.874.192,66. La Tabla 7 resume los costos para cada uno de los centros de acopio y biorefinerías de acuerdo con su capacidad y ubicación.

Tabla 7. Inversión Aperturas

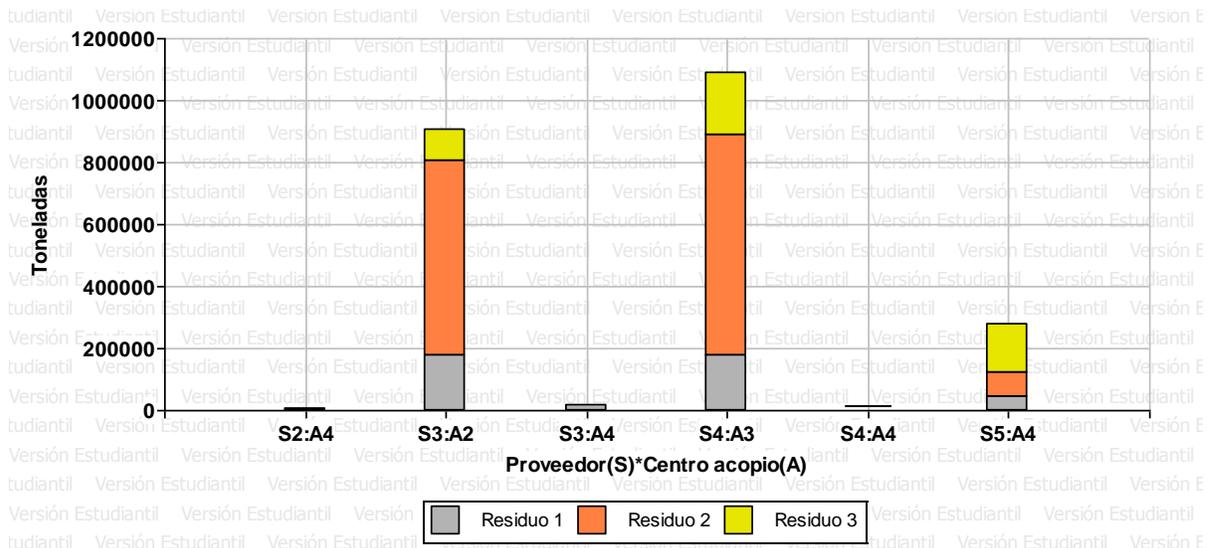
Decisión	Inversión (USD)
Apertura del centro de Acopio 2 (A_2) Capacidad: Media (2)	\$ 2.751.325,61
Apertura del centro de Acopio 3 (A_3) Capacidad: Media (2)	\$ 2.751.325,61
Apertura del centro de Acopio 4 (A_4) Capacidad: Pequeña (1)	\$ 1.505.731,27
Apertura de la Biorefinería 1 (P_1) Capacidad: Media (2)	\$ 27.513.256,09
Apertura de la Biorefinería 2 (P_2) Capacidad: Pequeña (1)	\$ 15.352.554,08
Inversión Total	\$ 49.874.192,66

Fuente: Elaboración Propia

El flujo desde los proveedores a los centros de acopio se presenta en la Figura 15, en donde se evidencia que los proveedores 3, 4 y 5 suministran de los tres tipos de residuos a los centros de acopio 2, 3 y 4 respectivamente. A su vez, el proveedor 2 solo envía tallos de café (residuo 1) al centro de acopio 4. Por otro lado, el proveedor 1 no se utiliza como fuente de abastecimiento.

Es importante resaltar que los centros de acopio almacenan únicamente el residuo 1. En el caso del residuo 2 y 3, su transporte a los centros de acopio sólo permite la consolidación de carga para el envío a las biorefinerías.

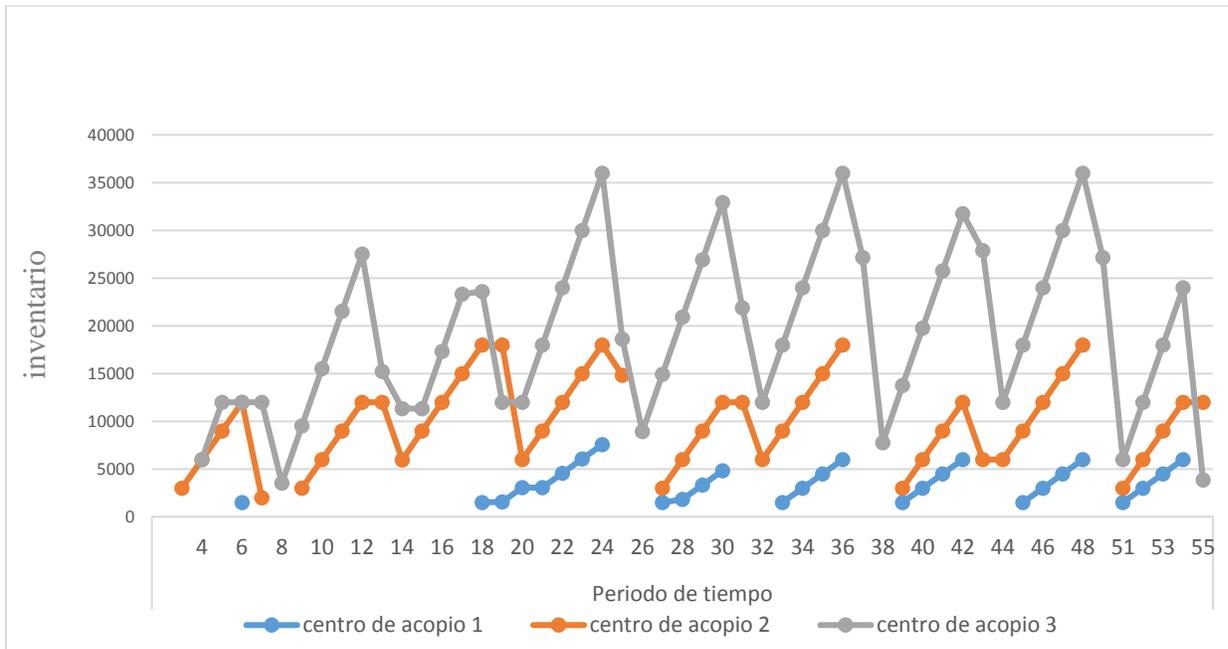
Figura 15. Flujo de proveedores a centros de Acopio



