



**Diseño de un modelo logístico para la biomasa residual agrícola y
pecuaria en torno a un sistema centralizado de aprovechamiento**

**Juan David Gómez Quiceno
Nadia Pontón Caro**

Universidad EAN
Facultad de ingeniería
Maestría en gerencia de la cadena de abastecimiento
Bogotá, Colombia
2021

Diseño de un modelo logístico para la biomasa residual agrícola y pecuaria en torno a un sistema centralizado de aprovechamiento

Juan David Gómez Quiceno

Nadia Pontón Caro

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de:

Magister en Gerencia de la cadena de abastecimiento

Director (a):

Elizabeth León Velásquez

Modalidad:

Monografía

Universidad EAN

Facultad de ingeniería

Maestría en gerencia de la cadena de abastecimiento

Bogotá, Colombia

2022

Nota de aceptación

Firma del jurado

Firma del jurado

Firma del director del trabajo de grado

Bogotá D.C. Día - mes – año

Dedicatoria o frase.

*Este logro está dedicado a mi familia.
.Juan David Gómez*

La presente Monografía la dedicamos principalmente a Dios por darnos la inteligencia, sabiduría y sobre todo la fuerza y entusiasmo de haber iniciado y terminado este nuevo escalón profesional y anhelo personal; a mis padres por enseñarme que la exigencia personal tiene sus frutos, y a mi familia por ser una fuente de inspiración y un apoyo fundamental en esta fase importante en nuestras vidas. Nadia Pontón

Resumen

El modelo energético actual se basa principalmente en el aprovechamiento de fuentes de energía fósiles no renovables que contribuyen al aumento del calentamiento global debido a sus altas emisiones de CO₂. La creciente preocupación ha estimulado el desarrollo y aprovechamiento de fuentes de energía alternativas renovables como las producidas por la biomasa residual. El aprovechamiento de esta biomasa presenta desafíos logísticos y económicos tales como: hallarse en áreas rurales dispersas, ubicarse en zonas geográficas de difícil acceso, tener una densidad baja que aumenta los costos de transporte, poseer una densidad energética menor y contar con dificultades en el suministro que aumentan los costos de almacenamiento. Dadas estas complicaciones los investigadores han optado por resolver estos problemas logísticos con técnicas de optimización que minimicen los costos bajo distintos enfoques. Este trabajo presenta una propuesta alternativa basada en la programación lineal binaria donde se estudia el aprovechamiento de múltiples biomásas de origen agrícola y pecuaria en dos modalidades de compra (recolectada y comprada a un precio inferior en la zona del productor y comprada a un precio superior si el productor la transporta a un almacén) con el fin de aprovechar la mayor cantidad posible de biomasa con el objetivo de la maximización de la utilidad. Como restricciones se tiene que solo puede haber una planta productora para darle un carácter centralizado a la operación, y que por otra parte se genere un ahorro de emisiones de CO₂. Por último, se prueba el modelo en la región de Cundinamarca ubicada en la república de Colombia, país tropical sin estaciones, lo cual difiere de la mayoría de los estudios de este tipo en donde las regiones seleccionadas suelen ser no tropicales y cuentan con estaciones lo cual tiene implicaciones en la planeación del abastecimiento de la biomasa residual agrícola. Los resultados arrojan que una operación centralizada tiene un límite de distancias de recolección de 130 km, un ahorro de un 80% en promedio de las emisiones de CO₂ y una combinación óptima de biomasa Porcicola comprada en finca y biomasa residual de café comprada en finca y en almacén, si se requiere reemplazar un 8% de las energías convencionales con energía proveniente de la biomasa residual en la región de estudio.

Palabras clave: Biomasa residual, logística, optimización, emisiones de CO₂, centralizado, agrícola, pecuaria

Abstract

The current energy model is mainly based on the use of non-renewable fossil energy sources that contribute to the increase in global warming due to their high CO₂ emissions. The growing concern has stimulated the development and use of renewable alternative energy sources such as those produced by residual biomass. The use of this biomass presents logistical and economic challenges such as: being in scattered rural areas, being located in geographical areas of difficult access, having a low density that increases transportation costs, having a lower energy density and having supply difficulties. which increase storage costs. Given these complications, researchers have chosen to solve these logistic problems with optimization techniques that minimize costs under different approaches. This work presents an alternative proposal based on binary linear programming where the use of multiple biomasses of agricultural and livestock origin is studied in two purchase modalities (collected and purchased at a lower price in the producer area and purchased at a higher price if the producer transports it to a warehouse) in order to take advantage of the greatest possible amount of biomass with the aim of maximizing utility. As restrictions, there can only be one production plant to give a centralized character to the operation, and on the other hand, savings in CO₂ emissions are generated. Finally, the model is tested in the Cundinamarca region located in the Republic of Colombia, a tropical country with no seasons, which differs from most studies of this type where the selected regions are usually non-tropical which has implications in the planning of the supply of agricultural residual biomass. The results show that a centralized operation has a collection distance limit of 130 km, savings of 80% on average in CO₂ emissions and an optimal combination of pork biomass purchased on the farm and residual coffee biomass purchased on the farm and in warehouse, if it is required to replace 8% of conventional energy with energy from residual biomass in the study region.

Keywords: Residual biomass, logistics, optimization, CO₂ emissions, centralized, agricultural, livestock.

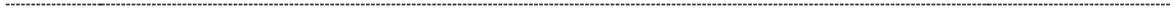


Tabla de contenido

| | <u>Pág.</u> |
|-------------------------------|-------------|
| LISTA DE FIGURAS | 9 |
| LISTA DE TABLAS | 10 |
| INTRODUCCIÓN | 11 |
| OBJETIVOS | 13 |
| OBJETIVO GENERAL | 13 |
| OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 13 |
| JUSTIFICACIÓN | 13 |
| MARCO DE REFERENCIA | 14 |
| HIPÓTESIS | 24 |
| METODOLOGÍA | 24 |
| REPLICABILIDAD | 26 |
| RESULTADOS | 28 |
| ANÁLISIS DE DATOS | 45 |
| DISCUSIÓN DE RESULTADOS | 66 |
| CONCLUSIONES | 68 |
| COMENTARIOS | 69 |
| REFERENCIAS | 70 |

Lista de figuras

| | <u>Pág.</u> |
|--|-------------|
| Ilustración 1. Esquema de Operación Logística, Elaboración propia (Gómez. J, Ponton N) | 30 |
| Ilustración 2. Modelo de Inventario, cantidad adquirida en cada pedido. Elaboración propia a partir de (Chase, Jacobs, & Aquilano, 2009)..... | 34 |
| Ilustración 3. Modelo de Inventario, cantidad de pedido fijo (Cosecha), elaboración propia a partir de (Chase, Jacobs, & Aquilano, 2009)..... | 34 |
| Ilustración 4. Modelo de Inventario fechas de cosecha diferentes, elaboración propia..... | 35 |
| Ilustración 5. Modelo promedio de inventario de biomasa residual global, elaboración propia | 35 |
| Ilustración 6. mapa de Cundinamarca con sus municipios. A partir de (Instituto geografico Agustín Codazzi, 2022). Elaboración Propia..... | 46 |
| Ilustración 7. Descripción de los Municipios a partir de (Instituto geografico Agustín Codazzi, 2022). elaboración propia..... | 47 |
| Ilustración 8. Subdivisión del departamento de Cundinamarca a partir de (Instituto geografico Agustín Codazzi, 2022), Elaboración propia..... | 52 |
| Ilustración 9. Evidencia solución a partir de software FICO Xpress solver ® (Isaac Corporation, 2022). (Versión comunitaria) | 58 |
| Ilustración 10. Resumen de los resultados, software FICO Xpress solver ® (Isaac Corporation, 2022). (Versión comunitaria) | 59 |
| Ilustración 11. Resumen de los resultados, software FICO Xpress solver ® (Isaac Corporation, 2022). (versión comunitaria)..... | 60 |
| Ilustración 11. Resumen de los resultados, software FICO Xpress solver ® (Isaac Corporation, 2022). (versión comunitaria)..... | 60 |
| Ilustración 12. Resumen de los resultados, FICO Xpress solver ® (Isaac Corporation, 2022). (versión comunitaria). | 61 |
| Ilustración 13. Resumen de los resultados, FICO Xpress solver ® (Isaac Corporation, 2022). (Versión comunitaria)..... | 62 |
| Ilustración 14. Resumen de los resultados. FICO Xpress solver ® (Isaac Corporation, 2022). (Versión comunitaria)..... | 63 |
| Ilustración 15 Resumen de los resultados de la segunda simulación en software FICO Xpress solver ® (Isaac Corporation, 2022) (versión comunitaria). | 64 |
| Ilustración 16. Resumen de los resultados en la segunda simulación software FICO Xpress solver ® (Isaac Corporation, 2022) (versión comunitaria).. | 65 |

Ilustración 17. Resumen de los resultados en la segunda simulación, FICO Xpress solver® (Isaac Corporation, 2022)(versión comunitaria)..... 65

Ilustración 18 Resumen de los resultados en la segunda simulación, FICO Xpress solver® (Isaac Corporation, 2022)(versión comunitaria)..... 66

Ilustración 19. Resumen de los resultados de la segunda simulación FICO Xpress solver® (Isaac Corporation, 2022). (versión comunitaria)..... 66

Lista de tablas

Pág.

Tabla 1. Descripción, función objetivo maximizar, Elaboración Propia 42

Tabla 2. Información del UPME (2020) y (Phyllis 2, 2022)Elaboración Propia 48

Tabla 3. Potencial energético de las biomásas residuales agrícolas a partir de (Phyllis 2, 2022) y (UPME, 2010), Elaboración Propia 49

Tabla 4. Potencial energético de las biomásas pecuarias a partir de (López Martínez, Buriticá Arboleda, & Silva Lora, 2018), (UPME, 2010) elaboración propia 49

Tabla 5. Costo por tonelada de biomasa residual agrícola k comprada en almacén, a partir de (Gallagher, y otros, 2003), (Martinez Hernandez, Amezcua Allieri, & Arbuto, 2021), (Institute of agriculture and natural resources, 2017), (Jekayinfa & Scholz, 2007)elaboración propia 50

Tabla 6. Costo por tonelada de biomasa residual agrícola k comprada en finca, , a partir de (Gallagher, y otros, 2003), (Martinez Hernandez, Amezcua Allieri, & Arbuto, 2021), (Institute of agriculture and natural resources, 2017), (Jekayinfa & Scholz, 2007) Elaboración Propia 51

Tabla 7. Costos de tonelada de biomasa residual pecuaria comprada en Finca a partir de (pigprogress, 2022), (Bijarchiyan, Sahebi, & Mirzamohammadi, 2020), (Wortmann & Klein, 2017). Elaboración Propia 51

Tabla 8. Costo por tonelada de la biomasa residual pecuaria m comprada en finca, a partir de (pigprogress, 2022), (Bijarchiyan, Sahebi, & Mirzamohammadi, 2020), (Wortmann & Klein, 2017) elaboración propia 51

Tabla 9. Cantidad de k biomásas residuales agrícolas en las i regiones (Toneladas) a partir de (Agronet, 2021), Elaboración propia 53

Tabla 10. Cantidad de m biomásas residuales pecuarias en las i regiones (Toneladas) a partir de (ICA, 2020), elaboración propia 53

Tabla 11. Distancia en Km desde la región i de suministro hasta la región j de producción, a partir de (Google, 2022)Elaboración Propia 55

| | |
|---|----|
| Tabla 12. Numero promedio de cosechas anuales de las k biomosas residuales agrícolas a partir de (Erales Vides, 2016), (DANE, 2017), (DANE, 2014), (Coffee research organization, 2022). Elaboración Propia | 56 |
| Tabla 13. Volumen específico de la biomasa residual agrícola i dado en m ³ /t a partir de (Phyllis 2, 2022), Elaboración Propia | 57 |
| Tabla 14. Precio de alquiler de bodega por metro cuadrado en las distintas regiones a partir de (Metro cuadrado, 2022). elaboración propia..... | 57 |
| Tabla 15. Resumen de los resultados, Elaboración Propia | 59 |
| Tabla 16 Resultados de las simulaciones, Elaboración Propia | 67 |

Introducción

El modelo energético global se basa en más de un 86% (Hong, How, & Lam, 2016) en energías no renovables o de origen fósil que generan un impacto ambiental negativo por las altas emisiones de CO₂ y otros gases de efecto invernadero. La preocupación por el calentamiento global debido a estas emisiones ha llevado a la necesidad de investigar y desarrollar diferentes fuentes de energías renovables que generen menores emisiones de CO₂, y es así que el aprovechamiento energético de la biomasa residual es una alternativa que supone una disminución de este gas a la atmósfera (De Lucas Herguedas & del Peso Taranco, 2012).

La explotación de la biomasa residual también produce ventajas socioeconómicas como: un aumento en la diversificación energética, la disminución en la dependencia externa del abastecimiento de combustibles, y el surgimiento de nuevas oportunidades para el sector agrícola que puedan contribuir a un aumento económico en el medio rural (Vesga, y otros, 2018).

La biomasa residual es la parte biodegradable de los productos y residuos de procedencia orgánica de actividades agropecuarias, de cultivo de bosques y de las industrias incluidas la de la pesca y la acuicultura; también se compone de la parte orgánica degradable de los restos industriales y locales (De Lucas Herguedas & del Peso Taranco, 2012). Se proyecta que entre el 2015 y 2035 su contribución en el modelo energético crecerá de un 3% a un 8% (Hong, How, & Lam, 2016).

El principal desafío para el aprovechamiento de la biomasa residual se encuentra en su operación logística la cual ocupa alrededor del 90% de los costos de producción de

biocombustibles (Hong, How, & Lam, 2016). Esto se debe a que la logística de la biomasa residual presenta retos como: hallarse en regiones dispersas con difícil acceso, presentar incertidumbre en el abastecimiento, contar con la dificultad para determinar su cantidad disponible y poseer bajas densidades que elevan el costo de transporte y almacenamiento (Lautala, y otros, 2015). Por otra parte, la baja densidad energética de la biomasa residual disminuye los márgenes de utilidad frente al uso de los combustibles fósiles (Nunes, Causer, & Ciolkosz, 2020).

Dada la complejidad de este tipo de operación, los investigadores han optado por abordar estos problemas con modelos de optimización en donde se incorporan las operaciones de cosecha y recolección, almacenamiento, transporte y preprocesamiento en contextos con el fin de minimizar los costos, maximizar la utilidad o minimizar el impacto ambiental. Los modelos encontrados en la literatura generalmente se han aplicado a contextos geográficos no tropicales con las cuatro estaciones, estableciendo diferentes puntos de transformación de energía para distintas biomásas, o un punto de transformación para un solo tipo de biomasa. Por lo general la estructura de costos está basada en el transporte y almacenamiento (Teja Malladi & Sowlati, 2018).

En el presente trabajo presenta en el siguiente orden: objetivos de investigación, justificación, el marco de referencia, hipótesis de investigación, metodología, resultados, el análisis de los resultados, discusión de resultados, y por último conclusiones.

Problema de investigación

De acuerdo a lo presentado en el capítulo anterior el aprovechamiento de la biomasa agrícola y pecuaria, en particular en países tropicales como Colombia se dificulta, por no existir: una logística definida, el coste del transporte, el coste del almacenamiento, el coste de las biomásas, las distancias a los centros de tratamiento, y el estadio de las rutas etc. Demuestra que es necesario investigar sobre sistemas logísticos de aprovechamiento de biomasa.

Formulación de la pregunta de investigación

¿Cuál es el escenario más apropiado de la operación logística para el aprovechamiento de la biomasa residual agrícola y pecuaria?

Objetivos

Objetivo general

Diseñar un modelo de operación logística para la integración de la biomasa residual agrícola y pecuaria a un proceso de aprovechamiento centralizado, en una región de estudio de caso seleccionada.

Objetivos específicos

- Definir las características y tasas de rendimiento de la biomasa residual agrícola y pecuaria para la región de estudio.
- Establecer la demanda, el suministro, los sistemas de almacenamiento, los medios de transporte y los costos de la logística de la biomasa residual agrícola y pecuaria para la región de estudio.
- Diseñar el modelo logístico para el aprovechamiento de la biomasa residual agrícola y pecuaria.
- Determinar las emisiones de CO₂ de la operación logística.
- Validar el modelo propuesto mediante la corrida de diferentes escenarios del modelo logístico para el suministro de biomasa residual a través de los principales parámetros del proceso.

Justificación

En el marco de la ley 1715 del 2014 “*por medio de la cual se regula la integración de energías renovables no convencionales al sistema energético nacional*” la nación promueve el desarrollo y la utilización de fuentes no convencionales de energía,

principalmente aquella de carácter renovable como medio para el desarrollo sostenible, la reducción de gases de efecto invernadero y la seguridad del abastecimiento energético. Fomentando la inversión, investigación y desarrollo de tecnologías limpias para la producción de energía. La energía de la biomasa es una fuente de energía no convencional y renovable cuya producción está alineada con los objetivos de la mencionada ley, de aquí la importancia de aportar desde el conocimiento académico al aprovechamiento de estas fuentes de energías renovables como contribución al desarrollo del país en temas ambientales. Por otra parte, se observa que el aprovechamiento de la biomasa residual puede contribuir con el desarrollo rural, al obtener de los residuos de las cosechas y las actividades pecuarias un valor económico por el potencial de estos de ser convertidos en energía. La mayoría de los modelos para el aprovechamiento de la biomasa residual tienen como presupuesto que la materia prima no es adquirida a proveedores, sino que está integrada dentro de la operación, lo que deja entrever que en un contexto más amplio esta puede ser comprada. Por otra parte, con el fin de dar otro valor agregado se propone un modelo que da la posibilidad de adquirir la biomasa residual de difícil acceso en una operación de compra en donde el proveedor se encarga de una parte del transporte y la dispone en un punto de acopio por el incentivo de un mayor valor de la compra.

Marco de referencia

Biomasa

La biomasa es un material orgánico que se deriva de los sistemas biológicos (Paredes-Sánchez, García-Elcoro, Rosillo-Calle, & Xiberta-Bernat, 2016). Para (Nunes, Causer, & Ciolkosz, 2020), la biomasa se ha vuelto una importante alternativa de energía renovable; debido a que entre sus ventajas esta la versatilidad por su potencial de convertirse en electricidad, calor y biocombustibles para ser utilizados en el transporte (Rentizelas, Tolis, & Tatsiopoulos, 2009). La diversidad de sus recursos y las tecnologías de conversión existentes la hacen capaz de reemplazar los combustibles fósiles. Contribuyendo a la sostenibilidad a la reducción de CO₂ y gases de efecto invernadero (Paredes-Sánchez, García-Elcoro, Rosillo-Calle, & Xiberta-Bernat, 2016).

