

**ANÁLISIS ECONÓMICO DE ALTERNATIVAS DE DENSIFICACIÓN DE RESIDUO
AGRÍCOLA DE COSECHA (RAC) DE CAÑA DE AZÚCAR PARA PROCESOS DE
COMBUSTIÓN**

ESTUDIANTES:

Andrés Felipe Vásquez Pipicano

Jose Alejandro Vidal Restrepo

DIRECTORES:

Diego Fernando Manotas Duque, Ph.D.

Pablo Cesar Manyoma Velásquez, Ph.D.



UNIVERSIDAD DEL VALLE

SEDE CALI

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

SANTIAGO DE CALI, AGOSTO 16 DE 2022

Tabla de contenido

1. Resumen	5
2. Palabras claves.....	5
3. Introducción	6
4. Planteamiento del problema.....	7
5. Objetivos.....	9
5.1. Objetivo general	9
5.1.1 <i>Objetivos específicos</i>	9
6. Metodología	10
7. Caracterización de procesos de densificación de residuo agrícola de cosecha de caña de azúcar, sus estructuras de costos y gastos.....	10
7.1. Caracterización y selección de rutas	12
7.2. Determinación de grado de relación, nivel de beneficio y vida económica.....	18
7.3. Determinación de costos de inversión CapEx	18
7.4. Determinación de costos de operación y logística	20
8. Desarrollo de modelo financiero para la valoración y comparación económica de las diferentes alternativas seleccionadas.....	22
8.1. Definición de parámetros de entrada	22
8.2. Definición de supuestos	23
8.3. Construcción de flujo de caja libre	24
8.4. Estimación de gastos operacionales	25
8.5. Estimación del WACC.....	25
8.6. Estimación de criterios de decisión	26
8.6.1. Costo presente equivalente (CPE).....	26
8.6.2. Costo anual equivalente (CAE)	27
8.6.3. Costo por tonelada puesta en planta (COP/Ton)	27
9. Análisis de riesgo.....	27
9.1. Resultados de simulación	29
10. Conclusiones y recomendaciones	34
11. Referencias	35

Lista de figuras

Figura 1. <i>Composición del residuo agrícola de cosecha</i>	7
Figura 2. <i>Residuo agrícola de cosecha en campo</i>	8
Figura 3. <i>Rutas de densificación de RAC de caña de azúcar</i>	12
Figura 4. <i>Proceso de cosecha de caña de azúcar</i>	13
Figura 5. <i>Proceso de encallado</i>	13
Figura 6. <i>Proceso de producción de fardos en campo</i>	14
Figura 7. <i>Maquinaria para recolección de fardos en campo</i>	14
Figura 8. <i>Proceso de cargue y transporte de fardos</i>	15
Figura 9. <i>Proceso de separación, reducción y tamizado de RAC</i>	15
Figura 10. <i>Almacenamiento de RAC en fábrica</i>	16
Figura 11. <i>Máquina picadora forrajera trabajando</i>	16
Figura 12. <i>Proceso de recolección RAC picado en campo</i>	17
Figura 13. <i>Transporte de forraje a fábrica</i>	18
Figura 14. <i>Estructura del modelo financiero para cada ruta</i>	24
Figura 15. <i>Histograma de frecuencias para la ruta 1 del costo por tonelada puesta en fábrica</i>	30
Figura 16. <i>Histograma de frecuencias para la ruta 2 del costo por tonelada puesta en fábrica</i> ...	30
Figura 17. <i>Histograma de frecuencias para la ruta 3 del costo por tonelada puesta en fábrica</i>	31
Figura 18. <i>Histograma de frecuencias para la ruta 1 del costo presente equivalente</i>	31
Figura 19. <i>Histograma de frecuencias para la ruta 2 del costo presente equivalente</i>	32
Figura 20. <i>Histograma de frecuencias para la ruta 3 del costo presente equivalente</i>	32