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 16 se observa la cantidad de inventario de los tallos de café a lo largo del periodo de planificación. Se evidencia que el Centro de acopio 1 es el que menor utilización presenta puesto que de 60 periodos de tiempo, sólo 28 periodos está en uso el almacén. Por otro lado, el Centro de acopio que más inventario almacena es el Centro de acopio 3 puesto que su funcionamiento inicia desde el periodo 4 y continua hasta el periodo 55 con ninguna interrupción.

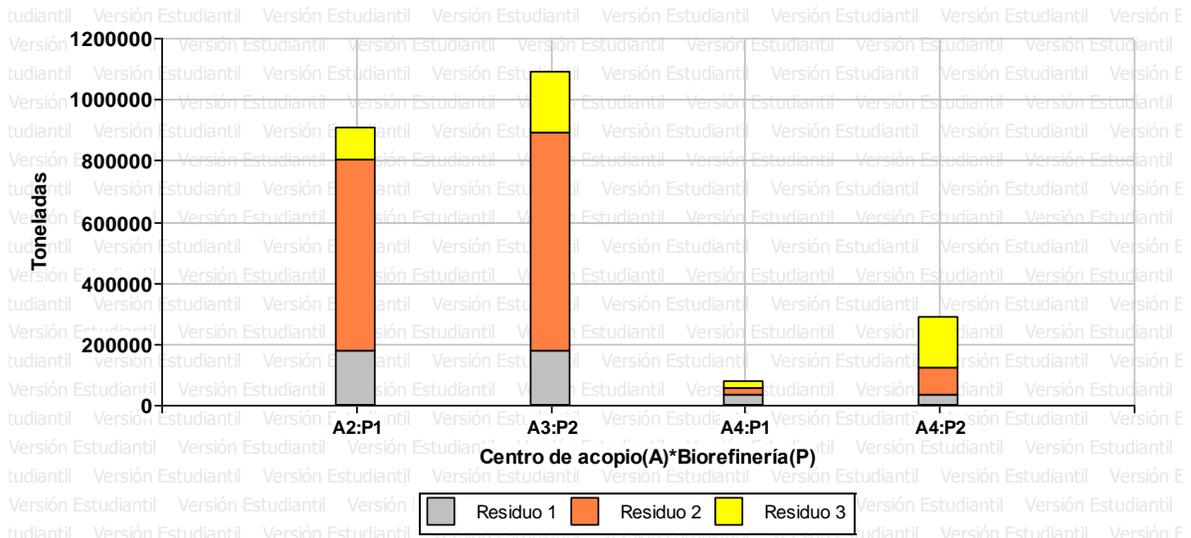
Figura 16.. Inventarios Centros de Acopio



Fuente: Elaboración Propia

Con relación al flujo de los centros de acopio a las biorefinerías, se observa en la Figura 17, que los centros de acopio 2 y 4 abastecen de los tres tipos de residuos a la biorefinería 1. A su vez los centros de acopio 3 y 4 suministran la biomasa requerida por la biorefinería 2. Pese a que el centro de acopio 4 provee residuos a las dos biorefinerías, es el centro de acopio 3 es el que mayor cantidad de residuos distribuye.

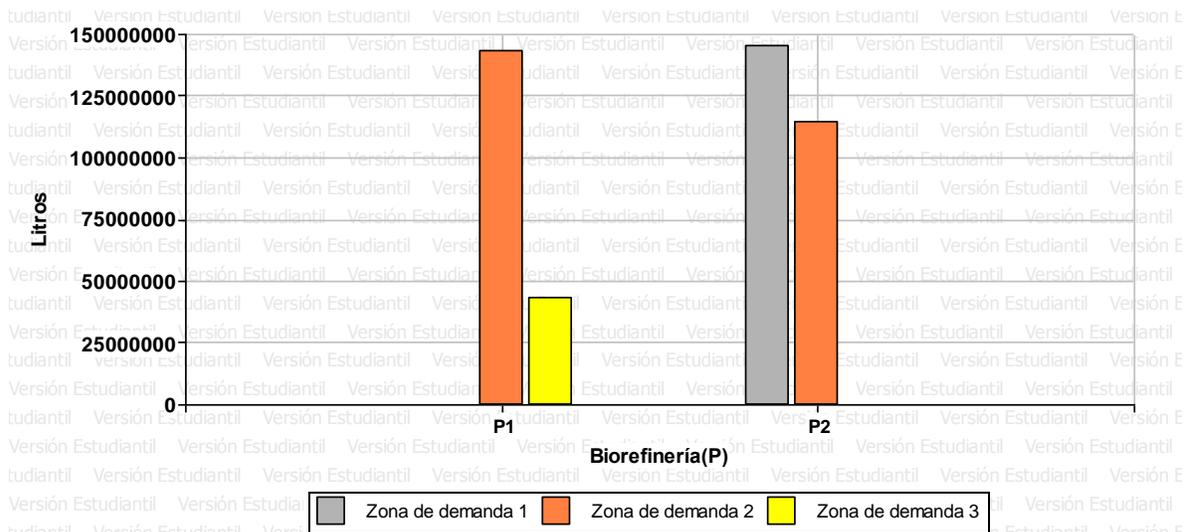
Figura 17.. Flujo de Centros de Acopio a Biorefinerías



Fuente: Elaboración propia

Finalmente, la Figura 18 presenta el flujo de las biorefinerías hacia las zonas de demanda, en donde de acuerdo con las regulaciones gubernamentales se mezcla la gasolina con el bioetanol producido.