La biomasa que procede de los residuos generados en las actividades agrícolas, pecuarias, forestales, agroindustriales y urbanas se denomina biomasa residual (De Lucas Herguedas & del Peso Taranco, 2012).

Biomasa Residual Agrícola y Pecuaria:

Biomasa residual pecuaria

Las actividades pecuarias (avícolas, porcinas, y ganaderas) generan estiércol que contienen una parte orgánica que es fuente generadora de energía; la producción de este material orgánico varía dependiendo de la especie pecuaria. Va desde 0,1kg a 0,5kg por día por cabeza para las aves y de 30 a 50 kg para el ganado bovino (De Lucas Herguedas & del Peso Taranco, 2012). Por otra parte, el poder calorífico inferior y potencial para producir energía también depende de la especie. Otras consideraciones prácticas a tener en cuenta a la hora de aprovechar esta energía renovable es que este tipo de biomasa se caracteriza por tener alto contenido de humedad, composición sólida variable, capacidad de fermentarse, generación de vapores, gases y compuestos orgánicos volátiles (UPME, 2010).

Biomasa residual agrícola:

Son los residuos agrícolas y aquellos materiales generados en los cultivos de distintas especies que no poseen valor económico. Por nombrar unos se encuentran la paja de los cereales, los restos de las cosechas hortícolas, los restos de las podas, los vástagos y raquis de los bananos, el cuesco del maíz entre muchos otros. Una parte de estos residuos se dejan en el campo por motivos medioambientales, para incrementar su fertilidad y evitar la erosión (De Lucas Herguedas & del Peso Taranco, 2012).

Es de vital importancia investigar el potencial energético de la biomasa residual para contribuir a que las operaciones para su aprovechamiento sean eficientes en términos energéticos, ambientales y económicos (UPME, 2010).

Eficiencia en recolección

La eficiencia en la recolección es la relación entre la biomasa residual disponible (que puede ser efectivamente recolectada) y la masa total de residuos en el área de recolección. Esta eficiencia está estimada en un 70% (Paredes-Sánchez, García-Elcoro, Rosillo-Calle, & Xiberta-Bernat, 2016) y esto es debido a restricciones técnicas como la inaccesibilidad de las áreas de generación, la pendiente de las vías de acceso y el tamaño de los vehículos de recolección (Paredes-Sánchez, García-Elcoro, Rosillo-Calle, & Xiberta-Bernat, 2016).

Potencial energético de la biomasa residual

Potencial energético de la biomasa residual agrícola

El cálculo del potencial energético de la biomasa residual se apoya en el uso de modelos matemáticos basados en la cantidad de masa seca, el poder calorífico inferior y el factor de residuo de un cultivo particular. Cada producto principal tiene diferentes residuos con diferentes cantidades de poder calorífico inferior, masa seca y factor de residuo. Por ejemplo, la caña panelera tiene por residuos el bagazo y las hojas-cogollo. Cada uno de estos tipos de residuos tiene su propio poder calorífico inferior, masa seca y factor de residuo y por lo tanto su propio potencial energético (UPME, 2010).

Potencial energético de la biomasa residual pecuaria

El cálculo del potencial energético de la biomasa Pecuaria difiere en su modelación matemática ya que las variables a tener en cuenta son la masa seca, el poder calorífico inferior del metano, los sólidos volátiles y la producción de Biogás de una especie particular. Cada especie pecuaria tiene diferentes cantidades de poder calorífico inferior, masa seca, sólidos volátiles y producción de Biogás (UPME, 2010).

Biocombustibles de la biomasa residual

Descripción

Las características de los biocombustibles provenientes del procesamiento de la biomasa residual varían de acuerdo con el tipo de biomasa utilizada, sus propiedades, y el proceso de transformación utilizado.

Tipos

Biocombustible gaseoso:

Es la conversión de la biomasa en un gas que es una mezcla de monóxido de carbono, hidrógeno y metano que se caracteriza por tener un bajo valor calórico que puede ser quemado para producir calor y vapor o ser usado en turbinas que funcionen con gas para obtener electricidad. Su eficiencia de conversión puede llegar a ser del 50% (Caputo, Palumbo, Pelagagge, & Scacchia, 2005).

Biocombustibles solidos:

Son combustibles constituidos por materias lignocelulósicas provenientes del sector agrícola o forestal, su densidad dependerá de su origen en la especie arbórea (De Lucas Herguedas & del Peso Taranco, 2012). Su contenido en humedad requiere de valores inferiores al 30% y su poder calorífico inferior oscila entre los 15 y 19 MJ/kg de materia seca (De Lucas Herguedas & del Peso Taranco, 2012).

Biocombustible liquido:

Los biocombustibles resultan de la conversión de la biomasa en una parte líquida. Los productos más típicos son: el etanol y otros alcoholes (Caputo, Palumbo, Pelagagge, & Scacchia, 2005). Otros procesos permiten convertir residuos vegetales en biodiesel; las materias primas del sector agrícola pueden llegar a transformarse en biocombustibles con propiedades similares a los combustibles convencionales; este tipo de biocombustible suele ser utilizado en el sector del transporte por lo tanto son conocidos como biocarburantes (De Lucas Herguedas & del Peso Taranco, 2012).

Procesos de transformación

La producción de biocombustibles puede darse con mecanismos biológicos tales como la fermentación o procesos termoquímicos tales como la pirolisis; cada tecnología se ajusta mejor a distintos tipos de materia prima (Lautala, y otros, 2015). Algunas materias primas requieren pretratamientos como la densificación y el secado para su uso económico y eficiente. El contenido de humedad, carbono y cenizas que posea la

biomasa particular tendrán efecto en su conversión en la bio-refinería (Hong, How, & Lam, 2016).

Para biomasas residuales con alto contenido de humedad el proceso adecuado es el de biodigestión anaerobia que permite crear biocombustible gaseoso como producto principal y fertilizante tipo compost como subproducto (UPME, 2010).

Operación logística biomasa Residual

La logística de la biomasa se compone de operaciones interdependientes relacionadas con la cosecha, los tipos de biomasa y sus propiedades físico-químicas, la recolección, el almacenamiento, el pre tratamiento, el transporte, el ruteo y la localización de las biorrefinerías para su procesamiento.

La logística de la biomasa incluye operaciones a nivel Upstream cuando se trata del abastecimiento de la materia prima, y operaciones a nivel Downstream cuando se trata de la distribución de energía y biocombustibles como productos terminados (Teja Malladi & Sowlati, 2018).

La recolección de la biomasa depende del tipo de demanda de energía requerida, en un modelo Pull enfocado a una demanda determinística, solo se recolecta la cantidad de biomasa requerida para cumplir con los requerimientos de los consumidores, en el modelo Push, la totalidad de biomasa disponible en cada área es recolectada de forma periódica para ser puesta en el mercado (Teja Malladi & Sowlati, 2018).

Los diferentes tipos de Biomasa pueden ser recolectados de diferentes maneras, los residuos agrícolas requieren ser cosechados y por lo general pueden ser recolectados en pacas redondas, pacas cuadradas o en su forma picada cuando es cosechada con cosechadoras de forraje. Se ha demostrado que la forma de recolección en pacas cuadradas resulta ser el sistema de recolección más eficiente y económica, ya que disminuye los costos del almacenamiento. La disponibilidad estacional también puede llevar a una superposición en el periodo de recolección para distintos proveedores añadiendo complejidad a la programación y ruteo de la recolección. Tanto la dispersión

como la disponibilidad estacional de la biomasa agrícola se han simplificado en la mayoría de los modelos logísticos estudiados (Teja Malladi & Sowlati, 2018).

El pretratamiento de la biomasa incluye operaciones como la clasificación, la molienda, el astillado, el secado y la densificación. El pretratamiento se realiza con el fin de incrementar la eficiencia del transporte y mejorar la calidad de la materia prima. La biomasa puede requerir o no de operaciones de retratamiento de acuerdo a su tipo y método de cosecha. La biomasa de origen agrícola por lo general se recolecta en fardos que requieren de una molienda antes de poder densificarse o convertirse en combustible o energía. El transporte y almacenamiento de los fardos de la biomasa residual en fardos se considera eficiente. Los fardos por lo general son preprocesados en la planta de transformación y la mayoría de los modelos de optimización logísticos de la biomasa de origen agrícola no lo consideran (Teja Malladi & Sowlati, 2018).

Los procesos de almacenamiento son un componente necesario que se puede dar en distintos puntos de la cadena de abastecimiento (posterior a la cosecha, entre modos de transporte y posterior a su procesamiento). Proveen de ventajas como la reducción del contenido de humedad y el control de la pérdida del contenido energético de la biomasa, pero también tienen aporta desventajas como un aumento en los costos y las demoras del proceso (Lautala, y otros, 2015).

Muchos tipos de Biomasa se caracterizan por su disponibilidad estacional ya que su cosecha se da en tiempos específicos del año. La anterior circunstancia junto con la necesidad de abastecer de forma constante de esta materia prima las plantas de creación de energía, se traduce en la necesidad de crear sistemas de almacenamiento para asegurar el suministro (Rentizelas, Tolis, & Tatsiopoulos, 2009).

El corto intervalo de tiempo para recolectar grandes cantidades de Biomasa aumenta considerablemente los costos de almacenamiento al requerir de mayor capacidad para su manejo, sumado a lo anterior se observa que en los periodos intermedios entre las cosechas se da una subutilización del espacio disminuyendo la eficiencia y aumentando en forma general los costos. Existen diversos métodos de almacenamiento que varían en complejidad y costos aplicables a distintos tipos de biomasa que poseen características diferentes. Los tipos de almacenamiento se pueden dividir en

cuartos cerrados con inyección de calor por medio de canales el cual posee el mayor costo, de cuarto cerrado sin inyección de calor que se considera de costo medio y de almacenamiento en espacios abiertos con solo protección de una película plástica que es el de menor costo. Se ha determinado que la penalización por pérdidas de contenido energético y de biomasa no justifican los altos costos de un almacenamiento sofisticado. En el enfoque de las múltiples biomásas el método de almacenamiento más económico es el de sistema al aire libre con protección de película plástica y resulta ser el más eficiente en términos de la cadena global, sin embargo, la altura máxima a la que se puede almacenar es 3 metros, y la pérdida de material es de aproximadamente 1% al mes. Los costos operativos de mantener un sistema así es aproximadamente el 4% del costo de inversión del almacén al año (Ko, Lautala, & Handler, 2018).

Por otra parte, el uso de múltiples Biomásas disminuye los costos de almacenamiento al brindar un suministro más frecuente y menos voluminoso que limita la necesidad de ampliar la capacidad de almacenaje (Rentizelas, Tolis, & Tatsiopoulos, 2009).

El transporte de la biomasa desde su fuente de origen hasta las plantas de conversión involucra una variedad de aspectos económicos, energéticos y ambientales. La capacidad del transporte y la cantidad de biomasa puede determinar el número de transportes, así como la red y las rutas; estas decisiones se deben tomar de forma que minimicen los costos y los tiempos de transporte, así como el impacto ambiental (Hong, How, & Lam, 2016).

Dependiendo de las distancias y la infraestructura local puede ser posible alcanzar ahorros en costos, a través del uso de diferentes medios de transportes (por ejemplo, camión y/o tren) pero esto depende de las propiedades específicas de las materias primas, su origen, sus destinos de procesamientos y otras condiciones locales tales como la disponibilidad de infraestructura (Lautala, y otros, 2015).

Los costos de transporte pueden ser evaluados considerando la accesibilidad, basado en los aspectos topográficos como las pendientes y la red vial (Paredes-Sánchez, García-Elcoro, Rosillo-Calle, & Xiberta-Bernat, 2016) (paredes, 2016). O con índices promedio para el costo por tonelada y kilómetro recorrido (Toro, Santa, & Granada, 2013).

Se debe mencionar que existe una relación entre el almacenamiento y el transporte, se ha observado que el almacenamiento aumenta los costos de transporte al aumentar los tiempos de cargue y descargue. Varios estudios determinan que siempre que sea posible, la operación de transporte de la biomasa directamente de la zona de recolección a la zona de conversión es más eficiente en términos económicos y logísticos. Los costos asociados al transporte dependen de las distancias recorridas, las cantidades, la cantidad de medios de transporte, el tiempo de carga y descarga y las rutas que se realizan. Los costos de transporte por unidad de biomasa pueden disminuir si los vehículos no viajan vacíos a la zona de recolección de la biomasa. Los camiones han demostrado ser los más utilizados para esta operación, pero solo son económicos para distancias cortas (Teja Malladi & Sowlati, 2018).

Con todo lo anterior puede apreciarse que diseñar un sistema logístico para el aprovechamiento de la biomasa residual es complejo debido a las características de la biomasa, la disponibilidad estacional, los ciclos de rotación de la biomasa, las redes logísticas, las operaciones de almacenamiento, la ubicación geográfica dispersa, las formas de recolección, la disponibilidad, y la interdependencia entre las distintas actividades que componen la cadena de abastecimiento. Por las razones mencionadas se han diseñado distintos tipos de modelos basados en programación matemática, heurísticas, simulación, sistemas de información geográficos, entre otros (Teja Malladi & Sowlati, 2018).

Dentro de los artículos publicados que hacen propuestas para resolver el problema de la logística y las cadenas de abastecimiento de la biomasa se expone la siguiente revisión: (Sharma, Ingalls, Jones, & Khanchi, 2013), analizó 30 artículos acerca del diseño de la cadena logística de la biomasa en donde se revisó las tendencias en energía, objetivos en energía renovables, biomasa para la producción de biocombustibles y procesos de conversión. Se analizaron varios modelos matemáticos usados para optimizar las cadenas logísticas de la biomasa (principalmente combinaciones de programación lineal entera y modelos de programación multiobjetivo) aportando una lista de los problemas y desafíos que se han de estudiar a futuro. (De Meyer, Catrysse, Rasinmaki, & Van Orshoven, 2014), revisó 68 artículos en el diseño de cadenas logísticas de la biomasa, su revisión presentó una visión en conjunto de los métodos de

optimización y modelos enfocados en diseños de la cadena de abastecimiento de la biomasa resaltando las operaciones, el manejo de la biomasa y los lapsos de tiempos en la cadena. (Ghaderi, Pishvae, & Moini, 2016) incluyó niveles de decisión del diseño de la cadena de abastecimiento de la biomasa, teniendo en cuenta la incertidumbre en el abasto y los aspectos de sostenibilidad. (Acuna, y otros, 2019) propone una red que contiene distintos tipos de biomasa en donde un punto destino puede demandar uno o ambos tipos de biomasa, que se basa en los modelos de programación lineal, pero amplía los modelos clásicos de optimización del transporte, el objetivo del modelo es determinar el flujo óptimo de diferentes tipos de biomasa desde el abastecimiento hasta uno o más puntos de demanda. (Kanzian, Holzleitner, Stampfer, & Ashton, 2009), desarrolló dos versiones de un modelo de optimización (programación lineal y programación múltiple entera) en donde se incluían 4 diferentes escenarios de abastecimiento uno para 9 plantas y otro para 16 plantas. (Ba, Prins, & Prodhon, 2016), (De Meyer, Cattrysse, Rasinmaki, & Van Orshoven, 2014) y (Shabani & Sowlati, 2016) hacen una exhaustiva revisión de diversas técnicas de optimización (programación matemática, optimización multiobjetivo y heurística) y técnicas sin optimización (toma de decisiones multi atributos, sistemas de información geográfica y simulación) que han sido utilizados separados o en combinación para modelar cadenas de abastecimiento de la biomasa. Todas las anteriores técnicas comprenden una o más funciones objetivas que deben minimizarse (ejemplo, costos y emisiones de gases de efecto invernadero) o maximizarse (por ejemplo, la rentabilidad) que involucran restricciones (por ejemplo, demanda y presupuesto) y variables de decisión (por ejemplo, localización de plantas). (Kogler & Rauch, 2018), determino que la simulación de eventos discretos ha sido útil para evaluar la factibilidad para uso de transportes multimodales. (Ba, Prins, & Prodhon, 2016) revisan el uso de la simulación para la toma de decisiones tácticas y operativas en donde se reproduce todas las actividades de la cadena: cosecha, transporte, almacenamiento, etc. Analizan estos procesos y se realizan cálculos económicos para evaluar costos, consumo de energía y emisiones de gases de efecto invernadero. (Atashbar, Labadie, & Prins, 2018), hace una revisión crítica de los modelos de optimización de las aplicaciones de los sistemas de información geográfica que pueden recolectar, almacenar, gestionar, recuperar, analizar y desplegar información geográfica, para calcular las distancias más cortas entre el abastecimiento y los puntos de demanda que han sido utilizados para

determinar la localización de plantas de procesamiento de biomasa, así como su tamaño y tecnologías. En cuanto a la localización (Xin Cao, Wang, & Gao, 2021) presenta un modelo de dos escalones con programación lineal entera y un híbrido de heurísticas. (Strandgard, Turner, & Shillabeer, 2022) Plantean 4 planteamientos matemáticos para el problema del almacenamiento (Programación lineal, evolutivo, heurística, greedy) y eligen el del mejor desempeño para el problema del preprocesamiento.

A continuación, se establece de forma tabular los elementos destacables en los modelos de algunos de los autores mencionados:

| Autores | Principal diferenciador |
|---|--|
| (Toro, Santa, & Granada, 2013) | Utiliza modelo de transporte, pero para un solo tipo de biomasa |
| (Yalcinkaya, 2020) | Estudia la localización de la planta de procesamiento bajo una metodología p-mediana |
| (Garbs & Geldermann, 2018) | modela la logística de biomasa residual, pero para cultivos específicos |
| (Durmaz & Bilgen, 2020) | Modela bajo programación lineal entera pero únicamente para la biomasa residual avícola |
| (Paredes-Sánchez, García-Elcoro, Rosillo-Calle, & Xiberta-Bernat, 2016) | Aborda el problema del análisis económico de la ubicación desde un análisis con sistemas de información geográfica |
| (Egieya, Cucek, Zirngast, & Isafiade, 2019) | Utiliza un enfoque de múltiples biomásas, pero sin operaciones de compra |

| | |
|---|--|
| (Rentizelas, Tolis, & Tatsiopoulos, 2009) | Analiza el problema del almacenamiento desde la programación lineal entera |
|---|--|

Como se puede observar existe una novedad a la hora de realizar una propuesta que involucre el problema de la programación lineal binaria para resolver el problema de las múltiples biomásas, la ubicación, los costos de almacenamiento, las compras y el análisis económico.

Hipótesis

- El escenario más apropiado para el aprovechamiento de la biomasa residual agrícola y pecuaria no puede ser centralizado.
- Las variables del modelo logístico de aprovechamiento de biomasa residual agrícola y pecuaria son: las distancias de recolección, la estacionalidad, el tipo de biomasa, la disponibilidad, el costo de compra, el costo almacenamiento, y el costo del transporte.
- Un modelo logístico centralizado para el aprovechamiento de la biomasa residual agrícola y pecuaria es altamente sensible a los cambios en el entorno.