Lista de tablas

Tabla 1. <i>Metodología para el desarrollo del proyecto de grado</i>	11
Tabla 2. <i>Grado de relación, nivel de beneficio y vida económica para las 3 rutas evaluadas</i>	18
Tabla 3. <i>CapEx para las rutas de densificación caracterizadas</i>	20
Tabla 4. <i>Costo de combustible anual por actividad</i>	21
Tabla 5. <i>Costo de mano de obra directa</i>	21
Tabla 6. <i>Porcentaje de gastos operacionales con respecto al costo total</i>	25
Tabla 7. <i>Estimación del porcentaje de deuda</i>	26
Tabla 8. <i>Resultados criterios de decisión a evaluar</i>	27
Tabla 9. <i>Densidad de carga y desviación estándar para las rutas de densificación</i>	28
Tabla 10. <i>Eficiencia de maquinaria para simulación Montecarlo</i>	28
Tabla 11. <i>Consumo de combustible para simulación Montecarlo</i>	29
Tabla 12. <i>Resultados obtenidos para el costo por tonelada puesta en fábrica</i>	33
Tabla 13. <i>Resultados obtenidos para el costo presente equivalente</i>	33

1. Resumen

El presente trabajo de grado tiene como objetivo ser un apoyo para la evaluación de procesos de densificación de residuo agrícola de cosecha (RAC) de caña de azúcar aptos para su utilización como fuente de energía renovable. Primero se realizó una caracterización y selección de las tres principales rutas de densificación de RAC, definiendo sus estructuras de costos, gastos y nivel de beneficio. Posteriormente se elaboró un modelo financiero proyectado a 10 años para la comparación económica de las alternativas, obteniendo la ruta de cosecha integral como la más económica. Finalmente, se realizó un análisis de riesgo financiero de las diferentes alternativas, aplicando simulación Montecarlo, obteniendo resultados congruentes con el modelo financiero realizado. En conclusión, el modelo financiero construido es una herramienta que apoya la selección de la mejor ruta de densificación de RAC de caña de azúcar.

2. Palabras claves

Modelo financiero, residuo agrícola de cosecha, caña de azúcar, densificación, simulación Montecarlo, análisis de riesgo, comparación económica.

3. Introducción

Este documento tiene la intención de ser un apoyo para la evaluación de procesos de densificación de residuo agrícola de cosecha (RAC) de caña de azúcar aptos para su utilización como fuente de energía renovable. Estos procesos tienen como objetivo aumentar la densidad del residuo para facilitar su manejo y transporte y aumentar su densidad energética. Se plantea realizar un análisis económico de diferentes alternativas de recolección de RAC para su futura combustión, teniendo en cuenta factores de riesgo financiero.

El residuo agrícola es un tema que se investiga ampliamente en el mundo con aproximadamente 9.858 publicaciones hasta la fecha. Los países que lideran estas investigaciones en número de publicaciones son Estados Unidos, China, India, Canadá y Brasil, respectivamente. Asimismo, las instituciones que más han investigado en el tema son *Chinese Academy of Sciences*, *Indian Council of Agricultural Research*, *Agriculture and Agriculture-food Canada* y *USDA Agricultural Research Service*. Además, se ha invertido aproximadamente 383 millones de dólares en los últimos 20 años para la investigación de este tema, siendo la *European Commission* la entidad que más ha aportado dinero con un 48.4% del total invertido. En síntesis, es un tema cuya relevancia ha venido creciendo exponencialmente en el mundo (*Crop Residue - Wizdom.Ai*, 2021).

En la actualidad, la humanidad está girando hacia las fuentes de energía renovables, cuyo pronóstico es que provean un 30% de la generación global de electricidad para 2024 (IEA, 2019). El residuo agrícola de cosecha, por ejemplo el de caña de azúcar, es una fuente de energía neutra en carbono porque absorbe el CO₂ durante su crecimiento y luego lo libera a la atmósfera durante su combustión, obteniendo un balance neto cero de emisiones de CO₂ (Perea-Moreno et al., 2017). El RAC es por lo tanto un tipo de biomasa potencial como fuente para la generación de energía renovable.

Para los países tropicales y subtropicales, la caña de azúcar suele ser un elemento importante para su economía y desarrollo. Se estima que este cultivo se siembra en, al menos, 200 países. Además, Sur América contribuye con el 34% de la producción mundial (Rivera-Cadavid et al., 2019). Específicamente en Colombia, la cosecha de la caña de azúcar aporta un 2.9% del PIB agrícola nacional. Este cultivo representa, además, el 24.7% del PIB agrícola del Valle del Cauca, el 15.1% del Cauca y el 1.8% de Risaralda (Asocaña, 2020). Por lo tanto, la producción de caña es una actividad económica influyente para el país.