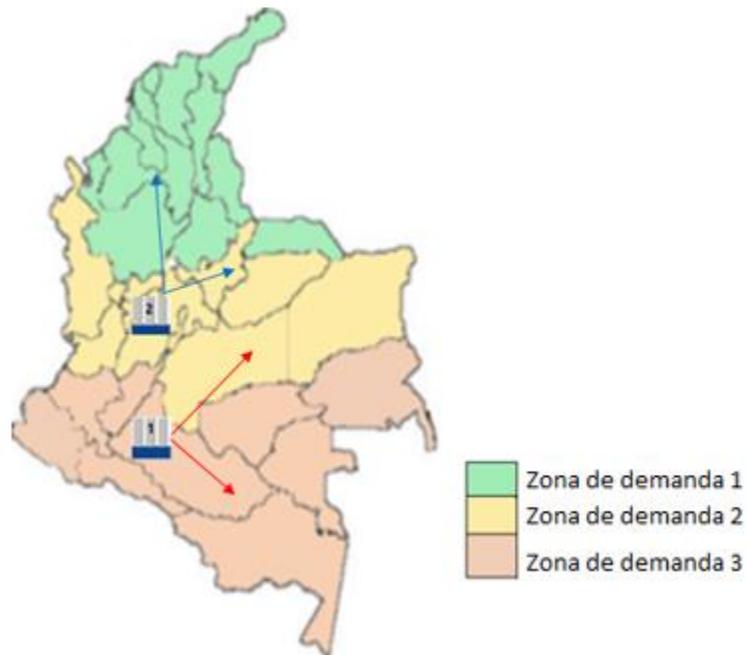
Figura 188. Flujo de Biorefinerías a centrales de mezcla



Fuente: Elaboración propia

La biorefinería 1 abastece a las zonas de demanda 2 y 3. A su vez, la biorefinería 2 envía el biocombustible a las zonas 1 y 2. Se observa que es necesario que las dos biorefinerías suministren bioetanol a la zona 2 (Ver Figura 19), debido a que concentra el 55,32% de la demanda. Por otro lado, la solución que genera el modelo satisface el 96.46% de la demanda. Con una utilización de biomasa del 13,86% del total disponible, lo que indica que se cuenta con materia prima para satisfacer un aumento de la demanda, acorde a las proyecciones de incremento del porcentaje de mezcla establecido con el fin de disminuir progresivamente las emisiones de CO2 generadas por uso de combustibles fósiles (ver Tabla 8).

Figura 199. Flujo de Biorefinerías a centrales de mezcla



Fuente: Elaboración propia

Tabla 8 Suministro no utilizado

Residuo	Suministro utilizado	Suministro no utilizado
1	422.329,76	2.534.929,71
2	1.444.906,21	9.074.509,74
3	495.878,72	3.082.027,15
Total	2.363.114,69	14.691.466,6

Fuente: Elaboración Propia

6. CONCLUSIONES

La producción de biocombustibles como alternativa a la crisis energética y ambiental plantea serios desafíos con relación a la estructura de su cadena de suministro. De acuerdo con esto, se desarrolla un modelo matemático que permite el diseño de una cadena de suministro de biocombustible que integra decisiones estratégicas como localización de instalaciones con capacidad variable y decisiones tácticas como lo es el inventario, en un escenario multiperiodo, multiproducto.

Un modelo de Programación Lineal Entera Mixta determina la capacidad y ubicación de centros de acopio y biorefinerías, además de los flujos a lo largo de la cadena, en busca de la maximización del valor presente neto (VPN) del sistema.

La región cafetera de Colombia se utiliza como caso de estudio, considerando los residuos de café (tallos, pulpa, mucílago) como biomasa para la producción de bioetanol. El modelo se resuelve con GAMS 23.5 y se obtiene un valor máximo del VPN de US\$ 174.904.129, con una configuración de cadena de tres centros de acopio dos con capacidad media y una con capacidad mínima y dos biorefinerías, una de estas con capacidad pequeña y la otra con capacidad media. Configuración que requiere una inversión inicial de US\$ \$ 49.874.192,66

La solución que genera el modelo requiere solo del 13,86% del total de biomasa disponible para satisfacer el 96,46% de la demanda. Lo que indica que se cuenta con materia prima para satisfacer un incremento en la demanda relacionado con la variación del porcentaje de mezcla establecido entre el bioetanol y el combustible fósil.