Metodología

Enfoque, diseño de la investigación y alcance o tipo de estudio

En este trabajo de investigación se utilizó un enfoque mixto cuantitativo y cualitativo teniendo en cuenta las ventajas de abordar la naturaleza de este problema de investigación desde una perspectiva integral (Hernández, Fernández, & Baptista, 2014).

La investigación involucró el análisis de datos secundarios de fuentes oficiales (Agronet, ICA, UPME, DANE, Phyllis 2, Gobernación de Cundinamarca, Instituto Agustín Codazzi), la lectura de artículos científicos acerca del objeto de estudio tratado, y la consulta de libros académicos dedicados a la programación matemática e investigación de operaciones para el diseño del modelo. Desde la perspectiva cuantitativa se analizaron datos característicos de la operación logística de la biomasa residual agrícola y pecuaria

tales como: las cantidades disponibles, tiempos de recolección, áreas de recolección, distancias recorridas, flujos de biomasa, costos, etc. y desde la perspectiva cualitativa se abordaron temas como: la planeación de la demanda, el horizonte temporal, la estrategia de abastecimiento, el tipo de abastecimiento etc.

Alcance

La región de estudio donde se Probó los diferentes escenarios del modelo diseñado es el departamento de Cundinamarca ubicado en la república de Colombia, región que presenta un fondo especial para la implementación ya que cuenta con una extensión rural del 80% de su territorio y es el proveedor del 70% de los alimentos que se consumen en la capital del país (Gobernación de Cundinamarca, 2020). Cundinamarca cuenta con actividad pecuaria avícola, bovina distribuida en sus diferentes municipios, posee actividades agrícolas pertenecientes a cultivos transitorios, permanentes y agroindustriales (Secretaria distrital de planeación, 2019). Las anteriores circunstancias hacen de Cundinamarca un buen ejemplo para el estudio de cadenas de aprovechamiento de biomasa residual agrícola y pecuaria. Existe además gran cantidad de información en fuentes secundarias oficiales respecto a las tasas de generación, la geografía, la energía consumida, los costos de almacenamiento y demás información necesaria para parametrizar el modelo.

Por otra parte, los resultados obtenidos se basaron en las técnicas de programación lineal binaria y un modelo de autoría propia que se dedujo de hechos y premisas aceptadas que fueron recolectados en la investigación de la operación logística de la biomasa residual.

Finalmente, el modelo diseñado se ocupó únicamente de la operación logística a nivel Upstream, es decir que el modelo se ocupa únicamente del abastecimiento de biomasa residual.

A continuación, se detallan las actividades metodológicas realizadas para el logro de los objetivos planteados en esta investigación.

Revisión en las bases de datos: (Science direct, Springer, EBSCO) para analizar el estado actual en el que se encuentra la investigación de la logística de la biomasa residual

agrícola y pecuaria con el fin de determinar sus principales características, como los investigadores abordan este problema, las técnicas de modelado y las recomendaciones.

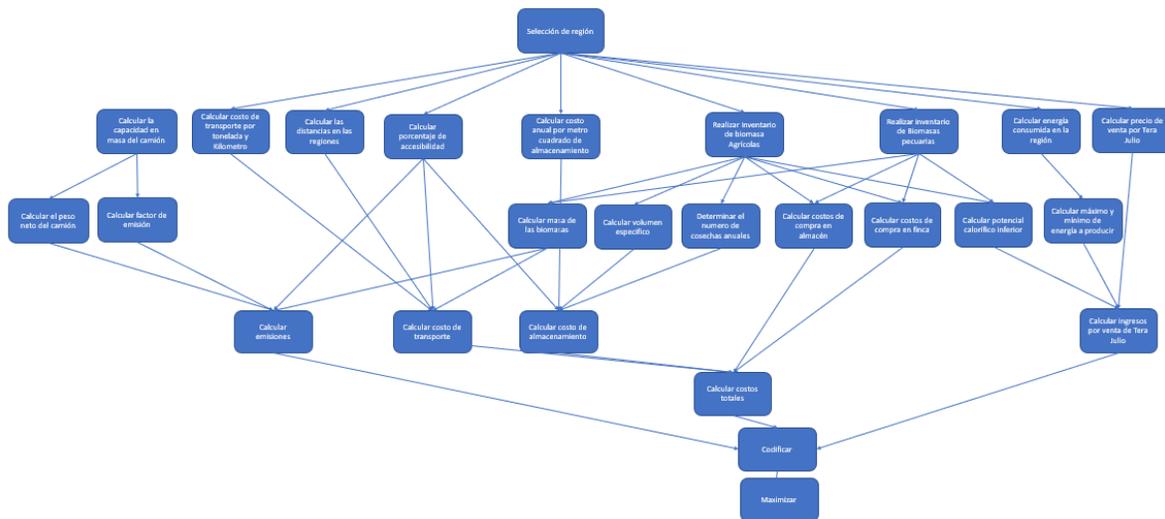
- Aplicación del método científico de observación y formulación del problema que incluyo el análisis de datos relevantes con la cual comenzó el desarrollo del modelo que abstrae la esencia del problema de la logística del aprovechamiento centralizado de la biomasa residual agrícola y pecuaria.
- Determinación de las variables que se deben tener en cuenta para el diseño de un modelo de programación lineal binario para el aprovechamiento de la biomasa residual agrícola y pecuaria en una operación de tipo centralizado cuya función objetivo sea la maximización de utilidad. Posteriormente, de acuerdo a la naturaleza de la logística de este tipo de operación, a los objetivos propuestos, a la pregunta de investigación y a las hipótesis se diseñaron las restricciones del modelo.
- Diseño matemático del modelo.
- Análisis de los datos específicos de las variables del modelo aplicado a la región de Cundinamarca.
- Transcripción bajo lenguaje Mosel, el modelo matemático junto con los datos analizados del departamento de Cundinamarca bajo lenguaje Mosel para ser resuelto en el software FICO Xpress solver (versión comunitaria).
- Simulación de distintos escenarios del modelo diseñado en el software mencionado, para validar el modelo propuesto y obtener resultados y conclusiones.

Replicabilidad

Este modelo es aplicable a cualquier contexto específico que involucre cualquier conjunto de puntos de generación de distintos tipos y cantidades de biomasa residual agrícola y pecuaria para ser recolectada y procesada en un sistema centralizado. Lo anterior se debe a que la formulación contempla cuatro conjuntos básicos para cualquier p, n, q y r número de elementos que consisten en: los sitios de recolección, los sitios

potenciales de procesamiento, los tipos de biomasa residual agrícola y los tipos de biomasa residual pecuaria. Estos cuatro conjuntos, junto a los parámetros específicos permiten crear los distintos arreglos de información requeridos tales como la distancia entre las regiones de recolección y las regiones de procesamiento, el potencial energético por región, la masa en toneladas en las distintas regiones etc. El modelo presentado está formulado como un problema de maximización lineal binaria que puede ser resuelto en distintos softwares que posean la capacidad de trabajar con un número elevado de variables igual a $p + 2pnq + 2pnr$. Se hace la aclaración que la formulación debe traducirse al lenguaje de programación particular del software de optimización utilizado que puede ser Mosel, Python, C entre otros.

Para los requerimientos de información de una cadena de abastecimiento Upstream de este tipo se cuenta con amplia información. La plataforma bioraise contiene información de los recursos disponibles de biomasa residual en varios países de la comunidad europea. Esta aplicación se basa en un sistema de información geográfica que brinda información acerca de la disponibilidad, ubicación geográfica, accesibilidad, propiedades físicas, propiedades químicas, costos de recolección y costos de transporte de distintos tipos de biomasa (CIEMAT, 2022). El laboratorio nacional de energía renovable (NREL) contiene la información espacial y técnica de los recursos energéticos provenientes de la biomasa residual en los Estados Unidos (United States Government, 2022). Es común encontrar información recolectada por el gobierno de cada país respecto a sus recursos de energías renovables, dentro de los cuales se cuentan los de la biomasa residual agrícola, ya dentro de la creciente preocupación por el calentamiento global, es común encontrar legislaciones que involucran el reemplazo de una parte de los combustibles fósiles por energías sostenibles (Jiang, He, & Xiao, 2019). A continuación, se presenta un mapa conceptual con la estructura lógica de los requerimientos de información:



Resultados

Este trabajo se basa en la teoría de la programación lineal entera para encontrar la combinación óptima entre una zona de producción, una o más fuentes de recolección, en donde se ubican distintos tipos de biomasa residual agrícola y pecuaria para ser compradas en distintas modalidades, con puntos de almacenamiento, restricciones en emisión de CO₂ y utilidad percibida. Se analizarán primero cada uno de estos problemas para llegar a un modelo matemático que involucre todos los aspectos.

El modelo está calculado para un horizonte temporal de un año como es costumbre en este tipo de ejercicios.

Se definen los siguientes conjuntos que sirven para la construcción del modelo en donde se tienen los conjuntos de las regiones posibles para ubicar la planta de procesamiento, las regiones posibles de donde recolectar las biombras, los tipos posibles de biomasa residual agrícola y los tipos posibles de la biomasa residual pecuaria.

Conjuntos

- **$j \in p$** = sitio de planta de procesamiento: p es el conjunto las distintas regiones en donde puede ubicarse la planta de transformación.
- **$i \in n$** = sitio de recolección de la biomasa: n es el conjunto de las distintas regiones en donde se ubica las biombras.

- $k \in q$ = **tipo de biomasa residual agrícola**: q es el conjunto de las distintas biomásas residuales agrícolas.
- $m \in r$ = **tipo de biomasa residual pecuaria**: r es el conjunto de las distintas biomásas residuales agrícolas.

VARIABLES DE DECISIÓN

Para este modelo se tendrán dos modelos de compra dadas las condiciones de acceso a las zonas de generación. Por un lado, se comprará y recolectará directamente en la finca la biomasa residual agrícola que esté disponible, el precio pagado por esta es el más bajo. Por otra parte, se comprará en almacén a un precio más alto la biomasa que el productor transporte desde su finca hasta el centro de acopio seleccionado por la operación, lo anterior debido a la imposibilidad de los camiones de acceder a estas zonas. La compra de esta biomasa residual agrícola genera un costo de almacenamiento al no poder procesarse de forma inmediata dada la demanda de energía. El modelo tendrá como variables de decisión el comprar en finca o comprar en almacén un determinado tipo de biomasa residual agrícola en ciertas regiones para ser transportadas y procesadas en una única región óptima de acuerdo a las necesidades de energía y las restricciones de emisiones de CO₂.

Para la biomasa residual pecuaria también se genera los dos tipos de compra mencionados con anterioridad, la diferencia de esta compra es que no requiere almacenamiento puesto que la generación de la materia prima es diaria e igualmente se consume a término diario. Por lo tanto, se generan otras dos variables de decisión: el comprar en finca o comprar en almacén un tipo de biomasa residual pecuaria en una región determinada para ser transportada y procesada en una región óptima.

El siguiente esquema resume la operación:

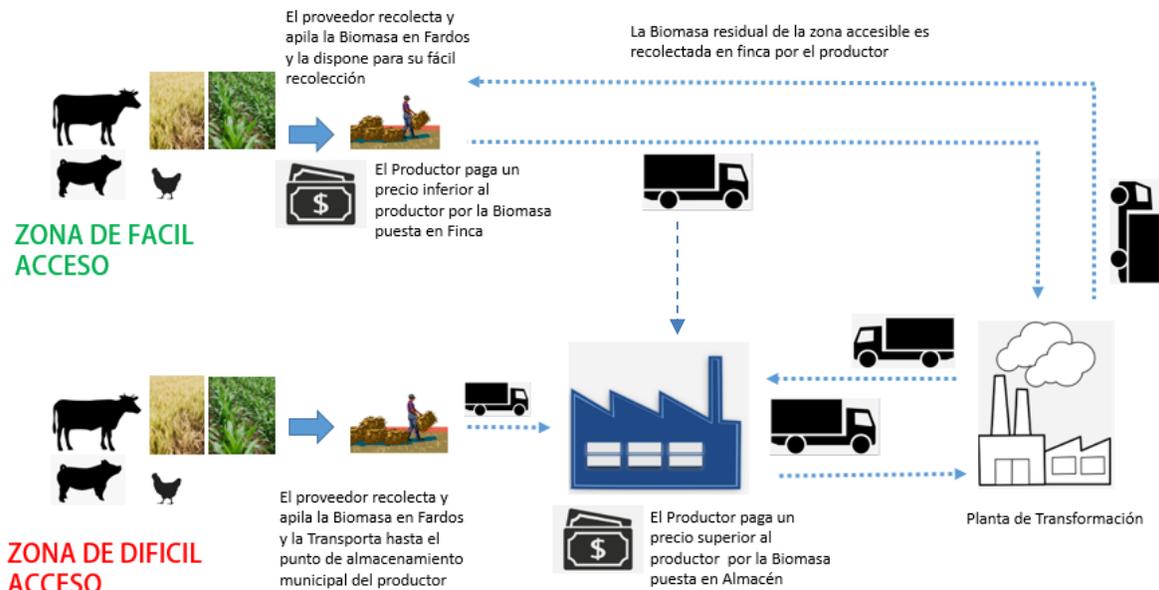


Ilustración 1. Esquema de Operación Logística, Elaboración propia (Gómez, J, Ponton N)

VARIABLES BINARIAS

- Z_j = Planta de Procesamiento de Biomasa residual ubicada en el municipio j.
- A_{ijk} = Flujo de Biomasa residual agrícola k transportadas desde el municipio i en finca para ser procesadas en la planta ubicada en el municipio j.
- B_{ijk} = Flujo de Biomasa residual agrícola K transportadas desde el municipio i en Almacén para ser procesadas en la planta ubicada en el municipio j.
- C_{ijm} = Flujo de Biomasa residual Pecuaria m transportadas desde el municipio i en finca para ser procesadas en la planta ubicada en el municipio j.
- D_{ijm} = Flujo de Biomasa residual Pecuaria m transportadas desde el municipio i en Almacén para ser procesadas en la planta ubicada en el municipio j.

Parámetros

Cantidad de biomasa

Se debe contabilizar la cantidad total de las distintas biomásas residuales tanto agrícolas como pecuarias para cada una de las regiones en dos matrices:

- α_{ik} = Matriz con las Toneladas anuales de Biomasa residual agrícola k en el municipio i anuales.
- β_{im} = Matriz con las Toneladas anuales de Biomasa residual Pecuaria m en el municipio i anuales.

Costo de compra de la biomasa y acceso

Se debe tener los costos de compra por tonelada para cada uno de los tipos de compra (en finca o en almacén) y para cada una de los dos tipos de biomasa residual y sus variedades. Por otra parte, se debe tener presente cual es la cantidad de biomasa accesible en finca y así mismo la cantidad no accesible en finca y que debe ser comprada en almacén mediante un índice aproximado.

Se definen los siguientes parámetros:

- θ_k = costo de compra por tonelada de la biomasa residual agrícola K en finca.
- ι_k = Costo de compra por tonelada de la biomasa residual agrícola K en almacén.
- λ_m = Costo de compra por tonelada de la biomasa residual pecuaria m en finca.
- μ_m = Costo de compra por tonelada de la biomasa residual pecuaria m en almacén.
- η = Porcentaje de accesibilidad.
- φ_k = número promedio de cosechas al año de la biomasa k.

El costo de transporte

El costo de transporte es directamente proporcional a la distancia recorrida en kilómetros y a las toneladas transportadas multiplicadas por una constante de proporcionalidad que a menudo la tienen calculada para regiones particulares (Toro, Santa, & Granada, 2013). El costo de transporte se organiza en una matriz de doble entrada que contiene las distancias entre las regiones i j multiplicada por un parámetro. Por lo tanto, se define:

-
- γ_{ij} =Matriz de doble entrada con en donde se denota la distancia en kilómetros de la i-ésima región hasta la j-ésima región (Km).
 - g =Costo de transporte por kilómetro por tonelada $\left(\frac{\$}{Km*Tonelada}\right)$.

Potencial energético, y energía requerida y precio de venta del Tera julio

La selección de la cantidad y la calidad de las biomásas residuales dependen del modelo energético, en el modelo pull se determina una cantidad de energía requerida. En este modelo la energía requerida es un porcentaje del consumo energético actual en la zona de estudio determinado por las necesidades o tendencias del mercado. Para suavizar el modelo se tendrá un porcentaje inferior y un porcentaje superior. Como se mencionó anteriormente este modelo es de maximización de utilidad por lo tanto también debe establecerse el precio de mercado del Tera julio de energía producido.

Se definen los siguientes parámetros:

- δ_k =Potencial energético por tonelada de la biomasa residual agrícola K.
- ϵ_m =Potencial energético por tonelada de la biomasa residual pecuaria m.
- χ = Energía consumida anual en la zona.
- p =Porcentaje mínima de energía requerida anual.
- s =Porcentaje máximo de energía requerida anual.
- ζ =precio de venta por Tera julio.

Cantidad de biomásas residual

La cantidad de biomasa residual agrícola recolectada se determina por el área sembrada, el rendimiento del cultivo y el periodo de tiempo que toma cada especie en ser cosechada desde el momento que se siembra. Existen diversas formas de cuantificar la producción agrícola de una región particular. Para regiones no estacionales la cosecha de productos agrícolas se distribuye uniformemente a través del año con una gran variabilidad en los tiempos de cosecha y recolección. La única forma de conocer con exactitud la producción agrícola total para una fecha y región dada es llevando a cabo un

censo que contenga la información sobre los cultivos, las áreas, las fechas de siembra, los tiempos de cosecha, y el rendimiento por hectárea.

Para determinar la cantidad de biomasa residual pecuaria generada en una región y fecha dada, el censo solo depende de la cuantificación del número de cabezas de las distintas especies pecuarias presentes y la tasa de generación para cada una de estas. Cabe mencionar que la generación de residuos también depende de la edad y estado de maduración de la especie pecuaria (UPME, 2010).

Costos de almacenamiento

Dada la dificultad de llevar a cabo un registro y la complejidad añadida a la modelación matemática de una cadena de abastecimiento de la Biomasa residual se debe optar por un método que estime el inventario promedio.