En la actualidad, se estima que el potencial de producción de RAC de caña de azúcar en Colombia es de cerca del 25% del total de caña cultivada (Cobo-Barrera, 2012). Este podría ser

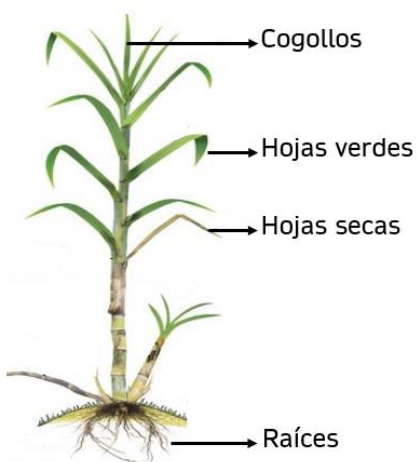
densificado y luego usado en un proceso de combustión, con el objetivo de reemplazar el carbón como generador de energía. En conclusión, el propósito de este trabajo de grado es escoger la mejor opción de densificación de RAC teniendo en cuenta factores económicos y de riesgo. Para cumplir con los objetivos del proyecto, se hará uso de la herramienta Microsoft Excel, un análisis financiero utilizando diferentes indicadores económicos (CPE - CAE) y un análisis de riesgo mediante la implementación de una simulación Montecarlo.

4. Planteamiento del problema

Colombia es un país productor de caña de azúcar cuya producción anual ronda los 24 millones de toneladas, según Asocaña (2020). Su clima tropical hace posible cultivar y cosechar esta planta a lo largo de todo el año. Durante el proceso de recolección de este cultivo quedan residuos agrícolas de cosecha, que están compuestos por hojas verdes y secas, raíces y el cogollo de la planta (ver figuras 1 y 2). Todo este residuo es biomasa que posteriormente podrá ser dejada en el campo como abono, recogida para la preparación del suelo, usada para la producción de biocombustibles o para la producción de otros bienes agroindustriales (Rivera-Cadavid et al., 2019).

Figura 1

Composición del residuo agrícola de cosecha



Nota. Cenicaña (2021)

Figura 2

Residuo agrícola de cosecha en campo



Nota. Autoría propia a partir de la visita a un ingenio

Existe la posibilidad de utilizar el RAC para combustión en procesos industriales. Para que este proceso sea eficiente, una posibilidad es densificar este residuo de tal forma que se faciliten las condiciones de manejo y aumente su densidad energética. Actualmente, se utiliza el bagazo sobrante de la caña y carbón para el proceso de combustión. Dado que la eficiencia energética del RAC y la del carbón son diferentes, es necesario precisar que para reemplazar una tonelada de carbón son necesarias 1.53 toneladas de RAC de caña de azúcar (Ojeda et al., 2018). Existen varios tipos de densificación de RAC, entre ellos la cosecha integral, máquinas picadoras forrajeras, enfardado y briqueteado. Cada método varía por su densidad (Kg/m^3), poder calorífico (KJ/Kg), necesidad de maquinaria, mano de obra, entre otros factores técnicos y económicos.

En Colombia se estima que el potencial de producción de RAC de caña de azúcar es de cerca del 25% del total de caña cultivada. En 2019 se produjeron 23.33 millones de toneladas de caña de azúcar, por lo tanto, la disponibilidad de RAC fue de aproximadamente 5.83 millones de toneladas, equivalentes a 3.81 millones de toneladas de carbón. Asimismo, gracias a que el RAC es una fuente de energía renovable, se estaría apoyando el objetivo general del acuerdo de París de reducir la huella de carbón en el mundo (*United Nations Framework Convention on Climate Change*, 2021). En consecuencia, existe una oportunidad de aprovechamiento del residuo agrícola de cosecha de caña de azúcar en Colombia.