Como futuras investigaciones se sugiere desarrollar metodologías de solución que permitan evaluar escenarios de mayores instancias, adicionalmente incorporar decisiones como el ruteo de vehículos que permitan optimizar el eslabón de recolección.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahmadi-Javid, A., & Seddighi, A. H. (2012). A location-routing-inventory model for designing multisource distribution networks. *Engineering Optimization*, 44(6), 637–656. <https://doi.org/10.1080/0305215X.2011.600756>
- Ahmazadeh, E., & Vahdani, B. (2017). A location-inventory-pricing model in a closed loop supply chain network with correlated demands and shortages under a periodic review system. *Computers & Chemical Engineering*, 101, 148–166. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2017.02.027>
- Akgul, O., Shah, N., & Papageorgiou, L. G. (2012). Economic optimisation of a UK advanced biofuel supply chain. *Biomass and Bioenergy*, 41, 57–72. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.01.040>
- B. Field, C., R. Barros, V., Jon Dokken, D., J. Mach, K., & D. Mastrandrea, M. (2014). Cambio Climático 2014. *Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. Recuperado a partir de https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg2/ar5_wgII_spm_es.pdf
- Bairamzadeh, S., Pishvae, M. S., & Saidi-Mehrabad, M. (2016). Multiobjective Robust Possibilistic Programming Approach to Sustainable Bioethanol Supply Chain Design under Multiple Uncertainties. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 55(1). <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.5b02875>
- Barbosa-Póvoa, A. P. (2012). Progresses and challenges in process industry supply chains optimization. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 1(4), 446–452. <https://doi.org/10.1016/j.coche.2012.09.006>
- Biajoli, F. L., Chaves, A. A., Antonio, L., & Lorena, N. (2019). A biased random-key genetic algorithm for the two-stage capacitated facility location problem, 115, 418–426. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2018.08.024>
- Boloori Arabani, A., & Farahani, R. Z. (2012). Facility location dynamics: An overview of classifications and applications. *Computers and Industrial Engineering*, 62(1), 408–420. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2011.09.018>
- Castillo Duarte, A. (2017). *Análisis Técnico Y Económico Para El Diseño Preliminar De 3 Plantas De Producción De Biocombustibles A Partir De Residuos De Café*.
- Cavallaro, C. M., Pearce, J. M., & Sidortsov, R. (2018). Decarbonizing the boardroom? Aligning electric utility executive compensation with climate change incentives. *Energy Research and Social Science*, 37(September 2017), 153–162. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2017.09.036>
- Cenicafé. (2016). Manejo de Subproductos. Recuperado a partir de https://www.cenicafe.org/es/index.php/cultivemos_cafe/manejo_de_subproductos
- Chen, C. W., & Fan, Y. (2012). Bioethanol supply chain system planning under supply and demand uncertainties. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 48(1), 150–164. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2011.08.004>

- Chen, L., Olhager, J., & Tang, O. (2014). Manufacturing facility location and sustainability: A literature review and research agenda. *International Journal of Production Economics*, 149, 154–163. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2013.05.013>
- Choi, I. S., Wi, S. G., Kim, S. B., & Bae, H. J. (2012). Conversion of coffee residue waste into bioethanol with using popping pretreatment. *Bioresource Technology*, 125, 132–137. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.08.080>
- Darvish, M., & Coelho, L. C. (2018). Sequential versus integrated optimization: Production, location, inventory control, and distribution. *European Journal of Operational Research*, 268(1), 203–214. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.01.028>
- Deng, S., Li, Y., Guo, H., & Liu, B. (2016). Solving a Closed-Loop Location-Inventory-Routing Problem with Mixed Quality Defects Returns in E-Commerce by Hybrid Ant Colony Optimization Algorithm. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2016. <https://doi.org/10.1155/2016/6467812>
- Diabat, A., Battaïa, O., & Nazzal, D. (2015). An improved Lagrangian relaxation-based heuristic for a joint location-inventory problem. *Computers and Operations Research*, 61, 170–178. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2014.03.006>
- Duan, L., & Ventura, J. A. (2018). A Dynamic Supplier Selection and Inventory Management Model for a Serial Supply Chain with a Novel Supplier Price Break Scheme and Flexible Time Periods. *European Journal of Operational Research*, 272(3), 979–998. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.07.031>
- Ekşioğlu, S. D., Acharya, A., Leightley, L. E., & Arora, S. (2009). Analyzing the design and management of biomass-to-biorefinery supply chain. *Computers & Industrial Engineering*, 57(4), 1342–1352. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2009.07.003>
- Feng, X., Moon, I., & Ryu, K. (2017). Warehouse capacity sharing via transshipment for an integrated two-echelon supply chain. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 104, 17–35. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2017.04.014>
- Fernandes, D. R. M., Rocha, C., Aloise, D., Ribeiro, G. M., Santos, E. M., & Silva, A. (2014). A simple and effective genetic algorithm for the two-stage capacitated facility location problem. *Computers and Industrial Engineering*, 75(1), 200–208. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2014.05.023>
- FNC. (2018a). Café y Medio Ambiente. Recuperado a partir de http://www.cafedecolombia.com/particulares/es/sobre_el_cafe/mucho_mas_que_una_bebida/cafey_medio_ambiente/
- FNC. (2018b). Nuestras Regiones cafeteras. Recuperado a partir de http://www.cafedecolombia.com/particulares/es/la_tierra_del_cafe/regiones_cafeteras/
- Garcia, D. J., & You, F. (2015). Supply chain design and optimization: Challenges and opportunities. *Computers and Chemical Engineering*, 81, 153–170. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2015.03.015>
- Ghahremani-Nahr, J., Kian, R., & Sabet, E. (2019). A robust fuzzy mathematical programming model for the closed-loop supply chain network design and a whale optimization solution algorithm. *Expert Systems with Applications*, 116, 454–471.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.eswa.2018.09.027>