El modelo de pedido fijo (EOQ) para inventarios permite hallar los costos totales de ordenar, almacenar y comprar cierta cantidad fija de artículos para ser consumidos a una tasa constante hasta su agotamiento. El número de pedidos se hace en cantidades y lapsos de tiempos fijos durante el transcurso de la operación. (*Chase, Jacobs, & Aquilano, 2009*). Estos modelos por lo general se evalúan a un año y la demanda anual es igual a la cantidad adquirida en el pedido multiplicado por el número de pedidos en el año. En este modelo el inventario promedio consiste en la mitad de la cantidad adquirida en cada pedido. La expresión matemática de este modelo se expone a continuación:

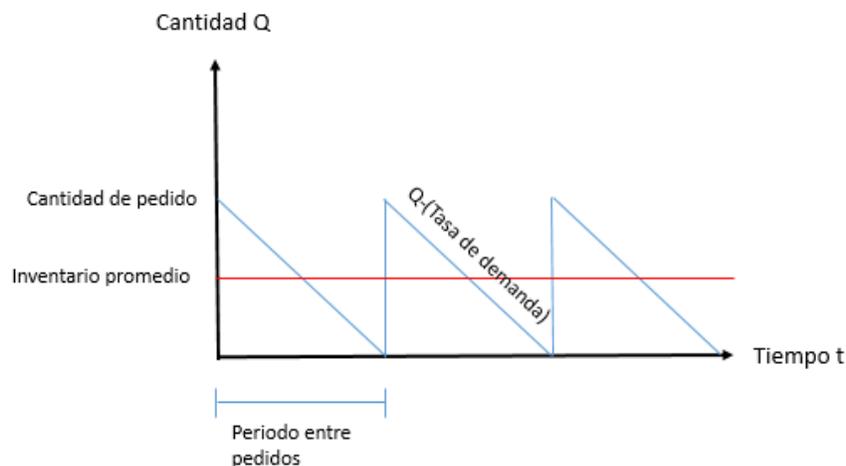


Ilustración 2. Modelo de Inventario, cantidad adquirida en cada pedido. Elaboración propia a partir de (Chase, Jacobs, & Aquilano, 2009)

En donde el costo de mantener el inventario promedio es:

$$- \frac{Q}{2} * h$$

Donde:

- Q: Cantidad de pedido (unidades)
- h: costo de conservar $\left(\frac{\$}{Unidad * Año}\right)$.

Este modelo con unas modificaciones se aplicará para determinar el costo del inventario promedio de la Biomasa residual agrícola en regiones no estacionales, observando que se cumplen todas las condiciones: Existe una cantidad de pedido fijo (Cosecha), Un periodo fijo de reabastecimiento (Tiempo entre cosechas), Un horizonte temporal de un año para el cálculo de cadenas de abastecimiento de este tipo y una tasa de demanda de energía constante (establecida por el modelo productivo de producción de pull). En la siguiente grafica se expone este comportamiento.

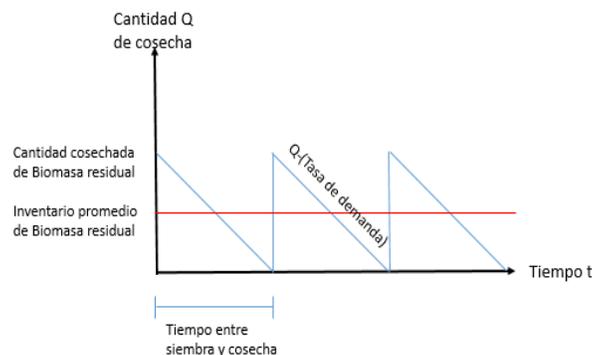


Ilustración 3. Modelo de Inventario, cantidad de pedido fijo (Cosecha), elaboración propia a partir de (Chase, Jacobs, & Aquilano, 2009)

Para el aprovisionamiento de Biomasa residual en regiones sin estaciones se tienen muchas fechas de cosecha diferentes debido a que diferentes productores cultivan en diferentes periodos un mismo producto agrícola, pero el tiempo que pasa entre una siembra y una cosecha dadas es aproximadamente uniforme. Por lo tanto, el inventario promedio sigue siendo el mismo independiente de la fecha de siembra. Observe el comportamiento en la siguiente grafica.

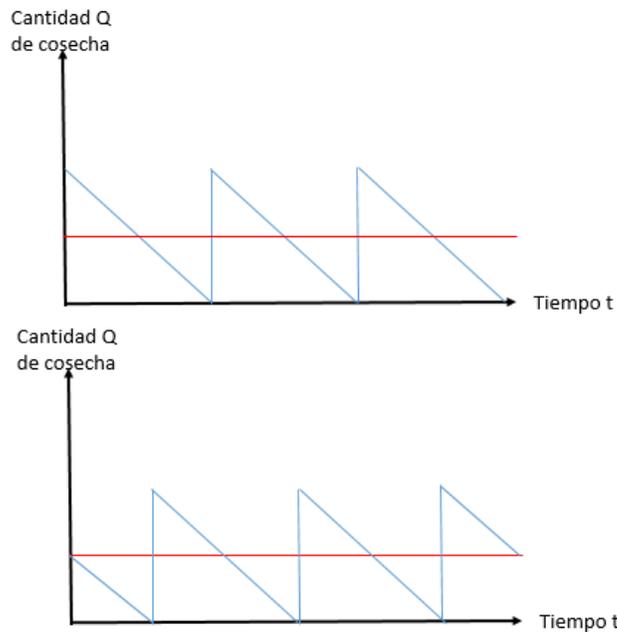


Ilustración 4. Modelo de Inventario fechas de cosecha diferentes, elaboración propia

Por otro lado, cuando la cantidad generada varía entre las distintas cosechas, se puede calcular el promedio de inventario de biomasa residual global el cual es igual al promedio de la suma de las cosechas. Gráficamente:

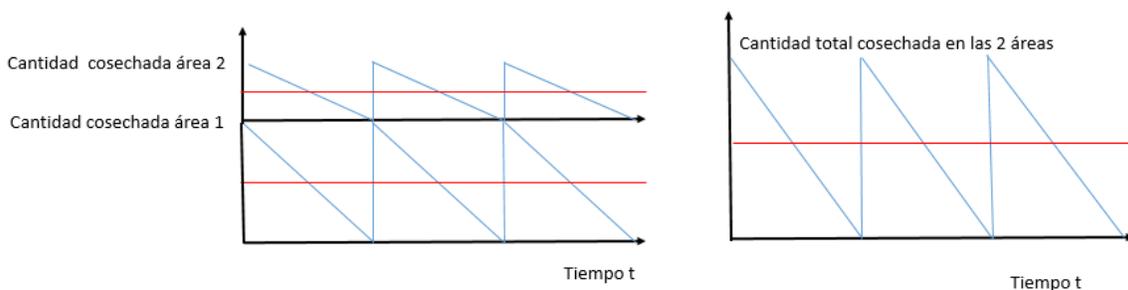


Ilustración 5. Modelo promedio de inventario de biomasa residual global, elaboración propia

Se concluye que, si se conoce la producción anual de un producto agrícola sembrado y cosechado en una región determinada y se conoce también el periodo normal que transcurre entre la siembra y la cosecha de una biomasa residual agrícola k y de esta forma el número promedio de cosechas al año de una biomasa residual agrícola k , y

teniendo adicionalmente la condición de que existe una tasa de demanda constante de esta materia prima para la conversión de energía. Se puede calcular entonces el inventario promedio a fin de calcular los costos de mantener y almacenar el inventario.

Se debe definir el parámetro:

- φ_k =numero promedio de cosechas al año de la biomasa k.
- Por lo tanto:
- $q = \frac{\alpha_{ik}}{\varphi_k}$ = Cantidad de pedido o cantidad cosechada en una región i de una biomasa residual agrícola k.
- $\frac{q}{2} = \frac{\alpha_{ik}}{2\varphi_k}$ =Inventario promedio en una región i de una biomasa residual agrícola k en toneladas al año.

Para múltiples biomásas residuales agrícolas que tienen diferentes lapsos de tiempo entre la siembra y la cosecha se debe calcular uno por uno los inventarios promedios anuales de cada especie y así calcular los costos de almacenamiento totales. La diferencia de esta aplicación y la tradicional del EOQ es que aquí no es posible hallar una cantidad optima de pedido debido la naturaleza de la cadena de abastecimiento.

El inventario promedio se maneja en metros cúbicos puesto que para calcular el costo de mantener se requiere del cálculo del volumen ocupado y no del peso debido a la baja densidad de estos materiales. De esta forma se deben convertir las toneladas de biomasa en metros cúbicos multiplicándolas por su volumen específico. Se define el siguiente parámetro:

- ζ_k =Volumen específico de la biomasa residual agrícola k. Unidades $\frac{m^3}{Ton}$.

Por lo tanto:

- $\frac{Q}{2} = \frac{\alpha_{ik} * \zeta_k}{2\varphi_k}$ = Inventario promedio anual de biomasa residual agrícola k en la región i en metros cúbicos al año.

En donde:

El costo de almacenamiento depende del área en metros cuadrados requerida para almacenar la biomasa residual agrícola. Por lo tanto, se define el siguiente parámetro;

- ϵ_i = costo por metro cuadrado anual promedio en bodega en la región i en $\frac{\$COP}{m^2}$.

Teniendo en cuenta que la altura máxima para apilar la materia prima es de 3 metros en un sistema de almacenamiento sencillo de recubrimiento de película plástica y que otra parte, el costo anual de mantener esta operación es del 4% del costo de la inversión anual en la capacidad (Ko, Lautala, & Handler, 2018). Por lo tanto:

- $h = \frac{\epsilon_i}{3} * (1,04) : \frac{\$COP}{m^3}$ = costo unitario de almacenar un metro cubico de biomasa en la región i un año.

Sintetizando el costo de mantener el inventario promedio es:

- $(1) \cdot \frac{\alpha_{ik} * \zeta_k}{6\phi_k} * \epsilon_i * (1,04)$ = Costo de mantener el inventario promedio de la biomasa residual k en la región i al año.

Producción de energía

Para la generación de energía a partir de la biomasa residual se debe establecer un tope de producción coherente con el comportamiento del mercado energético actual. De acuerdo a las tendencias, la ocupación de la energía proveniente de la biomasa residual en el mercado energético estará ubicada entre un 3% y un 8% de la energía total consumida.

Por lo tanto, se debe tener el siguiente tope:

- *Energía de la biomasa residual a generar* \leq (*Consumo de energía total*) * X%.

Emisión de gases de efecto invernadero

El CO₂ es el gas de efecto invernadero con mayor prevalencia y representa en promedio más del 95% del impacto en el cambio climático que proviene de la quema de

combustibles. Con el fin de simplificar los cálculos se tomará el CO₂ como medida de los gases de efecto invernadero por esta prevalencia.

Mediante el modelo propuesto por (Environmental Defense Fund, 2022) se puede calcular de forma aproximada la cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero (CO₂) producto del transporte terrestre con un factor de emisión que varía dependiendo del medio de transporte y el tipo específico. Multiplicado por los kilómetros y las toneladas recorridas. Por lo tanto, se define el parámetro:

- κ = Factor de emisión: $\left(\frac{\text{Toneladas de CO}_2}{\text{KM} * \text{TON}} \right)$

Y de esta forma se puede calcular:

- $\text{Emisiones de Co}_2 = \gamma_{ij} * \alpha_{ik} * \kappa = \text{Ton CO}_2$

La expresión que calcula las emisiones producto de la distancia recorrida total en la operación para recolectar una biomasa agrícola o pecuaria en finca o en almacén en una región i para ser procesada en una planta j al cabo de un año está dada por:

- $\alpha_{ik} \gamma_{ij} \kappa \eta + \alpha_{ik} \gamma_{ij} \kappa (1 - \eta) + \beta_{im} \gamma_{ij} \kappa \eta + \beta_{im} \gamma_{ij} \kappa (1 - \eta)$

Se debe tener en cuenta que no solo está el transporte del camión con carga llena sino también el transporte de este mismo sin carga desde la planta hasta el punto de recolección y las emisiones generadas en este caso calculan con el peso neto del camión y la distancia recorrida. La distancia recorrida depende del número de viajes realizados y a su vez, este número de viajes depende de la cantidad en toneladas máximas que puede cargar un camión por lo tanto se deduce la siguiente expresión:

- $\text{Numero de viajes} = \frac{\text{Toneladas transportadas}}{\text{Capacidad máxima del camión en toneladas}}$

En donde la capacidad máxima es un parámetro que debe establecerse y así:

- ω = capacidad en toneladas del camión
- θ = Peso neto del camión (sin carga)

Por lo tanto, las emisiones debido al número de viajes requeridos para recolectar alguna biomasa pecuaria o agrícola, en finca o almacén, a cierta distancia, dado un factor de acceso, una capacidad de carga, un peso neto del camión (vacío) y un factor de emisión está dada por:

$$(2) \frac{aik*\eta*\gamma_{ij}N\Theta}{\omega} + \frac{aik*(1-\eta)*\gamma_{ij}N\Theta}{\omega} + \frac{\beta_{im}*\eta*\gamma_{ij}N\Theta}{\omega} + \frac{\beta_{im}*(1-\eta)*\gamma_{ij}N\Theta}{\omega}.$$

Las emisiones de gases de efecto invernadero producto de esta operación logística no deben ser superiores las emisiones a la hora de generar esta misma cantidad de energía con los combustibles fósiles, por lo tanto, debe establecerse un límite. así se tiene el parámetro:

- κ = Toneladas de gases de efecto invernadero provenientes de la energía generada de los combustibles fósiles. Unidades: $\frac{\text{Toneladas de CO}_2}{\text{Tera julio}}$.

Por otra parte, se debe establecer que la emisión de gases de efecto invernadero que generara la conversión de los distintos tipos de biomasa residual agrícola y pecuaria en energía es neutra (UPME, 2022). Lo anterior se debe a que el CO₂ emitido en su combustión es el mismo que fue captado por las plantas en crecimiento (Lucas. A, Del peso C. 2012).

Modelo

Función objetivo maximizar

$$\begin{aligned}
 (3) \quad & 0 * \sum_{j=1}^p z_j + \zeta \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^p \sum_{k=1}^q \eta \delta_k \alpha_{ik} A_{ijk} + \zeta \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^p \sum_{k=1}^q (1 - \eta) \delta_k \alpha_{ik} B_{ijk} \\
 & + \zeta \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^p \sum_{m=1}^r \eta \varepsilon_m \beta_{im} C_{ijm} + \zeta \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^p \sum_{m=1}^r (1 - \eta) \varepsilon_m \beta_{im} D_{ijm} \\
 & - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^p \sum_{k=1}^q \eta * g * \gamma_{ij} \alpha_{ik} A_{ijk} - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^p \sum_{k=1}^q (1 - \eta) * g * \gamma_{ij} \alpha_{ik} B_{ijk} \\
 & - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^p \sum_{m=1}^r \eta * g * \gamma_{ij} \alpha_{im} C_{ijm} \\
 & - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^p \sum_{m=1}^r \eta * g * \gamma_{ij} \alpha_{im} D_{ijm} - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^p \sum_{k=1}^q \eta \theta_k \alpha_{ik} A_{ijk} \\
 & - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^p \sum_{k=1}^q (1 - \eta) \iota_k \alpha_{ik} B_{ijk} - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^p \sum_{m=1}^r \eta \lambda_m \beta_{im} C_{ijm} \\
 & - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^p \sum_{m=1}^r (1 - \eta) \mu_m \alpha_{im} D_{ijm} - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^p \sum_{k=1}^q \frac{\eta \alpha_{ik} \varsigma_k 1,04 \epsilon_i A_{ijk}}{6 \phi_k} \\
 & - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^p \sum_{k=1}^q \frac{(1 - \eta) \alpha_{ik} \varsigma_k 1,04 \epsilon_i * B_{ijk}}{6 \phi_k}
 \end{aligned}$$

Explicación

| | |
|--|---|
| $\zeta \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^p \sum_{k=1}^q \eta \delta_k \alpha_{ik} A_{ijk}$ | <p>Utilidad por venta de energía en Tera julios producto de enviar k biomasas residuales agrícolas adquiridas en finca y enviadas a una planta ubicada en j para ser procesadas</p> |
| $\zeta \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^p \sum_{k=1}^q (1 - \eta) \delta_k \alpha_{ik} B_{ijk}$ | <p>Utilidad por venta de energía en Tera julios producto de enviar k biomasas residuales agrícolas adquiridas en Almacén y enviadas a una planta ubicada en j para ser procesadas</p> |

| | |
|--|---|
| $\zeta \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^p \sum_{m=1}^r \eta \varepsilon_m \beta_{im} C_{ijm}$ | Utilidad por venta de energía en Tera julios producto de enviar m biomasa residual pecuarias adquiridas en finca y enviadas a una planta ubicada en j para ser procesadas |
| $\zeta \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^p \sum_{m=1}^r (1 - \eta) \varepsilon_m \beta_{im} D_{ijm}$ | Utilidad por venta de energía en Tera julios producto de enviar m biomasa residual pecuarias adquiridas en almacén y enviadas a una planta ubicada en j para ser procesadas |
| $\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^p \sum_{k=1}^q \eta * g * \gamma_{ij} \alpha_{ik} A_{ijk}$ | Costo por Transportar toneladas de biomasa residual agrícola k en finca desde región i hasta la región j de acuerdo al porcentaje de acceso |
| $\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^p \sum_{k=1}^q (1 - \eta) * g * \gamma_{ij} \alpha_{ik} B_{ijk}$ | Costo por Transportar toneladas de biomasa residual agrícola k en almacén desde región i hasta la región j. |
| $\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^p \sum_{m=1}^r \eta * g * \gamma_{ij} \alpha_{im} C_{ijm}$ | Costo por Transportar toneladas de biomasa residual pecuarias m en finca desde región i hasta la región j. De acuerdo al porcentaje de acceso |
| $\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^p \sum_{m=1}^r \eta * g * \gamma_{ij} \alpha_{im} D_{ijm}$ | Costo por Transportar toneladas de biomasa residual pecuarias m en almacén desde región i hasta la región j |
| $\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^p \sum_{k=1}^q \eta \theta_k \alpha_{ik} A_{ijk}$ | Costo de compra de la biomasa residual agrícola k comprada en finca en la región i para ser procesada en la planta en la región j |
| $\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^p \sum_{k=1}^q (1 - \eta) \iota_k \alpha_{ik} B_{ijk}$ | Costo de compra de la biomasa residual agrícola k comprada en almacén en la |

| | |
|---|--|
| | región i para ser procesada en la planta en la región j |
| $\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^p \sum_{m=1}^r \eta \lambda_m \beta_{im} C_{ijm}$ | Costo de compra de la biomasa residual pecuaria m comprada en finca en la región i para ser procesada en la planta en la región j |
| $\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^p \sum_{m=1}^r (1 - \eta) \mu_m \alpha_{im} D_{ijm}$ | Costo de compra de la biomasa residual pecuaria m comprada en almacén en la región i para ser procesada en la planta en la región j |
| $\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^p \sum_{k=1}^q \frac{\eta \alpha_{ik} \zeta_k 1,04 \epsilon_i A_{ijk}}{6 \varphi_k}$ | Costo de almacenamiento anual de la biomasa residual agrícola k comprada en finca en la región i para ser procesada en la planta j |
| $\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^p \sum_{k=1}^q \frac{(1 - \eta) \alpha_{ik} \zeta_k 1,04 \epsilon_i B_{ijk}}{6 \varphi_k}$ | Costo de almacenamiento anual de la biomasa residual agrícola k comprada en almacén en la región i para ser procesada en la planta j |
| $0 * \sum_{j=1}^p z_j$ | Indica que solo puede haber una ubicación. |