Se ha investigado ampliamente sobre el uso del RAC de caña de azúcar para la producción de bioenergía, sobre todo en países cuya producción agrícola es relevante. De acuerdo con Go y

Conag (2019), los residuos de cosecha de la caña de azúcar pueden ser utilizados para la generación de energía. Los autores encontraron que en Filipinas el RAC de caña de azúcar tiene gran potencial para desplazar el carbón como fuente de energía eléctrica. Otros autores, como en el caso de Assureira y Assureira (2017), investigaron el uso de residuos agrícolas de cosecha para apoyar el cambio de la matriz energética de Perú. Igualmente, Hiloidhari et al. (2014) exponen que el potencial de producción de bioenergía a partir de residuos de diversos cultivos en India, podría suplir el 17% del consumo primario de energía de todo el país. Asimismo, Morais et al. (2020) y Cherubin et al. (2021) han realizado investigaciones en Brasil acerca del impacto de la extracción del RAC de caña de azúcar en el suelo sugiriendo no retirar todo el residuo para evitar disminución de los nutrientes de la tierra. Por lo tanto, existen investigaciones a nivel mundial sobre el tema que buscan impulsar el uso de biomasa para la generación de energía, especialmente de caña de azúcar.

En síntesis, este trabajo busca promover la producción y la utilización de bioenergía a partir de RAC, para contribuir con la modificación de la matriz energética en Colombia. Específicamente, se van a identificar, evaluar y seleccionar las mejores alternativas para la densificación de residuos de caña de azúcar, considerando factores técnicos, económicos y de riesgo. En la sección 3 se plantean los objetivos del estudio y en la sección 4 se resume la metodología aplicada. En la sección 5 se da respuesta al primer objetivo específico sobre la caracterización de las alternativas de densificación del RAC. Posteriormente, en la sección 6 se expone el modelo financiero para la evaluación de las alternativas de densificación identificadas. A continuación, en la sección 7 se describe el análisis de riesgo de las alternativas y, finalmente, en la sección 8 se enuncian las principales conclusiones del estudio.

5. Objetivos

5.1. Objetivo general

Evaluar la viabilidad económica del uso del residuo agrícola densificado de cosecha de caña de azúcar en procesos de combustión para su utilización como fuente de energía renovable.

5.1.1 Objetivos específicos

- Caracterizar los diferentes procesos de densificación de residuo agrícola de cosecha de caña de azúcar, sus estructuras de costos, gastos y nivel de beneficio.

- Desarrollar un modelo financiero para la valoración y comparación económica de las diferentes alternativas de densificación caracterizadas.
- Analizar el riesgo financiero de las diferentes alternativas de densificación ya caracterizadas.

6. Metodología

Para abordar el problema, se realizó un análisis bibliométrico con el objetivo de encontrar información relevante para el proyecto. Durante esta etapa se hizo uso de bases de datos como Scopus, ScienceDirect y Mendeley como herramienta para gestionar la información encontrada. Además, se realizaron reuniones con Cenicaña y SENECA que permitieron recolectar información para desarrollar el objetivo específico número uno. Una vez realizados estos pasos, fue necesario determinar los costos de inversión, operacionales y de mantenimiento de cada alternativa de densificación, con base en la teoría de costos, referentes proporcionados por Cenicaña y utilizando Excel como herramienta de manejo de datos.

Para desarrollar el modelo financiero propuesto en el objetivo específico número dos, se hizo uso de la información de las rutas de densificación ya caracterizadas con el propósito de estimar los criterios de decisión a utilizar (CPE – CAE – Costo por tonelada puesta en planta). Para esto, se aplicaron teorías y métodos como flujo de caja libre, estructura financiera, factibilidad económica, y análisis de escenarios.

Por último, en concordancia con el objetivo específico número 3, se hizo uso de la teoría del riesgo financiero para la caracterización de factores de riesgo asumiendo distribuciones de probabilidad o ajustando las distribuciones a partir de datos históricos. En base a lo anterior, se realizó una simulación Montecarlo, utilizando @Risk, en donde se analizó el comportamiento del CPE Y el costo por tonelada puesta en fábrica. La metodología antes mencionada se detalla a continuación en la tabla 1.