- Ghorbani, A., & Akbari Jokar, M. R. (2016). A hybrid imperialist competitive-simulated annealing algorithm for a multisource multi-product location-routing-inventory problem. *Computers and Industrial Engineering*, *101*, 116–127. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2016.08.027>
- González-González, L. M., Correa, D. F., Ryan, S., Jensen, P. D., Pratt, S., & Schenk, P. M. (2018). Integrated biodiesel and biogas production from microalgae: Towards a sustainable closed loop through nutrient recycling. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *82*(September 2017), 1137–1148. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.091>
- Guerrero, W. J., Prodhon, C., Velasco, N., & Amaya, C. A. (2015). A relax-and-price heuristic for the inventory-location-routing problem. *International Transactions in Operational Research*, *22*(1), 129–148. <https://doi.org/10.1111/itor.12091>
- Gunasekaran, A., Patel, C., & McGaughey, R. E. (2004). A framework for supply chain performance measurement. *International Journal of Production Economics*, *87*(3), 333–347. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2003.08.003>
- Hammami, R., Frein, Y., & Bahli, B. (2017). Supply chain design to guarantee quoted lead time and inventory replenishment: model and insights. *International Journal of Production Research*, *55*(12). <https://doi.org/10.1080/00207543.2016.1242799>
- He-Lambert, L., English, B. C., Lambert, D. M., Shylo, O., Larson, J. A., Yu, T. E., & Wilson, B. (2018). Determining a geographic high resolution supply chain network for a large scale biofuel industry. *Applied Energy*, *218*(February), 266–281. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.02.162>
- Hiassat, A., Diabat, A., & Rahwan, I. (2017). A genetic algorithm approach for location-inventory-routing problem with perishable products. *Journal of Manufacturing Systems*, *42*, 93–103. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2016.10.004>
- ICO. (2018). Informe del mercado de café - mayo, 3. Recuperado a partir de <http://www.ico.org/documents/cy2017-18/cmr-0518-c.pdf>
- Isikgor, F. H., & Becer, C. R. (2015). Lignocellulosic biomass: a sustainable platform for the production of bio-based chemicals and polymers. *Polym. Chem.*, *6*(25), 4497–4559. <https://doi.org/10.1039/C5PY00263J>
- Jerbia, R., Boujelben, M. K., Sehli, M. A., & Jemai, Z. (2018). A stochastic closed-loop supply chain network design problem with multiple recovery options. *Computers & Industrial Engineering*, *118*(June 2017), 23–32. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.02.011>
- Kim, H. M., Choi, Y. S., Lee, D. S., Kim, Y. H., & Bae, H. J. (2017). Production of bio-sugar and bioethanol from coffee residue (CR) by acid-chlorite pretreatment. *Bioresource Technology*, *236*, 194–201. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.03.143>
- Lerhlaly, S., Lebbar, M., Allaoui, H., Afifi, S., & Ouazar, D. (2017). An inventory location routing model with environmental considerations. *MATEC Web of Conferences*, *00002*, 0–3. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201710500002>
- Lin, T., Rodríguez, L. F., Shastri, Y. N., Hansen, A. C., & Ting, K. C. (2014). Integrated strategic and tactical biomass-biofuel supply chain optimization. *Bioresource Technology*, *156*, 256–266.

<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.12.121>

- Liu, B., Chen, H., Li, Y., & Liu, X. (2015). A pseudo-parallel genetic algorithm integrating simulated annealing for stochastic location-inventory-routing problem with consideration of returns in e-commerce. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2015. <https://doi.org/10.1155/2015/586581>
- Melo, M. T., Nickel, S., & Saldanha-da-Gama, F. (2009). Facility location and supply chain management - A review. *European Journal of Operational Research*, 196(2), 401–412. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2008.05.007>
- Mirhashemi, M. S., Mohseni, S., Hasanzadeh, M., & Pishvaei, M. S. (2018). Moringa oleifera biomass-to-biodiesel supply chain design: An opportunity to combat desertification in Iran. *Journal of Cleaner Production*, 203, 313–327. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.257>
- Moradi Nasab, N., & Amin-Naseri, M. R. (2016). Designing an integrated model for a multi-period, multi-echelon and multi-product petroleum supply chain. *Energy*, 114, 708–733. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.07.140>
- Morales-Chávez, M. M., Sarache, W., & Costa, Y. (2018). Towards a comprehensive model of a biofuel supply chain optimization from coffee crop residues. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 116(June), 136–162. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2018.06.001>
- Nekooghadirli, N., Tavakkoli-Moghaddam, R., Ghezavati, V. R., & Javanmard, S. (2014). Solving a new bi-objective location-routing-inventory problem in a distribution network by meta-heuristics. *Computers & Industrial Engineering*, 76(1), 204–221. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2014.08.004>
- Ng, R. T. L., Kurniawan, D., Wang, H., Mariska, B., Wu, W., & Maravelias, C. T. (2018). Integrated framework for designing spatially explicit biofuel supply chains. *Applied Energy*, 216(January), 116–131. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.02.077>
- Ng, R. T. L., & Maravelias, C. T. (2016). Design of Cellulosic Ethanol Supply Chains with Regional Depots. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 55(12). <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.5b03677>
- Nguyen, Q. A., Yang, J., & Bae, H. J. (2017). Bioethanol production from individual and mixed agricultural biomass residues. *Industrial Crops and Products*, 95, 718–725. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.11.040>
- Persson, T., Garcia y Garcia, A., Paz, J., Jones, J., & Hoogenboom, G. (2009). Maize ethanol feedstock production and net energy value as affected by climate variability and crop management practices. *Agricultural Systems*, 100(1–3), 11–21. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2008.11.004>
- Pourhejazy, P., & Kwon, O. (2016). The New Generation of Operations Research Methods in Supply Chain Optimization: A Review. *Sustainability*, 8(10), 1033. <https://doi.org/10.3390/su8101033>
- Quddus, M. A., Chowdhury, S., Marufuzzaman, M., Yu, F., & Bian, L. (2018). A two-stage chance-constrained stochastic programming model for a bio-fuel supply chain network. *International Journal of Production Economics*, 195(September 2017), 27–44. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2017.09.019>