Tabla 1. Descripción, función objetivo maximizar, Elaboración Propia

Restricciones

$$(4) A_{ijk} - B_{ijk} \geq 0$$

Indicando que solo existe flujo de Biomasa residual agrícola k en almacén originada en el municipio i para ser procesada en la planta ubicada en el municipio j si y solo si existe flujo de biomasa residual agrícola k en finca originada en el municipio i para ser procesada en la planta ubicada en el municipio j.

$$(5) C_{ijm} - D_{ijm} \geq 0$$

Indicando que solo existe flujo de Biomasa residual Pecuaria m en almacén originada en el municipio i para ser procesada en la planta ubicada en el municipio j si y solo si existe flujo de biomasa residual Pecuaria m en finca originada en el municipio i para ser procesada en la planta ubicada en el municipio j .

$$(6) \sum_{j=1}^p Z_j = 1$$

$$(7) \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^q A_{ijk} \leq Z_j, \quad \forall j \in p$$

$$(8) \sum_{i=1}^n \sum_{m=1}^r C_{ijk} \leq Z_j, \quad \forall j \in p$$

Estas restricciones establecen que solo puede haber una sola planta de procesamiento que se ubicara en el municipio j a las cuales les llegarán los flujos de biomasa residual agrícola y pecuaria de cualquier especie de los municipios que se requieran.

$$(9) \sum_{i=1}^n \sum_j^p A_{ijk} \leq 1 \quad \forall k \in q$$

$$(10) \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^p B_{ijm} \leq 1 \quad \forall m \in r$$

Este conjunto de restricciones establece que no se debe superar la cantidad de biomasa residual agrícola y pecuaria hallada en cada una de las regiones.

$$\begin{aligned}
 (11) \quad & \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^p \sum_{k=1}^q \eta \delta_k \alpha_{ik} A_{ijk} \\
 & + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^p \sum_{k=1}^q (1 - \eta) \delta_k \alpha_{ik} B_{ijk} \\
 & + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^p \sum_{m=1}^r \eta \varepsilon_m \beta_{im} C_{ijm} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^p \sum_{m=1}^r (1 - \eta) \varepsilon_m \beta_{im} D_{ijm} \geq v\chi
 \end{aligned}$$

Esta restricción establece el mínimo que se debe producir de energía anual de acuerdo un porcentaje del consumo energético convencional.

$$\begin{aligned}
 (12) \quad & \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^p \sum_{k=1}^q \eta \delta_k \alpha_{ik} A_{ijk} \\
 & + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^p \sum_{k=1}^q (1 - \eta) \delta_k \alpha_{ik} B_{ijk} \\
 & + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^p \sum_{m=1}^r \eta \varepsilon_m \beta_{im} C_{ijm} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^p \sum_{m=1}^r (1 - \eta) \varepsilon_m \beta_{im} D_{ijm} \leq s\chi
 \end{aligned}$$

Esta restricción establece el Máximo que se debe producir de energía anual de acuerdo un porcentaje del consumo energético convencional

$$\begin{aligned}
(13) \quad & \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^p \sum_{k=1}^q A_{ijk} \alpha_{ik} \gamma_{ij} \aleph \eta \\
& + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^p \sum_{k=1}^q B_{ijk} a_{ik} \gamma_{ij} \aleph (1 - \eta) \\
& + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^p \sum_{m=1}^r C_{ijm} \beta_{im} \gamma_{ij} \aleph \eta \\
& + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^p \sum_{m=1}^r D_{ijm} \beta_{im} \gamma_{ij} \aleph (1 - \eta) + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^p \sum_{k=1}^q A_{ijk} \frac{a_{ik}}{\varpi} y_{ij} \aleph \eta \Theta \\
& + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^p \sum_{k=1}^q B_{ijk} \frac{a_{ik}}{\varpi} y_{ij} \aleph (1 - \eta) \Theta + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^p \sum_{m=1}^r C_{ijm} \frac{\beta_{im}}{\varpi} y_{ij} \aleph \eta \Theta \\
& + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^p \sum_{m=1}^r D_{ijm} \frac{\beta_{im}}{\varpi} y_{ij} \aleph (1 - \eta) \Theta \\
& \leq \kappa \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^p \sum_{k=1}^q A_{ijk} \delta_k \alpha_{ik} \eta + \kappa \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^p \sum_{k=1}^q B_{ijk} \delta_k a_{ik} (1 - \eta) \\
& + \kappa \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^p \sum_{m=1}^r C_{ijm} \varepsilon_m \beta_{im} \eta + \kappa \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^p \sum_{m=1}^r D_{ijm} \varepsilon_m \beta_{im} (1 - \eta)
\end{aligned}$$

Esta restricción establece que la operación de recolección desde la planta hasta los puntos de generación más el transporte desde los puntos de generación de la biomasa residual hasta la planta de producción no puede superar las emisiones producto de producir esta misma energía con combustibles fósiles. Es decir, esta restricción establece el ahorro en emisiones de gases de efecto invernadero.

- (14) $A_{ijk}, B_{ijk}, C_{ijm}, D_{ijm}, Z_j$ son variables binarias no negativas.

Análisis de datos

Cundinamarca es un departamento ubicado en la república de Colombia. Se sitúa sobre la cordillera oriental, presentando un relieve variado de planicies, montañas y

colinas que tienen elevaciones que parten de los 300 msnm hasta los 3500 msnm (Gobernación de Cundinamarca, 2020). Cundinamarca Se localiza en el interior del país, contando con una superficie 22.779,21 km² lo que representa el 2.12 % del territorio nacional, se conforma por 116 municipios organizados en 15 provincias. El 99,16% de este territorio se encuentra en zona rural (Gobernación de Cundinamarca, 2020).

A continuación, se expondrá el mapa de Cundinamarca con sus municipios:

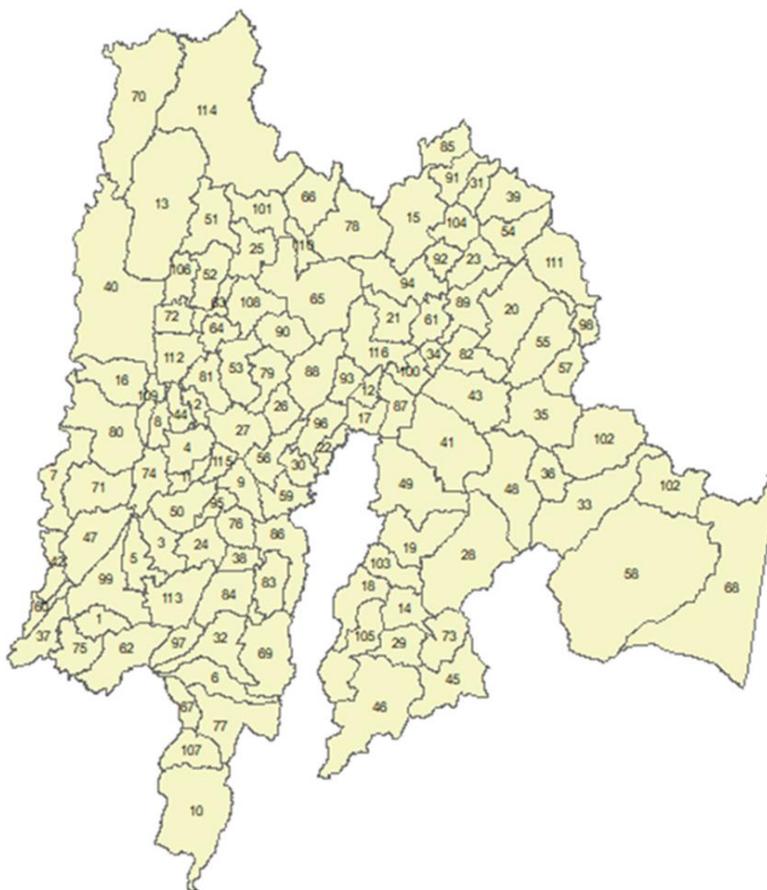


Ilustración 6. mapa de Cundinamarca con sus municipios. A partir de (Instituto geográfico Agustín Codazzi, 2022). Elaboración Propia

| | | | | | |
|----------------------|----------------|-------------------------|-------------------------------|----------------|------------------|
| 1. Agua de Dios | 21. Cogua | 41. Guasca | 61. Nemocón | 81. Sasaima | 101. Topaipí |
| 2. Albán | 22. Cota | 42. Guataquí | 62. Nilo | 82. Sesquilé | 102. Ubalá |
| 3. Anapoima | 23. Cucunubá | 43. Guatavita | 63. Nimaima | 83. Sibaté | 103. Ubaque |
| 4. Anolaima | 24. El Colegio | 44. Guayabal de Siquima | 64. Nocaima | 84. Silvania | 104. Ubaté |
| 5. Apulo | 25. El Peñón | 45. Guayabetal | 65. Pacho | 85. Simijaca | 105. Une |
| 6. Arbeláez | 26. El Rosal | 46. Gutiérrez | 66. Paima | 86. Soacha | 106. Útica |
| 7. Beltrán | 27. Facatativá | 47. Jerusalén | 67. Pandí | 87. Sopó | 107. Venecia |
| 8. Bituima | 28. Fómeque | 48. Junín | 68. Paratebuena | 88. Subachoque | 108. Vergara |
| 9. Bojacá | 29. Fosca | 49. La Calera | 69. Pasca | 89. Suesca | 109. Vianí |
| 10. Cabrera | 30. Funza | 50. La Mesa | 70. Puerto Salgar | 90. Supatá | 110. Villagómez |
| 11. Cachipay | 31. Fúquene | 51. La Palma | 71. Pulí | 91. Susa | 111. Villapinzón |
| 12. Cajicá | 32. Fusagasugá | 52. La Peña | 72. Quebradanegra | 92. Sutatausa | 112. Villeta |
| 13. Caparrapí | 33. Gachalá | 53. La Vega | 73. Quetame | 93. Tabio | 113. Viotá |
| 14. Cáqueza | 34. Gachancipá | 54. Lenguazaque | 74. Quipile | 94. Tausa | 114. Yacopí |
| 15. Carmen de Carupa | 35. Gachetá | 55. Machetá | 75. Ricaurte | 95. Tena | 115. Zipacón |
| 16. Chaguani | 36. Gama | 56. Madrid | 76. San Antonio de Tequendama | 96. Tenjo | 116. Zipaquirá |
| 17. Chía | 37. Girardot | 57. Manta | 77. San Bernardo | 97. Tibacuy | |
| 18. Chipaque | 38. Granada | 58. Medina | 78. San Cayetano | 98. Tibirita | |
| 19. Choachí | 39. Guachetá | 59. Mosquera | 79. San Francisco | 99. Tocaima | |
| 20. Chocontá | 40. Guaduas | 60. Nariño | 80. San Juan de Rioseco | 100. Tocancipá | |

Ilustración 7. Descripción de los Municipios a partir de (Instituto geográfico Agustín Codazzi, 2022). elaboración propia

Cundinamarca tiene en proporción el 73,5% de las redes viales (primarias, secundarias y terciarias) en buen estado (Gobernación de Cundinamarca, 2020). Por otra parte, están las carreteras secundarias que sirven de integración regional e intermunicipal, de las cuales únicamente el 5% está en buen estado, el 85% en estado regular y el resto en mal estado (Gobernación de Cundinamarca, 2020). Se presume entonces con lo anterior que el porcentaje de fácil acceso que puede ser comprado y recolectado en la finca del productor es del 73,5%, especialmente por el tipo de camión a utilizar; el 22,5% puede comprarse solo si existe la necesidad, con la condición de que el productor lo desplace desde el área rural hasta el área urbana del municipio al que pertenece en un almacén, esta biomasa se le compra a un precio superior al productor por este haberse encargado de esta parte del transporte.

Se define el parámetro acceso:

$$\eta = 0,735$$

En Cundinamarca existen alrededor de 120 tipos de cultivo) de los cuales los más representativos y con un mayor factor de residuo son: la Caña Panelera, el Café, el Maíz, el Plátano, la Palma de Aceite, el Banano, la papa, el tomate, la lechuga, el mango, la zanahoria y la cebolla de bulbo (Gobernación de Cundinamarca, 2020).

Para el (UPME, 2010) en Cundinamarca los cultivos cuya biomasa residual es idónea para ser transformada en energía debido a su poder calorífico inferior, su factor de residuo y su disponibilidad son: el maíz, la palma de aceite, el banano, el plátano, la caña panelera y el café. En este escenario se trabajará con la biomasa residual producto de estos seis cultivos. Inicialmente se brindará información del tipo de residuo, el factor de residuo, el porcentaje de residuo seco, y su poder calorífico inferior de cada tipo de biomasa residual agrícola para poder calcular el potencial energético dada una cantidad de residuos.

| Cultivo | Tipo | Factor de residuo Tonelada de residuo/toneladas de producto principal | Valor calorífico inferior Tera julio/Tonelada | Porcentaje de residuo seco |
|--------------------|-----------------------|---|---|----------------------------------|
| CAÑA PANELERA | Bagazo | 2,68 | 0,01865638 | 82,26% |
| | Hojas - cogollo | 3,26 | 0,01542417 | 24,61% |
| CAFE | Pulpa | 2,13 | 0,01783158 | 20,14% |
| | Cisco | 0,21 | 0,01854752 | 90,96% |
| | Tallos | 3,02 | 0,01835493 | 73,82% |
| MAIZ | Rastrojo | 0,93 | 0,01435654 | 68,79% |
| | Tusa | 0,27 | 0,01419325 | 73,31% |
| | Capacho | 0,21 | 0,01597264 | 95,47% |
| PLATANO | Raquis | 1,00 | 0,00756973 | 5,67% |
| | Vástago | 5,00 | 0,00850758 | 6,63% |
| | Plátano de rechazo | 0,15 | 0,00859550 | 20,46% |
| PALMA DE ACEITE | Cuesco | 0,22 | 0,01669696 | 82,02% |
| | Fibra | 0,63 | 0,01789438 | 68,95% |
| | Raquis de palma | 1,06 | 0,01683512 | 42,45% |
| BANANO | Raquis | 1,00 | 0,00757392 | 5,67% |
| | Vástago | 5,00 | 0,00850758 | 6,63% |
| | Banano de rechazo | 0,15 | 0,01041676 | 16,88% |

Tabla 2. Información del UPME (2020) y (Phyllis 2, 2022)Elaboración Propia

El promedio del potencial energético en Tera julios por tonelada de estas biomásas residuales agrícolas se expone a continuación:

| δ_k : Potencial energético de las biomásas residuales agrícolas en Tera julios/Tonelada | |
|--|------------|
| Potencial energético de la biomasa residual Agrícola de café | 0,03401169 |
| Potencial energético de la biomasa residual Agrícola de maíz | 0,03552856 |
| Potencial energético de la biomasa residual Agrícola de palma de aceite | 0,03317945 |
| Potencial energético de la biomasa residual Agrícola de caña panelera | 0,01914317 |
| Potencial energético de la biomasa residual Agrícola de banano | 0,00275128 |
| Potencial energético de la biomasa residual Agrícola de plátano | 0,00275129 |

Tabla 3. Potencial energético de las biomásas residuales agrícolas a partir de (Phyllis 2, 2022) y (UPME, 2010), Elaboración Propia

Para la recolección de datos pecuarios se tomó el último censo realizado en el año 2020 realizado por el ICA, del cual se obtuvo información acerca las especies pecuarias de mayor rotación en los municipios del departamento de Cundinamarca. En este censo también se cuenta con la información del número de cabezas por cada especie en los distintos municipios. Dada la disponibilidad de información, este caso utilizara para su análisis la biomasa residual pecuaria de las especies bovinas, porcinas y avícolas.

A continuación, se expone el potencial energético de estas biomásas residuales pecuarias:

| ε_m : Potencial energético de las biomásas pecuarias en Tera julios/Tonelada | |
|--|---------|
| Potencial energético biomasa bovina | 0,00085 |
| Potencial energético biomasa porcina | 0,0015 |
| Potencial energético biomasa aviar | 0,00215 |

Tabla 4. Potencial energético de las biomásas pecuarias a partir de (López Martínez, Buriticá Arboleda, & Silva Lora, 2018), (UPME, 2010) elaboración propia

Las tasas de generación de residuos, y su potencial de energético fueron tomados del artículo de (López Martínez, Buriticá Arboleda, & Silva Lora, 2018) y (UPME, 2010) que a su vez se basaron en modelos de digestión anaerobia para todos los tipos de biomasa. En particular (Bhattacharya, 2005) presenta el modelo para las tasas de rendimiento de la biomasa residual agrícola y (Tchobanoglous, 1988) hace lo mismo para la biomasa residual pecuaria.

Costos de compra de la biomasa residual agrícola y Pecuaria:

El costo de la biomasa residual de la caña es de 6 dólares por tonelada (Gallagher, y otros, 2003). El costo de una tonelada de biomasa residual de maíz es 20 dólares (Institute of agriculture and natural resources, 2017). costo de tonelada de biomasa residual de café es de \$7,24 dólares (Martinez Hernandez, Amezcua Allieri, & Arbuto, 2021); el costo por tonelada de palma de aceite es en promedio 6,45 dólares por tonelada al igual que para el plátano y el banano (Jekayinfa & Scholz, 2007).

Por otra parte, el costo por tonelada de residuos vacunos y residuos aviares es de 14 y 28 dólares respectivamente (Bijarchiyan, Sahebi, & Mirzamohammadi, 2020). Una tonelada de estiércol porcícola cuesta 5,6 dólares (pigprogress, 2022). Añadido a lo anterior se tiene que el precio de venta de la biomasa residual puesta en finca es en promedio el 68% del precio de la biomasa cuando se empaca, embala y se transporta al almacén por parte del proveedor (Wortmann & Klein, 2017).