7. Caracterización de procesos de densificación de residuo agrícola de cosecha de caña de azúcar, sus estructuras de costos y gastos

A continuación, se describirán los procesos más relevantes de densificación de RAC de caña de azúcar. Para este trabajo se decidió evaluar tres rutas de densificación, para la cuales se realizó un análisis de costos variables, costos fijos y gastos.

Tabla 1
Metodología para el desarrollo del proyecto de grado

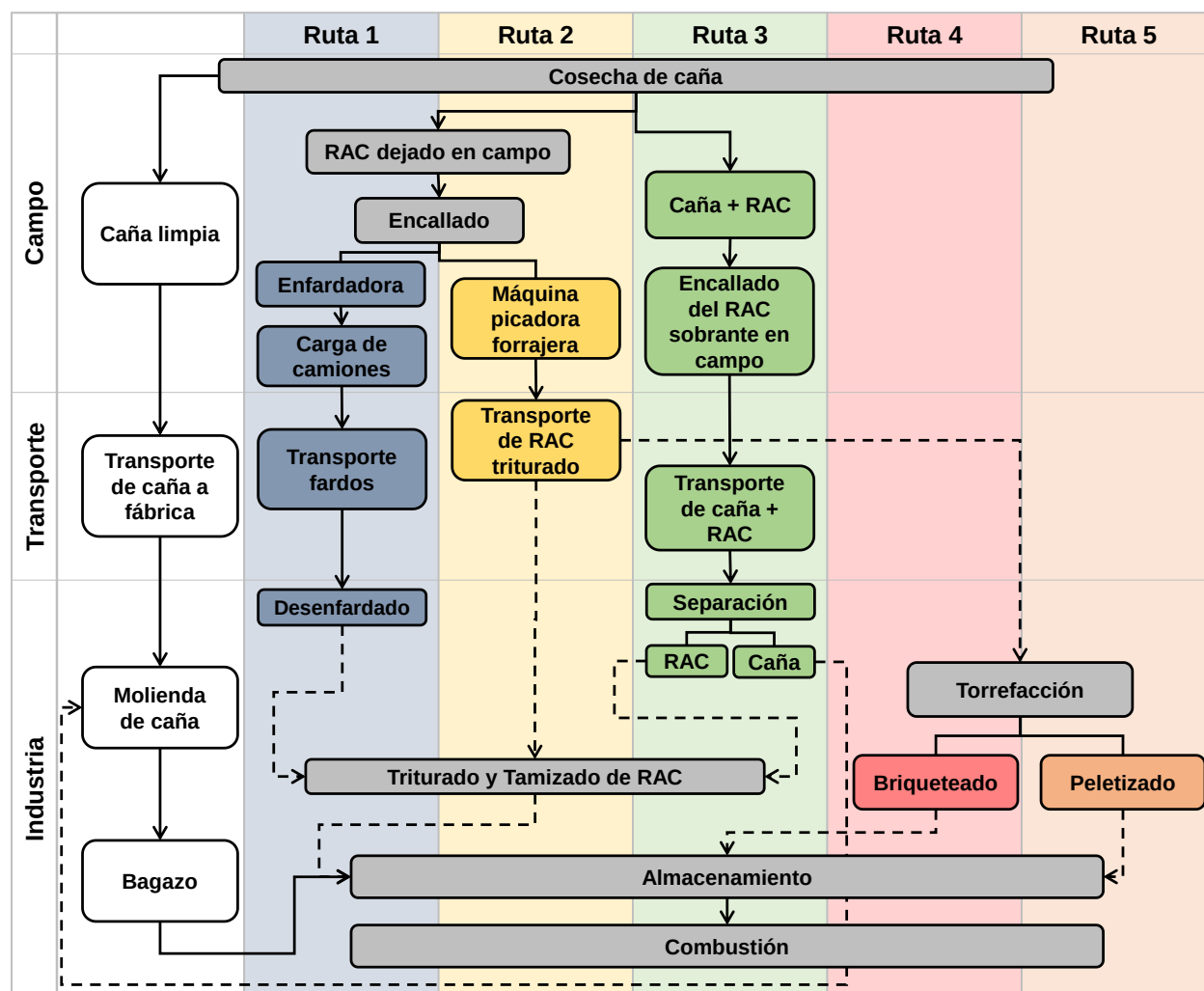
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	ACTIVIDADES DESARROLLADAS		PRECEDENCIAS	HERRAMIENTAS Y SOFTWARE	TEORÍAS Y MÉTODOS	REFERENTES
Caracterizar los diferentes procesos de densificación de residuo agrícola de cosecha de caña de azúcar, sus estructuras de costos, gastos y riesgos financieros.	A	Realizar una investigación bibliométrica		Scopus, Mendeley, ScienceDirect y Excel	Teoría de bibliometría. Capital de trabajo. Sistemas de depreciación y amortización. Teoría de costos.	Curso Semillero de investigación en Ingeniería.
	B	Realizar una investigación primaria con CENICAÑA y SENECA		Correo electrónico, Reuniones vía Google meet		
	C	Seleccionar las rutas de densificación a evaluar	A,B	Correo electrónico, Reuniones vía Google meet		
	D	Caracterizar las alternativas desde el punto de vista de grado de relación, nivel de beneficio y vida económica	C	Excel		
	E	Determinar los costos de inversión de cada alternativa (CAPEX)	D	Excel, Indicadores de productividad		
	F	Determinar los costos de operación, logística y mantenimiento para cada alternativa (OPEX)	D	Excel, Indicadores logísticos y operativos		
	G	Determinar el nivel de beneficio de cada alternativa (Cuantificación de beneficios)	E,F	Excel, Ley 1715		
Desarrollar un modelo financiero para la valoración y comparación económica de las diferentes alternativas de densificación caracterizadas.	H	Definir parámetros de entrada del modelo	G	Excel	Análisis marginal. Estructura financiera. Factibilidad económica. Capital de trabajo. Sistemas de depreciación y amortización. Valor presente y futuro. Valor del dinero en el tiempo. Análisis económico. Diagrama de tiempo. Análisis de escenarios. Comparación de alternativas.	Curso de Análisis económico de decisiones (Blank & Tarquin, 2018), Curso de Finanzas (Atrill, 2020).
	I	Definir supuestos para el modelo	H	Excel		
	J	Construir el flujo de caja de cada alternativa (flujo de egresos y beneficios tributarios asociados)	I	Excel		
	K	Construir el flujo de caja marginal para comparación de alternativas	J	Excel		
	L	Estimar la tasa de descuento para el análisis	K	Excel		
	M	Estimar criterios de decisión a utilizar (LCOE, CPE, TIR Marginal)	L	Excel		
Analizar el riesgo financiero de las diferentes alternativas de densificación ya caracterizadas.	N	Identificar y caracterizar los factores de riesgo	M	Excel	Teoría de riesgo financiero. Teoría de simulación Montecarlo.	Curso de Ingeniería financiera y gestión del riesgo (Beaumont, 2004).
	O	Definir variables de entrada y parámetros de simulación	N	Excel @Risk		
	P	Seleccionar variables de salida (Criterios de decisión)	O	Excel		
	Q	Analizar los resultados	P	Excel		