- Rahimi, V., Karimi, K., Shafiei, M., Naghavi, R., Khoshnevisan, B., Ghanavati, H., ... Tabatabaei, M. (2018). Well-to-wheel life cycle assessment of Eruca Sativa-based biorefinery. *Renewable Energy*, *117*, 135–149. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.10.035>
- ReVelle, D. O. (2005). Recent advances in bolide entry modeling: A bolide potpourri. *Earth, Moon and Planets*, *97*(1–2), 1–35. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2003.11.032>
- Rodríguez Valencia, N., & Zambrano Franco, D. (2010). Los subproductos del café: fuente de energía renovable. *Avances Técnicos Cenicafé*, (3), 8. <https://doi.org/ISSN-0120-0178>
- Ross, A., Khajehnezhad, M., Otieno, W., & Aydas, O. (2017). Integrated location-inventory modelling under forward and reverse product flows in the used merchandise retail sector: A multi-echelon formulation. *European Journal of Operational Research*, *259*(2), 664–676. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.10.036>
- Russell, R. A. (2017). Mathematical programming heuristics for the production routing problem. *International Journal of Production Economics*, *193*(December 2016), 40–49. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2017.06.033>
- Shariff, S. S. R., Omar, M., & Moin, N. H. (2016). Location routing inventory problem with transshipment points using p-center. *ICIMSA 2016 - 2016 3rd International Conference on Industrial Engineering, Management Science and Applications*. <https://doi.org/10.1109/ICIMSA.2016.7504016>
- Shen, M. S. D. R. C.-J. M. (2002). An Inventory-Location Model : Formulation , Solution. *Annals of Operations Research*, 83–106. Recuperado a partir de <https://link-springer-com.ezproxy.unal.edu.co/article/10.1023%2FA%3A1020763400324>
- Tang, J., Ji, S., & Jiang, L. (2016). The design of a sustainable location-routing-inventory model considering consumer environmental behavior. *Sustainability (Switzerland)*, *8*(3). <https://doi.org/10.3390/su8030211>
- Toogood, H. S., & Scrutton, N. S. (2018). Retooling microorganisms for the fermentative production of alcohols. *Current Opinion in Biotechnology*, *50*, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2017.08.010>
- Vahdani, B., Soltani, M., Yazdani, M., & Meysam Mousavi, S. (2017). A three level joint location-inventory problem with correlated demand, shortages and periodic review system: Robust meta-heuristics. *Computers & Industrial Engineering*, *109*, 113–129. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2017.04.041>
- Vanajakumari, M., Kumar, S., & Gupta, S. (2016). An integrated logistic model for predictable disasters. *Production and Operations Management*, *25*(5), 791–811. <https://doi.org/10.1111/poms.12533>
- Xu, K., Lv, B., Huo, Y. X., & Li, C. (2018). Toward the lowest energy consumption and emission in biofuel production: combination of ideal reactors and robust hosts. *Current Opinion in Biotechnology*, *50*, 19–24. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2017.08.011>
- You, F., Tao, L., Graziano, D. J., & Snyder, S. W. (2012). Optimal design of sustainable cellulosic biofuel supply chains: Multiobjective optimization coupled with life cycle assessment and input-output analysis. *AIChE Journal*, *58*(4). <https://doi.org/10.1002/aic.12637>

- Yuchi, Q., He, Z., Yang, Z., & Wang, N. (2016). A Location-Inventory-Routing Problem in Forward and Reverse Logistics Network Design. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2016. <https://doi.org/10.1155/2016/3475369>
- Zhalechian, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., Zahiri, B., & Mohammadi, M. (2016). Sustainable design of a closed-loop location-routing-inventory supply chain network under mixed uncertainty. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 89, 182–214. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2016.02.011>

ANEXOS

Anexo 1. Costos

<u>Centro de acopio (j)</u>	Costo de Apertura de Centros de acopio para el periodo de tiempo 1 [USD]		
	Capacidad Pequeña	Capacidad Mediana	Capacidad Grande
Centro de acopio 1	\$ 1.550.017,48	\$ 2.777.780,66	\$ 4.916.871,29
Centro de acopio 2	\$ 1.535.255,41	\$ 2.751.325,61	\$ 4.870.043,95
Centro de acopio 3	\$ 1.535.255,41	\$ 2.751.325,61	\$ 4.870.043,95
Centro de acopio 4	\$ 1.505.731,27	\$ 2.698.415,50	\$ 4.776.389,26

Fuente: Elaboración propia

<u>Biorefinerías (k)</u>	Costo de Apertura de Biorefinerías para el periodo de tiempo 1 [USD]		
	Capacidad Pequeña	Capacidad Mediana	Capacidad Grande
Biorefinería 1	\$ 15.352.554,08	\$ 27.513.256,09	\$ 48.700.439,47
Biorefinería 2	\$ 15.352.554,08	\$ 27.513.256,09	\$ 48.700.439,47
Biorefinería 3	\$ 15.057.312,66	\$ 26.984.155,01	\$ 47.763.892,56

Fuente: (Castillo Duarte, 2017)

<u>Centro de acopio (j)</u>	Costos fijos de Centros de acopio para el periodo de tiempo 1 [USD]		
	Capacidad Pequeña	Capacidad Mediana	Capacidad Grande
Centro de acopio 1	\$ 13.962,98	\$ 23.034,07	\$ 39.426,79
Centro de acopio 2	\$ 13.830,00	\$ 22.814,70	\$ 39.051,30
Centro de acopio 3	\$ 13.830,00	\$ 22.814,70	\$ 39.051,30
Centro de acopio 4	\$ 13.564,04	\$ 22.375,96	\$ 38.300,31