A continuación, se resume los costos de tonelada de biomasa residual Agrícola y pecuaria comprada en almacén y finca.

| t_k : Costo por tonelada de biomasa residual agrícola k comprada en almacén | |
|---|-------------|
| Biomasa residual Agrícola de café | \$28960 COP |
| Biomasa residual Agrícola de maíz | \$90511 COP |
| Biomasa residual Agrícola de palma de aceite | \$44315 COP |
| Biomasa residual Agrícola de caña panelera | \$50727 COP |
| Biomasa residual Agrícola de banana | \$44315 COP |
| Biomasa residual Agrícola de plátano | \$44315 COP |

Tabla 5. Costo por tonelada de biomasa residual agrícola k comprada en almacén, a partir de (Gallagher, y otros, 2003), (Martinez Hernandez, Amezcua Allieri, & Arbuto, 2021), (Institute of agriculture and natural resources, 2017), (Jekayinfa & Scholz, 2007) elaboración propia

Costos de tonelada de biomasa residual Agrícola comprada en Finca

| θ_k : Costo por tonelada de biomasa residual agrícola k comprada en finca | |
|--|----------------|
| Biomasa residual Agrícola de café | \$19766,34 COP |
| Biomasa residual Agrícola de maíz | \$61547,48 COP |
| Biomasa residual Agrícola de palma de aceite | \$30134,2 COP |
| Biomasa residual Agrícola de caña panelera | \$34494,36 COP |
| Biomasa residual Agrícola de banana | \$30134,2 COP |
| Biomasa residual Agrícola de plátano | \$30134,2 COP |

Tabla 6. Costo por tonelada de biomasa residual agrícola k comprada en finca, a partir de (Gallagher, y otros, 2003), (Martinez Hernandez, Amezcua Allieri, & Arbuto, 2021), (Institute of agriculture and natural resources, 2017), (Jekayinfa & Scholz, 2007) Elaboración Propia

Costos de tonelada de biomasa residual pecuaria comprada en Finca

| μ_m : Costo por tonelada de la biomasa residual pecuaria m comprada en almacén | |
|--|--------------|
| Biomasa residual pecuaria bovina | \$56000 COP |
| Biomasa residual pecuaria porcina | \$22400 COP |
| Biomasa residual pecuaria aviar | \$112000 COP |

Tabla 7. Costos de tonelada de biomasa residual pecuaria comprada en Finca a partir de (pigprogress, 2022), (Bijarchiyan, Sahebi, & Mirzamohammadi, 2020), (Wortmann & Klein, 2017). Elaboración Propia

| λ_m : Costo por tonelada de la biomasa residual pecuaria m comprada en finca | |
|--|-------------|
| Biomasa residual pecuaria bovina | \$38080 COP |
| Biomasa residual pecuaria porcina | \$15232 COP |
| Biomasa residual pecuaria aviar | \$76160 COP |

Tabla 8. Costo por tonelada de la biomasa residual pecuaria m comprada en finca, a partir de (pigprogress, 2022), (Bijarchiyan, Sahebi, & Mirzamohammadi, 2020), (Wortmann & Klein, 2017) elaboración propia

Como se mencionó anteriormente, la información del inventario de Biomasa se encuentra a nivel municipal lo que implica que serían 116 ubicaciones como fuentes de suministro y 116 zonas potenciales para ubicar una planta centralizada de transformación. Como se acostumbra en este tipo de modelos de programación lineal binaria se utilizará un sistema de información geográfico para simplificar el problema al englobar unos municipios dentro de 11 áreas diferentes con la condición de que dichas áreas sean lo más uniforme posible respecto a su área medida en Km². En el siguiente mapa se ilustra cada una de las áreas:

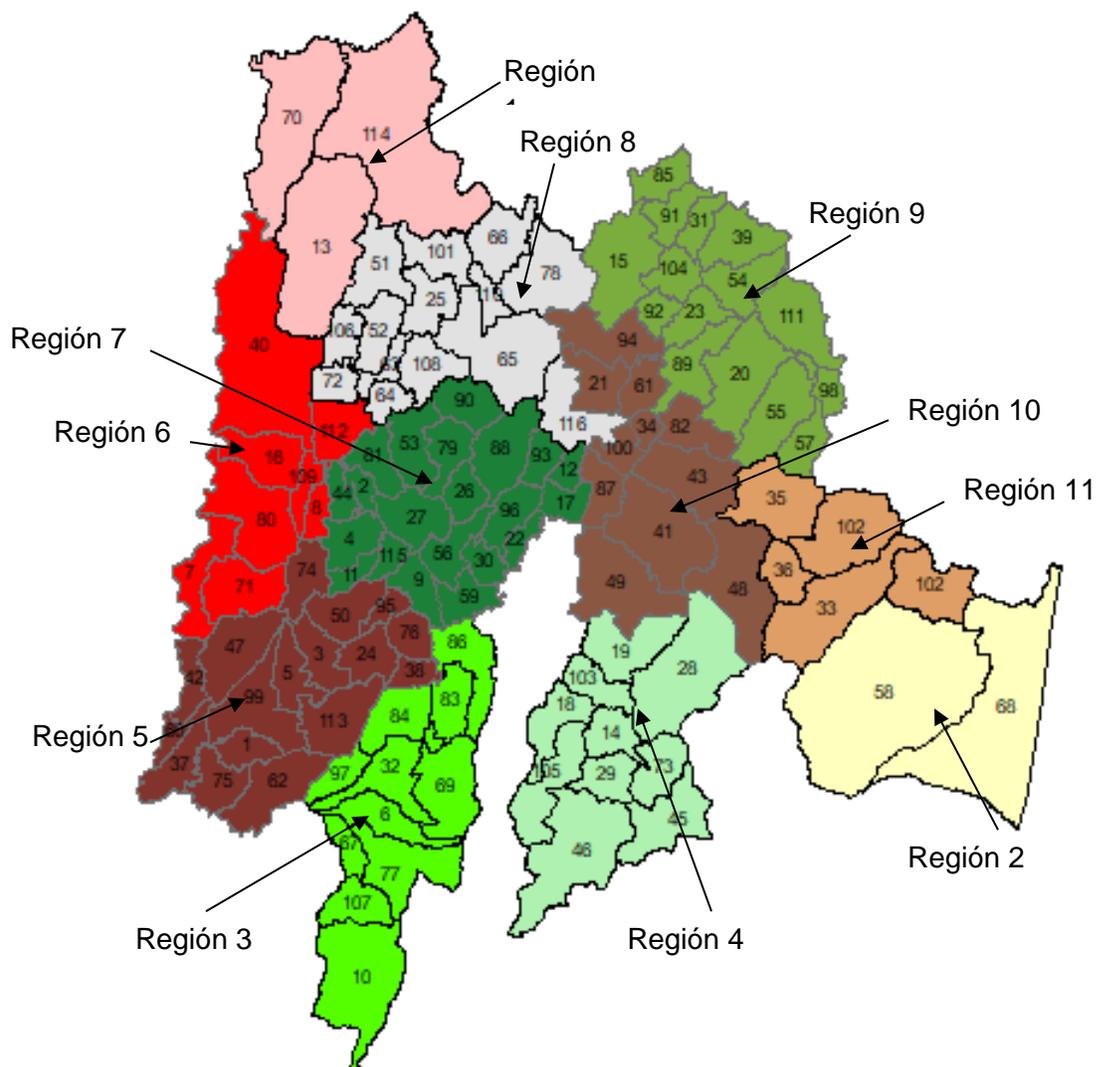


Ilustración 8. Subdivisión del departamento de Cundinamarca a partir de (Instituto geográfico Agustín Codazzi, 2022), Elaboración propia

Para evaluar las fuentes de suministro se suma la biomasa disponible en cada uno de los municipios de una región dada y así proceder con el cálculo de su total. A continuación, se exponen las matrices con la biomasa residual agrícola y pecuaria en las distintas regiones.

| α_{ik} : Cantidad de k biomosas residuales agrícolas en las i regiones (Toneladas) | | | | | | |
|---|------|------|-----------------|---------------|--------|---------|
| | Café | Maíz | Palma de aceite | Caña panelera | Banano | Plátano |
| | | | | | | |

| | | | | | | |
|-----------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|
| Región 1 | 9400 | 3696 | 588 | 321546 | 0 | 65116 |
| Región 2 | 423 | 2373 | 36835 | 20647 | 0 | 29090 |
| Región 3 | 16984 | 10841 | 0 | 1057 | 15529 | 10123 |
| Región 4 | 4498 | 10999 | 0 | 7176 | 0 | 3444 |
| Región 5 | 53317 | 6605 | 0 | 123920 | 35461 | 141423 |
| Región 6 | 30463 | 4315 | 0 | 142956 | 167465 | 60461 |
| Región 7 | 30740 | 14743 | 0 | 25404 | 3208 | 78612 |
| Región 8 | 38774 | 2193 | 0 | 492832 | 308 | 160273 |
| Región 9 | 2539 | 2948 | 0 | 3552 | 886 | 406 |
| Región 10 | 354 | 2653 | 0 | 1925 | 5535 | 507 |
| Región 11 | 5549 | 3900 | 0 | 22893 | 0 | 2829 |

Tabla 9. Cantidad de k biomásas residuales agrícolas en las i regiones (Toneladas) a partir de (Agronet, 2021), Elaboración propia

| β_{im} : Cantidad de m biomásas residuales pecuarias en las i regiones (Toneladas) | | | |
|--|---------|-----------|--------|
| | Bovina | Porcicola | Aviar |
| Región 1 | 481893 | 2608 | 1980 |
| Región 2 | 545378 | 3835 | 11415 |
| Región 3 | 550330 | 85287 | 536440 |
| Región 4 | 340684 | 62503 | 409274 |
| Región 5 | 550646 | 106579 | 167749 |
| Región 6 | 423196 | 22999 | 137861 |
| Región 7 | 332794 | 98594 | 419614 |
| Región 8 | 489190 | 33744 | 20733 |
| Región 9 | 1224213 | 53701 | 134322 |
| Región 10 | 765668 | 10342 | 166740 |
| Región 11 | 227589 | 4157 | 0 |

Tabla 10. Cantidad de m biomásas residuales pecuarias en las i regiones (Toneladas) a partir de (ICA, 2020), elaboración propia

Para calcular la distancia entre las regiones y de esta manera parte de los costos del transporte, dentro de cada Región se seleccionó un municipio central en donde se pueda ubicar la planta de producción o los puntos de almacenamiento para la biomasa residual

agrícola. En la siguiente tabla de doble entrada se muestran los municipios representativos de cada una de las 11 regiones y la distancia en Kilómetros que hay entre cada uno de ellos. Estas distancias fueron recuperadas de Google maps.

| γ_{ij} : Distancia en Km desde la región i de suministro hasta la región j de producción | | | | | | | | | | | |
|---|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|
| | Región 1 | Región 2 | Región 3 | Región 4 | Región 5 | Región 6 | Región 7 | Región 8 | Región 9 | Región 10 | Región 11 |
| Región 1 | 68 | 331 | 237 | 220 | 225 | 103 | 139 | 76 | 170 | 146 | 252 |
| Región 2 | 331 | 29 | 240 | 140 | 278 | 289 | 222 | 275 | 190 | 194 | 101 |
| Región 3 | 237 | 240 | 62 | 102 | 93 | 154 | 87 | 149 | 167 | 117 | 217 |
| Región 4 | 220 | 140 | 102 | 47 | 142 | 154 | 87 | 140 | 149 | 96 | 183 |
| Región 5 | 225 | 278 | 93 | 142 | 72 | 129 | 109 | 171 | 188 | 139 | 245 |
| Región 6 | 103 | 289 | 154 | 154 | 129 | 40 | 68 | 80 | 185 | 136 | 242 |
| Región 7 | 139 | 222 | 87 | 87 | 109 | 68 | 49 | 67 | 118 | 68 | 175 |
| Región 8 | 76 | 275 | 149 | 140 | 171 | 80 | 67 | 52 | 161 | 112 | 218 |
| Región 9 | 170 | 190 | 167 | 149 | 188 | 185 | 118 | 161 | 49 | 63 | 159 |
| Región 10 | 146 | 194 | 117 | 96 | 139 | 136 | 68 | 112 | 63 | 51 | 107 |
| Región 11 | 252 | 101 | 217 | 183 | 245 | 242 | 175 | 218 | 159 | 107 | 37 |

Tabla 11. Distancia en Km desde la región i de suministro hasta la región j de producción, a partir de (Google, 2022)Elaboración Propia

El índice del costo de transporte de transporte de carga promedio en Colombia es equivalente a un valor indexado de 211,54 COP/(Km*Tonelada) (Toro, Santa, & Granada, 2013) de acuerdo con las variaciones del IPC.

Para el cálculo del inventario promedio se presenta el número promedio de cosechas anuales para cada uno de los tipos de biomasa con la siguiente información: (Erales Vides, 2016) establece que en promedio hay 0,30402 cosechas al año de palma de aceite anuales. (DANE, 2017) afirma que en promedio hay 0,78 cosechas de caña panelera al año. También (DANE, 2014) establece que en promedio hay una cosecha de banano al año y de forma igual para el plátano. Por último, en promedio hay 0,25 cosechas de café anuales (Coffee research organization, 2022) En la siguiente tabla se resume esta información:

| φ_k : Numero promedio de cosechas anuales de las k biomosas residuales agrícolas | |
|--|--------|
| Biomasa residual agrícola de café | 0,25 |
| Biomasa residual agrícola de maíz | 2,88 |
| Biomasa residual agrícola de palma de aceite | 0,3042 |
| Biomasa residual agrícola de caña panelera | 0,7849 |
| Biomasa residual agrícola de banano | 1 |
| Biomasa residual agrícola de plátano | 1 |

Tabla 12. Numero promedio de cosechas anuales de las k biomosas residuales agrícolas a partir de (Erales Vides, 2016), (DANE, 2017), (DANE, 2014), (Coffee research organization, 2022). Elaboración Propia

El costo del almacenamiento depende del volumen ocupado, por lo tanto, se da el volumen específico de cada una de las biomosas residuales agrícolas que, multiplicado por la cantidad en toneladas seleccionada, permite hallar el espacio ocupado en m³:

| ζ_k : Volumen específico de la biomasa residual agrícola i dado en $\frac{m^3}{Ton}$ | |
|--|-------|
| Biomasa residual agrícola de café | 1,399 |
| Biomasa residual agrícola de maíz | 1,387 |
| Biomasa residual agrícola de palma de aceite | 1,147 |
| Biomasa residual agrícola de caña panelera | 1,299 |
| Biomasa residual agrícola de banano | 1,235 |
| Biomasa residual agrícola de plátano | 1,020 |

Tabla 13. Volumen específico de la biomasa residual agrícola i dado en m³/t a partir de (Phyllis 2, 2022), Elaboración Propia

El costo por metro cuadrado varía de región en región por lo tanto se utilizará el promedio anual de ocupar un m² dispuesto para el almacenamiento:

| Precio de alquiler de bodega por metro cuadrado en las distintas regiones | |
|---|--------------|
| Región 1 | \$85419 COP |
| Región 2 | \$72916 COP |
| Región 3 | \$168000 COP |
| Región 4 | \$120000 COP |
| Región 5 | \$107427 COP |
| Región 6 | \$68965 COP |
| Región 7 | \$124000 COP |
| Región 8 | \$94166 COP |
| Región 9 | \$101428 COP |
| Región 10 | \$165107 COP |
| Región 11 | \$132000 COP |

Tabla 14. Precio de alquiler de bodega por metro cuadrado en las distintas regiones a partir de (Metro cuadrado, 2022). elaboración propia

Por último, se tiene que el consumo energético promedio en Cundinamarca para el año 2021 fue de 14459 Tera julios (UPME, 2021). De esta manera se procede a establecer unos límites de generación de energía de entre 3% y 8% que como se ha mencionado es la proyección de la ocupación que tendrá la energía producto de la biomasa residual en el mercado energético en las próximas décadas.

La energía para producir será mayor a 433,77 Tera julios y menor a 1156,72 Tera Julios.

- $\chi = 14459$ Tera julios.
- $p = 0,03$.
- $s = 0,08$.
- Finalmente se brinda el precio por tera julio en Colombia para determinar la utilidad

- ζ = El precio de un Tera julio en Colombia es de alrededor de 99'027.777 COP (Ministerio de minas y energía, 2021).

Emisiones de gases de efecto invernadero

El factor de emisión utilizado corresponde al promedio establecido para el transporte en camiones de acuerdo con (Environmental Defense Fund, 2022) y este es igual a:

- $\kappa = \frac{0,001056}{TON * Km}$.

Siguiendo la recomendación de (Rentizelas, Tolis, & Tatsiopoulou, 2009) la capacidad de carga a utilizar será de 25 toneladas por camión. Por lo tanto:

- $\omega = 25 \text{ Ton.}$

El factor de emisión unificado por Tera julio de energía en Colombia para la matriz de energía de acuerdo con (COSENIT, 2022) es:

- $\kappa = \frac{45,66 \text{ Toneladas de } CO_2}{\text{Tera julio}}$.

Resultados del modelo

```
Sun Mar 20 2022 10:08:56 GMT-0500 (hora estándar de Colombia)
FICO Xpress Mosel 64-bit v5.8.2, FICO Xpress v8.13.3
(c) Copyright Fair Isaac Corporation 2001-2021. All rights reserved
Compiling Modeloentero3.mos to out\Modeloentero3.bim with -g
Running model

Process exited with code: 0
```

Ilustración 9. Evidencia solución a partir de software FICO Xpress solver® (Isaac Corporation, 2022). (Versión comunitaria)

La optimización fue llevada a cabo con el software xpress solver edición comunitaria arrojando los siguientes.