Fuente: Elaboración propia

<u>Biorefinerías (k)</u>	Costos fijos de Biorefinerías para el periodo de tiempo 1 [USD]		
	Capacidad Pequeña	Capacidad Mediana	Capacidad Grande
Biorefinería 1	\$ 138.299,97	\$ 228.147,00	\$ 390.512,99
Biorefinería 2	\$ 138.299,97	\$ 228.147,00	\$ 390.512,99
Biorefinería 3	\$ 135.640,35	\$ 223.759,56	\$ 383.003,13

Fuente: (Castillo Duarte, 2017)

<u>Centro de acopio (j)</u>	Costos variables de Centros de acopio para el periodo de tiempo 1 [USD/ton]		
Centro de acopio 1	\$ 1,2412	\$ 1,2841	\$ 1,3430
Centro de acopio 2	\$ 1,2294	\$ 1,2719	\$ 1,3302
Centro de acopio 3	\$ 1,2294	\$ 1,2719	\$ 1,3302
Centro de acopio 4	\$ 1,2057	\$ 1,2474	\$ 1,3046

Fuente: Elaboración propia

<u>Biorefinerías (k)</u>	Costos variables de Biorefinerías para el periodo de tiempo 1 [USD/ton]		
	Capacidad Pequeña	Capacidad Mediana	Capacidad Grande
Biorefinería 1	12,29	12,72	13,30
Biorefinería 2	12,29	12,72	13,30
Biorefinería 3	12,06	12,47	13,05

Fuente: (Castillo Duarte, 2017)

<u>Centro de acopio (j)</u>	Costos de inventario en Centros de acopio para el periodo de tiempo 1 [USD/ton]		
Centro de acopio 1	1,2412	1,2841	1,3430
Centro de acopio 2	1,2294	1,2719	1,3302
Centro de acopio 3	1,2294	1,2719	1,3302
Centro de acopio 4	1,2057	1,2474	1,3046

Fuente: Elaboración propia

<u>Proveedor (i)</u>	Costos de transporte desde proveedores hasta centros de acopio para el periodo de tiempo 1 [USD/ton]			
	Centro de acopio 1	Centro de acopio 2	Centro de acopio 3	Centro de acopio 4
Proveedor 1	108,76	114,55	108,78	94,04
Proveedor 2	0,00	64,54	67,56	78,08
Proveedor 3	69,40	0,00	36,62	59,92
Proveedor 4	67,96	36,62	0,00	42,94
Proveedor 5	78,38	59,92	42,94	0,00

Fuente: Ministerio de transporte

<u>Centro de acopio (j)</u>	Costos de transporte desde centros de acopio hasta biorefinerías para el periodo de tiempo 1 [USD/ton]		
	Biorefinería 1	Biorefinería 2	Biorefinería 3
Centro de acopio 1	30,654	31,942	38,129
Centro de acopio 2	0,000	17,047	29,593
Centro de acopio 3	17,047	0,000	19,786
Centro de acopio 4	29,593	19,786	0,000

Fuente: Ministerio de transporte

<u>Biorefinerías (k)</u>	Costos de transporte desde biorefinerías hasta centrales de mezcla para el periodo de tiempo 1 [USD/litro]		
	Central de mezcla 1: Región Norte	Central de mezcla 2: Región Centro	Central de mezcla 3: Región Sur
Biorefinería 1	0,0763	0,0357	0,0248
Biorefinería 2	0,0613	0,0317	0,0417
Biorefinería 3	0,0457	0,0321	0,0556

Fuente: Ministerio de transporte

Precio de Residuos el periodo de tiempo 1 [USD/T]

Residuo 1: Tallos de café	Residuo 2: Pulpa	Residuo 3: Mucílago
6,078	3,8	3,8

Fuente: (Castillo Duarte, 2017)

Anexo 2 Capacidades

No. (B) Capacidad máxima de almacenaje en un centro de acopio [ton]

	Residuo 1: Tallos	Residuo 2: Pulpa	Residuo 3: Mucílago
Capacidad pequeña	9.000,00	0,00	0,00
Capacidad mediana	18.000,00	0,00	0,00
Capacidad grande	36.000,00	0,00	0,00

Fuente: Elaboración propia

<u>No. (B)</u>	Capacidad máxima de recibo y procesamiento en un centro de acopio [ton/mes]		
	Residuo 1: Tallos	Residuo 2: Pulpa	Residuo 3: Mucílago
Capacidad pequeña	1.500,00	8.900,00	3.000,00
Capacidad mediana	3.000,00	17.800,00	6.000,00
Capacidad grande	6.000,00	35.600,00	12.000,00

Fuente: Elaboración propia

<u>No. (C)</u>	Capacidad máxima de procesamiento en una biorefinería [ton/mes]
1	26.271,48
2	52.542,96
3	105.085,93

Fuente: (Castillo Duarte, 2017)

Anexo 3. Factores de Conversión

Índice de conversión Residuo a Bioetanol [litro etanol/tonelada de residuo]	
IC	188,719898606

Fuente: (Castillo Duarte, 2017)

	ZOCA	PULPA	MUCÍLAGO
Factor Disponibilidad Materia Prima (toneladas/hectárea-año)	3.2	2.258	0.768
Factor de Rendimiento a Etanol (litros/tonelada de residuo)	291.13924	25	40
Factor de Renovación	0.2		