$z = 5$, quiere decir que la panta de producción se ubica en la región 5

$$C_{552}$$

= 1, se recolecta Biomasa pecuaria en finca de la región 6 para ser procesada en la región 5

$A_{651} = 1$, se recolecta café en finca de la región 6 para ser procesada en la región 5

$B_{651} = 1$ se recolecta café en almacén de la región 6 para ser procesada en la región 5

Resumen de los resultados

Se debe ubicar la planta de transformación de biomasa residual agrícola y pecuaria en la región 5 cuyo municipio representativo es Tocaima. En esta región se debe recolectar y comprar toda la biomasa porcina en finca; también se debe recolectar y comprar la biomasa residual de café de la región 6 (Chaguaní) tanto en finca como en almacén.

| Energía producida al año | Utilidad bruta | Ahorro en emisiones de CO ₂ |
|--------------------------|-------------------------|--|
| 1158,3 Tera julios | $1,08772 * 10^{11} COP$ | 41596 toneladas |

Tabla 15. Resumen de los resultados, *Elaboración Propia*

En la siguiente imagen se observa los resultados con la decodificación dada. Del conjunto de las fuentes de biomasa se selecciona la fuente 6 (Chaguaní), del conjunto de las zonas de producción se selecciona la zona 5 (Tocaima), del conjunto de las biomazas residuales agrícolas se selecciona la biomasa 1 (Café). Lo anterior para la variable de compra en finca.



| Fu | Pr | Ag | x |
|----|----|----|---|
| 6 | 5 | 1 | 1 |

Ilustración 10. Resumen de los resultados, software FICO Xpress solver © (Isaac Corporation, 2022). (Versión comunitaria)

En la siguiente imagen se observa los resultados con la decodificación dada. Del conjunto de las fuentes de biomasa se selecciona la fuente 6 (Chaguaní), del conjunto de las zonas de producción se selecciona la zona 5 (Tocaima), del conjunto de las biomazas

residuales agrícolas se selecciona la biomasa 1 (Café). Lo anterior para la variable de compra en almacén.



| Fu | Pr | Ag | y |
|----|----|----|---|
| 6 | 5 | 1 | 1 |

Ilustración 11. Resumen de los resultados, software FICO Xpress solver © (Isaac Corporation, 2022). (versión comunitaria)

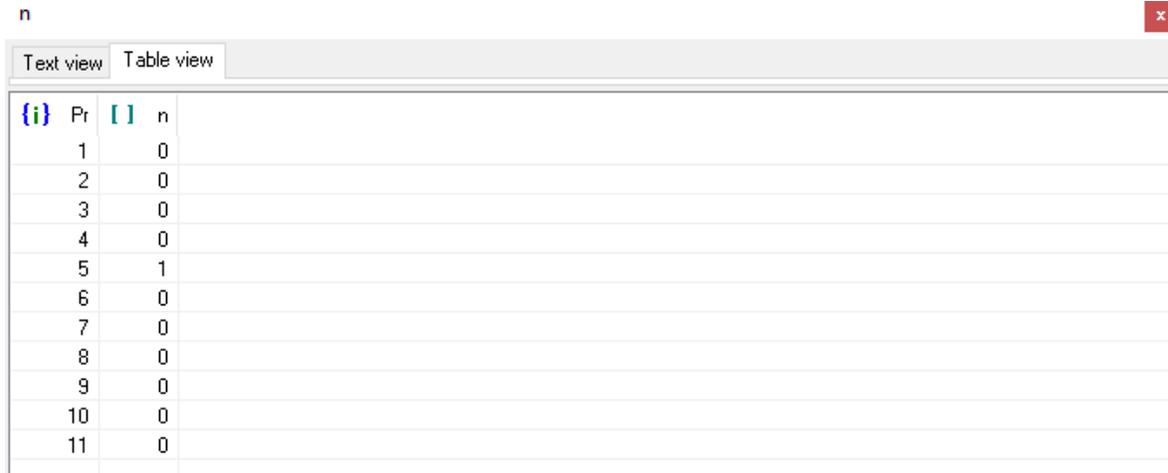
En la siguiente imagen se observa los resultados con la decodificación dada. Del conjunto de las fuentes de biomasa se selecciona la fuente 5 (Tocaima), del conjunto de las zonas de producción se selecciona la zona 5 (Tocaima), del conjunto de las biomazas residuales pecuarias se selecciona la biomasa 2 (porcina). Lo anterior para la variable de compra en finca.



| Fu | Pr | Pe | t |
|----|----|----|---|
| 5 | 5 | 2 | 1 |

Ilustración 12. Resumen de los resultados, software FICO Xpress solver © (Isaac Corporation, 2022). (versión comunitaria)

En la siguiente imagen se observa que, del conjunto de las zonas de producción posibles, únicamente se selecciona la región 5 (Tocaima)



The screenshot shows a window titled 'n' with a close button. It contains two tabs: 'Text view' and 'Table view'. The 'Table view' is active and displays a table with two columns: 'Pr' and 'n'. The table contains 11 rows of data.

| Pr | n |
|----|---|
| 1 | 0 |
| 2 | 0 |
| 3 | 0 |
| 4 | 0 |
| 5 | 1 |
| 6 | 0 |
| 7 | 0 |
| 8 | 0 |
| 9 | 0 |
| 10 | 0 |
| 11 | 0 |

Ilustración 13. Resumen de los resultados, FICO Xpress solver® (Isaac Corporation, 2022). (versión comunitaria).

En cuanto al comportamiento del modelo se observa que este se compone de un total de 1101 restricciones y 2178 variables el cual fue resuelto con 423 iteraciones simplex, dando como solución óptima una utilidad de \$ $1,12254 * 10^{11}$ COP. En la siguiente imagen se resume este resultado:

| Stats | | | |
|--|---------------------|-----------------------|----------------------|
| Matrix: | | Presolved: | |
| Rows(constraints): | 1115 | Rows(constraints): | 870 |
| Columns(variables): | 2189 | Columns(variables): | 1736 |
| Nonzero elements: | 8910 | Nonzero elements: | 5999 |
| Global entities: | 2189 | Global entities: | 1736 |
| Sets: | 0 | Sets: | 0 |
| Set members: | 0 | Set members: | 0 |
| Overall status: Finished global search. | | | |
| LP relaxation: | | Global search: | |
| Algorithm: | Simplex dual | Current node: | 1 |
| Simplex iterations: | 547 | Depth: | 1 |
| Objective: | 1.08838e+011 | Active nodes: | 0 |
| Status: | Unfinished | Best bound: | 1.08772e+011 |
| Time: | 0.2s | Best solution: | 1.08772e+011 |
| | | Gap: | 0% |
| | | Status: | Solution is optimal. |
| | | Time: | 0.2s |

Ilustración 14. Resumen de los resultados, FICO Xpress solver © (Isaac Corporation, 2022). (Versión comunitaria).

En cuanto al cumplimiento de las restricciones se observa en la siguiente imagen en la parte inferior que se producen un total de 1158 Tera julios y un ahorro de 41569,6 toneladas de emisiones de CO₂. La solución óptima tiene

| Matrix | | | | | | |
|--------|-------------|----------|--------------------|---------------------|---------|--|
| Sketch | Column view | Row view | Graphical original | Graphical presolved | Scaling | |
| Name | Cols | RHS | Activity | Slack | Dual | |
| _R1110 | 2 | 0 | 0 | 0 | N/A yet | |
| _R1111 | 2 | 0 | 0 | 0 | N/A yet | |
| _R1112 | 2 | 0 | 0 | 0 | N/A yet | |
| _R1113 | 2 | 0 | 0 | 0 | N/A yet | |
| _R1114 | 2 | 0 | 0 | 0 | N/A yet | |
| _R1115 | 2 | 0 | 0 | 0 | N/A yet | |
| _R1116 | 2 | 0 | 0 | 0 | N/A yet | |
| _R1117 | 2 | 0 | 0 | 0 | N/A yet | |
| _R1118 | 2 | 0 | 0 | 0 | N/A yet | |
| _R1119 | 2 | 0 | 0 | 0 | N/A yet | |
| _R1120 | 2 | 0 | 0 | 0 | N/A yet | |
| _R1121 | 2 | 0 | 0 | 0 | N/A yet | |
| _R1122 | 1870 | 0 | -41569.6 | 41569.6 | N/A yet | |
| _R1123 | 1870 | 436.47 | 1158.3 | -721.832 | N/A yet | |
| _R1124 | 1870 | 1163... | 1158.3 | 5.61841 | N/A yet | |

Ilustración 15. Resumen de los resultados. FICO Xpress solver © (Isaac Corporation, 2022). (Versión comunitaria)

Segunda simulación

En esta segunda simulación se elimina la restricción de una sola planta y se permite que el modelo elija tantas plantas de transformación como sea conveniente. Los resultados son:

$A_{221} = 1$ En la región 2 se debe crear una planta y de esta misma región se debe recolectar y comprar la biomasa residual agrícola de café en finca.

$A_{223} = 1$ En esta misma planta también debe recolectarse y comprarse la biomasa residual de palma de aceite en finca.

$A_{334} = 1$ Se debe establecer una segunda planta de producción en la región 3 y es se debe recolectar y comprar la biomasa residual agrícola de caña panelera en finca.

$A_{552} = 1$ Se debe establecer una tercera planta de producción en la región 5 y se debe recolectar y comprar la biomasa residual agrícola de Maíz en finca

$B_{334} = 1$ Se debe comprar la biomasa residual de caña panelera de la región 3 para ser procesada en la planta ubicada en la región 3

$B_{552} = 1$ Se debe comprar en almacén la biomasa residual de maíz ubicada en la región 5 y ser procesada en la región 5

Resumen de los resultados

Este modelo se compone de un total de 1101 restricciones y 2178 variables el cual fue resuelto con 423 iteraciones simplex, dando como solución óptima una utilidad de \$ $1,12254 * 10^{11}$ COP. En la siguiente imagen se resume este resultado:

| Stats | | | |
|--|---------------------|-----------------------|----------------------|
| Matrix: | | Presolved: | |
| Rows(constraints): | 1101 | Rows(constraints): | 868 |
| Columns(variables): | 2178 | Columns(variables): | 1718 |
| Nonzero elements: | 8877 | Nonzero elements: | 4294 |
| Global entities: | 2178 | Global entities: | 1718 |
| Sets: | 0 | Sets: | 0 |
| Set members: | 0 | Set members: | 0 |
| Overall status: Finished global search. | | | |
| LP relaxation: | | Global search: | |
| Algorithm: | Simplex dual | Current node: | 9 |
| Simplex iterations: | 423 | Depth: | 1 |
| Objective: | 1.1229e+011 | Active nodes: | 0 |
| Status: | Unfinished | Best bound: | 1.12254e+011 |
| Time: | 0.9s | Best solution: | 1.12245e+011 |
| | | Gap: | 0.00805757% |
| | | Status: | Solution is optimal. |
| | | Time: | 1.2s |

Ilustración 16 Resumen de los resultados de la segunda simulación en software FICO Xpress solver © (Isaac Corporation, 2022) (versión comunitaria).

En la siguiente imagen se observa que se deben comprar en finca la biomasa residual agrícola de Café y de palma de aceite en la región 2 (Medina) para ser procesadas en la región 2 (Medina). Se debe comprar en finca la biomasa residual de caña panelera de la región 3 (Arbeláez) para ser procesada en la región 3 (Arbeláez). Y por ultimo se debe

comprar la biomasa residual de maíz en finca en la región 5 (Tocaima) para ser procesada en la región 5 (Tocaima).

x

| Text view | | Table view | | | | | |
|-----------|----|------------|----|-----|----|-----|---|
| {i} | Fu | {i} | Pr | {i} | Ag | {i} | x |
| | 2 | | 2 | | 1 | | 1 |
| | 2 | | 2 | | 3 | | 1 |
| | 3 | | 3 | | 4 | | 1 |
| | 5 | | 5 | | 2 | | 1 |

Ilustración 17. Resumen de los resultados en la segunda simulación software FICO Xpress solver® (Isaac Corporation, 2022) (versión comunitaria)..

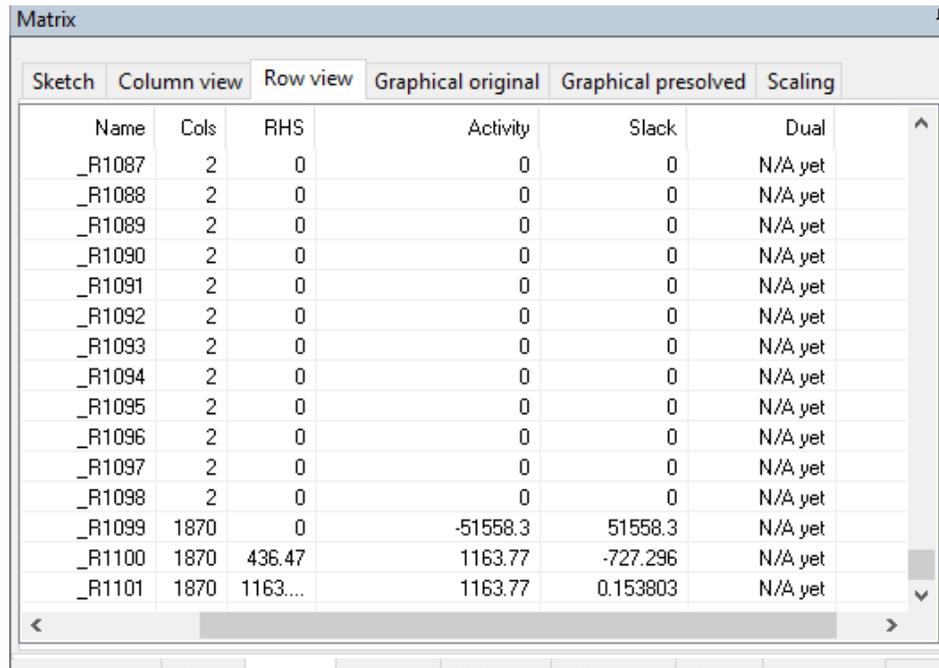
La siguiente figura indica que se debe comprar en almacén la biomasa residual de caña panelera en la región 3 (Arbeláez) para ser procesada en la región 3 (Arbeláez). Por otra parte, se debe comprar en almacén la biomasa residual de maíz en la región 5 (Tocaima) para ser procesada en la región 5 (Tocaima).

y

| Text view | | Table view | | | | | |
|-----------|----|------------|----|-----|----|-----|---|
| {i} | Fu | {i} | Pr | {i} | Ag | {i} | y |
| | 3 | | 3 | | 4 | | 1 |
| | 5 | | 5 | | 2 | | 1 |

Ilustración 18. Resumen de los resultados en la segunda simulación, FICO Xpress solver® (Isaac Corporation, 2022)(versión comunitaria).

La siguiente imagen indica en la parte inferior que se producen 1163,77 Tera julios anuales y que el ahorro en emisiones de CO₂ es de 51558,3 toneladas anuales.



| Name | Cols | RHS | Activity | Slack | Dual |
|--------|------|---------|----------|----------|---------|
| _R1087 | 2 | 0 | 0 | 0 | N/A yet |
| _R1088 | 2 | 0 | 0 | 0 | N/A yet |
| _R1089 | 2 | 0 | 0 | 0 | N/A yet |
| _R1090 | 2 | 0 | 0 | 0 | N/A yet |
| _R1091 | 2 | 0 | 0 | 0 | N/A yet |
| _R1092 | 2 | 0 | 0 | 0 | N/A yet |
| _R1093 | 2 | 0 | 0 | 0 | N/A yet |
| _R1094 | 2 | 0 | 0 | 0 | N/A yet |
| _R1095 | 2 | 0 | 0 | 0 | N/A yet |
| _R1096 | 2 | 0 | 0 | 0 | N/A yet |
| _R1097 | 2 | 0 | 0 | 0 | N/A yet |
| _R1098 | 2 | 0 | 0 | 0 | N/A yet |
| _R1099 | 1870 | 0 | -51558.3 | 51558.3 | N/A yet |
| _R1100 | 1870 | 436.47 | 1163.77 | -727.296 | N/A yet |
| _R1101 | 1870 | 1163... | 1163.77 | 0.153803 | N/A yet |

Ilustración 19 Resumen de los resultados en la segunda simulación, FICO Xpress solver® (Isaac Corporation, 2022)(versión comunitaria).

| Energía producida al año | Utilidad bruta | Ahorro en emisiones de CO ₂ |
|--------------------------|-------------------------|--|
| 1163,77 Tera julios | $1,12254 * 10^{11} COP$ | 51558,3 toneladas |

Ilustración 20. Resumen de los resultados de la segunda simulación FICO Xpress solver® (Isaac Corporation, 2022). (versión comunitaria).

Discusión de resultados

Una vez se han simulado diferentes escenarios del modelo centralizado se puede apreciar que es posible desarrollar una operación logística de este tipo puesto que brinda una utilidad, una generación de energía y un ahorro sustancial en emisiones de CO₂ frente al uso de combustibles fósiles. Sin embargo, se debe tener en cuenta que una operación de este tipo es menos eficiente que una operación descentralizada. Las simulaciones realizadas permitieron evidenciar que restringir el número de plantas de transformación de energía a una sola (central) conlleva a mayores costos de transporte, mayores distancias recorridas y mayores emisiones de CO₂ que si se llevara a cabo esta operación sin restringir el número de plantas de transformación tal como se expone a continuación.

| | Proceso centralizado (base) | Proceso no centralizado | Variación porcentual |
|--|-----------------------------|-------------------------|----------------------|
| Energía producida anualmente | 1158,3 Tera julios | 1163,77 Tera julios | 0,47% |
| Utilidad bruta | $1,08772 * 10^{11}$ COP | $1,12254 * 10^{11}$ COP | 12,65% |
| Ahorro de emisiones de CO ₂ | 41596 toneladas | 51558,3 toneladas | 23,9% |

Tabla 16 Resultados de las simulaciones, Elaboración Propia

Se observa que todos los parámetros de desempeño mejoran en un proceso descentralizado. Concluyendo que el mejor escenario logístico para el aprovechamiento de la biomasa residual agrícola y pecuaria no es centralizado corroborando la primera hipótesis de investigación.

Por otra parte, los parámetros del proceso como los costos de compra, el precio del Tera julio, los precios de las instalaciones para el almacenamiento, la disponibilidad, el acceso, las distancias, los factores de emisión, la estacionalidad, los costos del transporte, la energía a producir y la ubicación si son determinantes a la hora de diseñar un modelo logístico para el aprovechamiento de la biomasa residual ya que se pudo constatar que las respuestas de la simulación fueron coherentes con lo esperado. Corroborando la segunda hipótesis.

Los parámetros utilizados cambian constantemente en cantidad demandada, ofertada y precios de compra y venta ya que hacen parte de una economía de mercado que obedece a las leyes de la oferta y la demanda. De esta manera al tomar la decisión de ubicar una sola planta para una operación grande se está asumiendo un riesgo mayor puesto que por ejemplo un aumento significativo en el precio de una biomasa puede cambiar totalmente la solución óptima obligando a optar por otra biomasa que quizás se halle en otra región. Se concluye que un modelo centralizado es poco flexible y altamente sensible a los cambios del entorno, a diferencia de un modelo descentralizado que tiene

un margen de maniobra mayor. Se corrobora de esta forma la tercera hipótesis de investigación.

Conclusiones

Se ha diseñado satisfactoriamente un modelo para la operación logística de la biomasa residual agrícola y pecuaria a un proceso de aprovechamiento centralizado el cual contempla las características y tasas de rendimiento de cualquier tipo de biomasa residual agrícola y pecuaria, demanda de energía requeridas, regiones de suministro, costos de almacenamiento, medio de transporte unimodal (camión) y costos de compra en distintas modalidades. A la hora de probar el modelo en la región de Cundinamarca se observó que los resultados son coherentes con literatura. Por un lado, se observa que estos modelos centralizados son únicamente viables para distancias cortas, que para (Rentizelas, Tolis, & Tatsiopoulos, 2009) el valor óptimo consta de un valor aproximado de 40 km y para (Mandova, Leduc, & Wang, 2018) es de 100 km. El presente modelo mejora su desempeño conforme se acortan las distancias y no encuentra solución factible centralizada a partir de más de 130 km. Por otra parte, el ahorro en emisiones de CO₂ fue de 6,4% (por un reemplazo de 8% de las energías convencionales, lo que constituye un ahorro global bajo frente al 85% que es lo estimado para un modelo enfocado a la minimización de emisiones de CO₂ (Aishah & Amin, 2016) que lo estima en un 85%, sin embargo, quedando demostrada la viabilidad técnica y económica de este tipo de operación. El modelo centralizado se probó para producir una cantidad de 1153,3 Tera julios anuales lo que equivale a $3,203\ 611 \times 10^8$ Kilovatio-hora [kWh] anuales y una utilidad bruta anual de $\$1,08722 \times 10^{11}$ COP. El suministro consta de la compra en finca y almacén de la biomasa residual de café en la región 6 (Chaguani) para ser procesada en la región 5 (Tocaima), y se compra en finca la biomasa residual pecuaria Porcicola en la región 5 (Tocaima) para ser procesada en la región 5 (Tocaima).

El modelo diseñado es general, puede aplicarse a cualquier contexto de aprovechamiento de biomasa residual, la formulación matemática lo contempla así, puede ser aplicado a varios lenguajes de programación que permitan resolver problemas de programación lineal entera mixta, y sus parámetros pueden cambiar en cuanto a cantidad y calidad. El modelo puede seguirse construyendo, agregando otras

restricciones quizás por ejemplo las asociadas a los espacios de almacenamiento o a la capacidad máxima de vehículos o tecnología etc. El modelo cuenta con una ventaja adicional que consiste en que con tan solo eliminar las tres primeras restricciones se convierte en un modelo descentralizado más eficiente para la mayoría de los casos.

Comentarios

El modelo pudo ser validado con la simulación en el software xpress solver de FICO y se corroboraron las hipótesis planteadas, pero deja una perspectiva a futuro para realizar unas acciones de mejora que exploten aún más el potencial del modelo que se considera una representación adecuada de la realidad. Cualquier individuo puede validarlo en otras regiones con la condición de que se disponga de los parámetros propios de la región de estudio.

En el proceso de definición de las características y tasas de rendimiento de la biomasa residual agrícola y pecuaria existen dificultades especialmente cuando la región de estudio es muy extensa y tiene gran diversidad de cultivos, que son susceptibles de cambiar especialmente si son de tipo transitorio. Este modelo se probó con seis biomazas residuales agrícolas y tres biomazas residuales pecuarias, pero el estudio podría ampliarse a otros tipos de biomasa. Sin embargo, para una perspectiva más completa debe hacerse un proceso de negociación y contratación con los proveedores para asegurar el suministro.

En cuanto a las emisiones de CO₂ y su disminución utilizando energía proveniente de la biomasa residual agrícola y pecuaria se observó que definitivamente los ahorros son sustanciales y no solo eso, las utilidades brutas permiten estimar que la operación puede ser viable. Por otra parte, se descubrió que maximizar la utilidad va en contra de la minimización de CO₂. Podría ampliarse el modelo a uno multiobjetivo de minimización de emisiones como primera meta y maximización de utilidad como segunda meta.

Referencias

Bibliografía

- Acuna, M., Sessions, J., Zamora, R., Boston, K., Brown, M., & Reza Ghaffariyan, M. (2019). Methods to Manage and Optimize Forest Biomass Supply Chains: *Current Forestry Reports*, 124-141. doi:10.1007/s40725-019-00093-4
- Agronet. (2021). *Área, Producción y Rendimiento Nacional por Cultivo*. Obtenido de <https://www.agronet.gov.co/estadistica/paginas/home.aspx?cod=1>
- Aishah, N., & Amin, S. (2016). REDUCING CO2 EMISSIONS IN BIOMASS POWER PLANTS USING THE INCAM MODEL. *UTM-MIT Sustainable Cities Program*.
- Atashbar, N. Z., Labadie, N., & Prins, C. (2018). Modelling and optimisation of biomass supply chains: a review. *International Journal of Production Research*(10), 3482–3506. doi:10.1080/00207543.2017.1343506
- Atlas, G. C. (Marzo de 2022). *Global carbon Atlas*. Obtenido de <http://www.globalcarbonatlas.org/es/CO2-emissions>
- Ba, B. H., Prins, C., & Prodhon, C. (2016). Models for optimization and performance evaluation of biomass supply chains: An Operations Research perspective. *Renewable Energy*(87), 977-989. doi:10.1016/j.renene.2015.07.045
- Bhattacharya, S. (2005). Assesment of suitanable energy resources potential of non plantation biomass in China. *Biomass and Bioenergy*, 29, 167-177.
- Bijarchiyan, M., Sahebi, H., & Mirzamohammadi, S. (2020). A sustainable biomass network design model for bioenergy production by anaerobic digestion technology: using agricultural residues and livestock manure. *Energy, Sustainability*. doi:10.1186/s13705-020-00252-
- Caputo, A. C., Palumbo, M., Pelagagge, P. M., & Scacchia, F. (2005). Economics of biomass energy utilization in combustion and. (Elsevier, Ed.) *Biomass & Bioenergy*(28), 35-51. doi:10.1016/j.biombioe.2004.04.009
- Chase, R. B., Jacobs, R. F., & Aquilano, N. J. (2009). *ADMINISTRACIÓN DE OPERACIONES Producción y cadena de suministros* (12 ed.). Méxco DF: McGrawHill.
- CIEMAT. (2022). *BIORAISE*. Obtenido de <http://bioraise.ciemat.es/Bioraise>
- Cofee research organization. (2022). *Arabica cofee plant*. Obtenido de <http://www.coffeeresearch.org/agriculture/coffeeplant.htm>

- COSENIT. (2022). *FACTOR DE EMISIÓN DE CO2 POR GENERACIÓN ELÉCTRICA DEL SISTEMA INTERCONECTADO*. Obtenido de <https://www.cosenit.com/en-colombia-factor-de-emision-de-co2-por-generacion-electrica-del-sistema-interconectado-164-38-gramos-de-co2-por-kilovatio-hora/>
- DANE. (2014). *El cultivo del plátano (Musa paradisiaca), un importante alimento para el mundo*. DANE, SISPA. DANE. Obtenido de https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/agropecuario/sipsa/insumos_factores_de_produccion_abr_2014.pdf
- DANE. (2017). *Particularidades del cultivo de la caña panelera (Saccharum officinarum L) en Colombia*. DANE, INSUMOS Y FACTORES ASOCIADOS A LA PRODUCCIÓN AGROPECUARIA. DANE. Obtenido de https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/agropecuario/sipsa/Bol_Insumos_mar_2017.pdf
- De Lucas Herguedas, A. I., & del Peso Taranco, C. (2012). BLOQUE I. MATERIAS PRIMAS. En U. Europea, *Biomasa, Biocombustibles y sostenibilidad* (págs. 1-65). Centro Tecnológico Agrario y Agroalimentario. doi:84-931891-5-0
- De Meyer, A., Cattrysse, D., Rasinmaki, J., & Van Orshoven, J. (2014). Methods to optimise the design and management of biomass-for-bioenergy supply chains: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*(31), 657-670. doi:10.1016/J.RSER.2013.12.036
- Durmaz, Y. G., & Bilgen, B. (2020). Multi-objective optimization of sustainable biomass supply chain network. *Applied Energy*(272). doi:10.1016/j.apenergy.2020.115259
- Egieya, J. M., Cucek, L., Zirngast, K., & Isafiade, A. J. (2019). Synthesis of biogas supply networks using various biomass and manure types. *Computers and Chemical Engineering*(122), 129-151. doi:10.1016/j.compchemeng.2018.06.022
- Environmental Defense Fund. (2022). *The Green Freight Handbook A Practical Guide for Developing a Sustainable Freight Transportation Strategy for Business*. EDF. Obtenido de <https://business.edf.org/insights/green-freight-math-how-to-calculate-emissions-for-a-truck-move/>
- Erales Vides, R. (2016). *LA PALMA*. Gremial de palmicultores de Guatemala. Grepalma. Obtenido de <https://www.grepalma.org/wp-content/uploads/2018/09/boletin-5-La-Palma.pdf>
- Gallagher, P., Dikerman, M., Fritz, J., Wailes, E., Gauthier, W., & Shapouri, H. (2003). *Biomass from Crop Residues: Cost and Supply Estimates*. US Government, Department of Agriculture, Office of the Chief Economist. Washington DC: Office of Energy Policy and New Uses. Obtenido de <https://ageconsearch.umn.edu/filesae030819>
- Garbs, M., & Geldermann, J. (2018). Analysis of selected economic and environmental impacts of long distance. *Biomass and Bioenergy manure transports to biogas plants*(109), 71-84. doi:10.1016/j.biombioe.2017.12.009

- Ghaderi, H., Pishvaei, M. S., & Moini, A. (2016). Biomass supply chain network design: An optimization-oriented review and analysis. *Industrial Crops and Products*(94), 972-1000. doi:10.1016/j.indcrop.2016.09.027
- Gobernación de Cundinamarca. (2020). *Análisis de Situación de Salud - ASIS*. Secretaría de salud de Cundinamarca. Bogotá: Gobernación de Cundinamarca. Obtenido de https://www.cundinamarca.gov.co/Search/Search%20Center/!ut/p/z1/jVLLcolwFP2WLIhqlLopo3SmlYqtYcVBg40S8RTpIKA-tfn0DtrXM-CCTycx9nJNzblkYhEnpDvfo6nPQhrw2HbkjZRWD_pGo98EGMgSWRQNo-FA0obQ0AedvgzTp87bELQJtGYycf6XO-3HNkwNXWvNZ4ZozsUfPFxZPaiGv9HgVNF_o8G5Le_InkA-wUY
- Gobernación de Cundinamarca. (2020). *Plan departamental de desarrollo 2020-2024*. Gobernación de Cundinamarca. Obtenido de https://www.cundinamarca.gov.co/wcm/connect/37b90ffc-f445-462b-8faa-8a16f4427fe8/PLAN+DE+DESARROLLO+PLIEGOS1_compressed.pdf?MOD=AJPERES&CVID=njCfayi
- Google. (2022). *Google Maps*. Obtenido de <https://www.google.com/maps/@15,-2.970703,3z?hl=es>
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, M. (2014). *Metodología de la investigación* (sexta ed.). México DF: McGrawHill.
- Hong, B. H., How, B. S., & Lam, H. L. (2016). Overview of sustainable biomass supply chain: from concept. *Clean Techn Environ Policy*(18), 2173-2194. doi:10.1007/s10098-016-1155-6
- ICA. (2020). Obtenido de <https://www.ica.gov.co/areas/pecuaria/servicios/epidemiologia-veterinaria/censos-2016/censo-2018>
- Institute of agriculture and natural resources. (2017). *Estimating the Full Value of Crop Residue*. Cropwatch. Obtenido de <https://cropwatch.unl.edu/2017/estimating-value-crop-residue>
- Instituto geografico Agustín Codazzi. (2022). *Geoportal*. Obtenido de <https://geoportal.igac.gov.co/contenido/mapas-nacionales>
- Isaac Corporation. (2022). Fico Xpress solver.
- Jekayinfa, S., & Scholz, V. (2007). Assessment of Availability and Cost of Energetically Usable Crop Residues in. *onference on International Agricultural Research for Development*. University of Kassel-Witzenhausen & University of Göttingen. Obtenido de <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.603.3404&rep=rep1&type=pdf>
- Jiang, Z., He, N., & Xiao, L. (2019). Government subsidy provision in biomass energy supply. *Enterprise information systems*, 13(10), 1367-1391. doi:10.1080/17517575.2019.1658807

- Kanzian, C., Holzleitner, F., Stampfer, K., & Ashton, S. (2009). Regional Energy Wood Logistics– Optimizing Local Fuel Supply. *Silva Fennica*, 113-128. doi:· ISSN 0037-5330
- Ko, S. P., Lautala, P., & Handler, R. M. (2018). Securing the feedstock procurement for bioenergy products: a literature review on the biomass transportation and logistics. *Journal of Cleaner Production*(200), 205-218. doi:10.1016/J.JCLEPRO.2018.07.241
- Kogler, C., & Rauch, P. (2018). Discrete event simulation of multimodal and unimodal transportation in the wood supply chain: a literature review. *The Finnish Society of Forest Science*, 52(4). doi:https://doi.org/10.14214/sf.9984
- Lautala, P. T., Hilliard, M. R., Webb, E., Busch, I., Hess, J., Roni, M. S., . . . Laitinen, T. (2015). Opportunities and Challenges in the Design and Analysis. *Environmental Management*, 56. doi:10.1007/s00267-015-0565-2
- López Martínez, G., Buriticá Arboleda, C., & Silva Lora, E. (2018). La biomasa residual pecuaria como recurso energético en Colombia. *Visión Investigadora*, 12(2). doi:10.14483/22484728.14066
- Mandova, H., Leduc, S., & Wang, C. (2018). Possibilities for CO2 emission reduction using biomass in European integrated steel plants. *Biomass for energy*, 115, 231-243. doi:10.1016/j.biombioe.2018.04.021
- Martinez Hernandez, E., Amezcua Allieri, M., & Arbuto, J. (2021). Assessing the Cost of Biomass and Bioenergy Production in Agroindustrial Processes. *Energies*. doi:10.3390/en14144181
- Metro cuadrado. (2022). Obtenido de <https://www.metrocuadrado.com/casa-bodega/arriendo/fomeque/?search=form>
- Ministerio de minas y energía. (2021). *Mina de datos de la reactivación sostenible en Colombia*. Ministerio de minas y energía. Obtenido de https://www.minenergia.gov.co/documents/10192/24211636/2021.12.17+Informe+semanal+sector+minero+energetico_Medios.pdf
- Nunes, L., Causer, T., & Ciolkosz, D. (2020). Biomass for energy: A review on supply chain management models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*(120). doi:10.1016/j.rser.2019.109658
- Paredes-Sánchez, J. P., García-Elcoro, V. E., Rosillo-Calle, F., & Xiberta-Bernat, J. (2016). Assessment of forest bioenergy potential in a coal-producing area in Asturias (Spain) and recommendations for setting up a Biomass Logistic Centre (BLC). *Applied Energy*(171), 133-141. doi:10.1016/J.APENERGY.2016.03.009
- Phyllis 2. (2022). <https://phyllis.nl/>. Obtenido de <https://phyllis.nl/Browse/Standard/ECN-Phyllis#cofee>
- pigprogress. (2022). *industry and markets*. Obtenido de <https://www.pigprogress.net/industry-and-markets/market-trends-analysis/>

- Rentizelas, A. A., Tolis, A. J., & Tatsiopoulou, I. P. (2009). Logistics issues of biomass: The storage problem and the multi-biomass supply chain. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*(13), 887-894. doi:10.1016/j.rser.2008.01.003
- Secretaria distrital de planeación. (2019). CARACTERIZACIÓN DE LAS RELACIONES DE CONECTIVIDAD ENTRE LA RURALIDAD.
- Shabani, N., & Sowlati, T. (2016). A hybrid multi-stage stochastic programming-robust optimization model for maximizing the supply chain of a forest-based biomass power plant considering uncertainties. *Journal of Cleaner Production*(112), 3285-3292. doi:10.1016/j.jclepro.2015.09.034
- Sharma, B., Ingalls, R., Jones, C., & Khanchi, A. (2013). Biomass supply chain design and analysis: Basis, overview, modeling, challenges, and future. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*(24), 608-627. doi:10.1016/j.rser.2013.03.049
- Strandgard, M., Turner, P., & Shillabeer, A. (2022). Optimizing Operational-Level Forest Biomass Logistic Costs for Storage, Chipping and Transportation through Roadside Drying. *Forests*, 13(2). doi:10.3390/f13020138
- Superintendencia de servicios publicos domiciliarios. (2020). *Boletín Tarifario*. Bogotá: Superservicios. Obtenido de https://www.superservicios.gov.co/sites/default/archivos/Publicaciones/Boletines/2020/Jul/boletin_tarifario_energia_i_trim-2020_10072020.pdf
- Tchobanoglous, G. (1988). *Gestión integral de residuos solidos*. McGraw Hill.
- Teja Malladi, K., & Sowlati, T. (2018). Biomass logistics: A review of important features, optimization modeling. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*(94), 587-599. doi:10.1016/j.rser.2018.06.052
- Toro, E. M., Santa, J. J., & Granada, M. (2013). Solución del problema de ruteamiento de vehículos. *Scientia et Technica*, 18(1). doi:10.22517/23447214.8373
- United States Government. (2022). *NREL*. Obtenido de <https://www.nrel.gov/index.html>
- UPME. (2010). *Atlas del potencial energético de la biomasa residual en colombia*. Ministerio de minas y energías. Bogotá: UPME. Obtenido de https://www1.upme.gov.co/siame/Documents/Atlas-Biomasa/1_Indice_Generalidades.pdf
- UPME. (2020). *Plan energético nacional-PEN*. Ministerio de energía. Obtenido de https://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/UPME_Presentacion_PEN_V48.pdf
- UPME. (2021). *Proyección Demanda energía eléctrica y gas natura 2021-2015*. UPME. Obtenido de https://www1.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Documents/UPME_Proyeccion_Demanda_Energia_Junio_2021.pdf
- UPME. (2022). *demanda y eficiencia energetica*. Obtenido de Proyecciones de demanda: <https://www1.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Paginas/Proyecciones-de-demanda.aspx#:~:text=El%20consumo%20de%20energ%C3%ADa%20el%C3%A9ctrica,negativo%20desde%20el%20a%C3%B1o%202000>

-
- Vesga, J. N., Luna, H. J., Valderrama, J. D., Luque, A. M., Barragán, R. G., Gonzáles, E. H., . . . Pérez, A. J. (2018). UNA VISIÓN DE LAS BIOREFINERÍAS A PARTIR DE UNA REVISIÓN SISTEMÁTICA. *Ciencia: Desarrollo e Innovación*. Obtenido de <https://revistas.udca.edu.co/index.php/rcdi/article/view/499>
- Wortmann, C., & Klein, R. (2017). *Estimating the Full Value of Crop Residue*. UNIVERSITY of NEBRASKA–LINCOLN, Institute of Agriculture and Natural Resources CROPWATCH. Nebraska: UNIVERSITY of NEBRASKA–LINCOLN. Obtenido de <https://cropwatch.unl.edu/2017/estimating-value-crop-residue>
- Xin Cao, J., Wang, X., & Gao, J. (2021). A two-echelon location-routing problem for biomass logistics systems. *Biosystems engineering*, 202, 106-118. doi:10.1016/j.biosystemseng.2020.12.007
- Yalcinkaya, S. (2020). A spatial modeling approach for siting, sizing and economic. *Journal of Cleaner Production assessment of centralized biogas plants in organic waste management*(255). doi:10.1016/j.jclepro.2020.120040