Fuente: Federación Nacional de Cafeteros

Anexo 4 Suministro de biomasa

Proveedor (i)	Suministro de residuos disponible de cada proveedor en el primer año [ton]								
	Enero			Febrero			Marzo		
	Residuo 1: Tallos	Residuo 2: Pulpa	Residuo3: Mucílago	Residuo 1: Tallos	Residuo 2: Pulpa	Residuo3: Mucílago	Residuo 1: Tallos	Residuo 2: Pulpa	Residuo3: Mucílago
Proveedor 1	4.510,86	0,00	0,00	4.510,86	0,00	0,00	4.510,86	0,00	0,00
Proveedor 2	15.013,84	0,00	0,00	15.013,84	0,00	0,00	9.034,26	10.635,13	3.617,26
Proveedor 3	42.700,33	0,00	0,00	42.700,33	0,00	0,00	329,76	91.765,55	31.211,67
Proveedor 4	32.677,47	0,00	0,00	32.677,47	0,00	0,00	0,00	58.119,33	19.767,78
Proveedor 5	26.195,56	0,00	0,00	26.195,56	0,00	0,00	26.195,56	0,00	0,00

Fuente: Elaboración propia a partir de información de la FNC

Proveedor (i)	Suministro de residuos disponible de cada proveedor en el primer año [ton]								
	Abril			Mayo			Junio		
	Residuo 1: Tallos	Residuo 2: Pulpa	Residuo3: Mucílago	Residuo 1: Tallos	Residuo 2: Pulpa	Residuo3: Mucílago	Residuo 1: Tallos	Residuo 2: Pulpa	Residuo3: Mucílago
Proveedor 1	4.510,86	0,00	0,00	4.510,86	0,00	0,00	4.510,86	0,00	0,00
Proveedor 2	2.469,15	33.988,24	11.560,22	2.469,15	33.988,24	11.560,22	9.034,26	10.635,13	3.617,26
Proveedor 3	329,76	91.765,55	31.211,67	329,76	91.765,55	31.211,67	329,76	91.765,55	31.211,67
Proveedor 4	0,00	58.119,33	19.767,78	0,00	58.119,33	19.767,78	0,00	58.119,33	19.767,78
Proveedor 5	0,00	93.181,55	31.693,28	0,00	93.181,55	31.693,28	26.195,56	0,00	0,00

Fuente: Elaboración propia a partir de información de la FNC

Proveedor (i)	Suministro de residuos disponible de cada proveedor en el primer año [ton]								
	Julio			Agosto			Septiembre		
	Residuo 1: Tallos	Residuo 2: Pulpa	Residuo3: Mucílago	Residuo 1: Tallos	Residuo 2: Pulpa	Residuo3: Mucílago	Residuo1: Tallos	Residuo2: Pulpa	Residuo3: Mucílago
Proveedor 1	4.510,86	0,00	0,00	4.510,86	0,00	0,00	0,00	32.091,62	10.915,13
Proveedor 2	15.013,84	0,00	0,00	15.013,84	0,00	0,00	0,00	51.554,48	17.534,92
Proveedor 3	42.700,33	0,00	0,00	42.700,33	0,00	0,00	3.074,81	72.236,47	24.569,36
Proveedor 4	32.677,47	0,00	0,00	32.677,47	0,00	0,00	0,00	58.119,33	19.767,78
Proveedor 5	26.195,56	0,00	0,00	26.195,56	0,00	0,00	0,00	93.181,55	31.693,28

Fuente: Elaboración propia a partir de información de la FNC

Proveedor (i)	Suministro de residuos disponible de cada proveedor en el primer año [ton]								
	Octubre			Noviembre			Diciembre		
	Residuo 1: Tallos	Residuo 2: Pulpa	Residuo3: Mucílago	Residuo 1: Tallos	Residuo 2: Pulpa	Residuo3: Mucílago	Residuo 1: Tallos	Residuo 2: Pulpa	Residuo3: Mucílago
Proveedor 1	0,00	32.091,62	10.915,13	0,00	32.091,62	10.915,13	0,00	32.091,62	10.915,13
Proveedor 2	0,00	51.554,48	17.534,92	0,00	51.554,48	17.534,92	0,00	51.554,48	17.534,92
Proveedor 3	3.074,81	72.236,47	24.569,36	3.074,81	72.236,47	24.569,36	3.074,81	72.236,47	24.569,36
Proveedor 4	0,00	58.119,33	19.767,78	0,00	58.119,33	19.767,78	0,00	58.119,33	19.767,78
Proveedor 5	0,00	93.181,55	31.693,28	0,00	93.181,55	31.693,28	0,00	93.181,55	31.693,28

Fuente: Elaboración propia a partir de información de la FNC

Anexo 5. Demanda

<u>Central de mezcla</u>	Demanda de las centrales de mezcla en el primer año [litros]					
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio
1	2.152.641,95	1.939.459,47	2.060.461,29	2.004.465,71	2.053.203,14	1.853.802,72
2	3.213.924,98	3.044.436,26	3.175.187,66	3.154.720,32	3.273.715,90	2.993.985,24
3	598.158,78	531.346,32	531.450,15	555.213,97	567.859,97	511.248,89

Fuente: Elaboración propia a partir de información de Ministerio de minas

<u>Central de mezcla</u>	Demanda de las centrales de mezcla en el primer año [litros]					
	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
1	2.063.865,45	1.979.501,71	1.968.367,22	2.008.047,45	1.806.063,84	2.298.881,87
2	3.227.800,97	3.127.667,04	3.080.267,29	3.169.716,91	2.835.884,75	3.568.261,08
3	523.320,53	511.798,35	508.150,45	516.845,49	471.589,96	561.870,14

Fuente: Elaboración propia a partir de información de Ministerio de minas