7.1. Caracterización y selección de rutas

Durante la cosecha de la caña de azúcar, se obtiene el tallo de la caña que posteriormente es llevado a fábrica donde se obtienen productos como azúcar, miel, papel, etanol, entre otros. Por otra parte, esta cosecha deja un residuo que se conoce como RAC. Actualmente este residuo es dejado en campo como abono. Sin embargo, también puede ser utilizado para la producción de biocombustibles y la producción de otros bienes agroindustriales. Cenicaña proporcionó diferentes artículos e informes de casos de estudios brasileiro, líder mundial de producción de azúcar (Go & Conag 2019), que se utilizaron como base para la construcción de las rutas de densificación ilustradas en la figura 3.

Figura 3

Rutas de densificación de RAC de caña de azúcar



Nota. Adaptado de Neves, (2019)

Las cinco rutas ilustradas son las más utilizadas para el aprovechamiento del RAC según Ojeda (2021). Sin embargo, las rutas 4 y 5 no cuentan con una tecnología madura que permita realizar el briqueteado o peletizado en campo. Es por esto, que en el presente trabajo de investigación se abordaron las rutas 1, 2 y 3 que se describen detalladamente a continuación.

Ruta 1: Enfardado

- Cosecha: Se cosecha la caña y luego la máquina de cosecha separa el RAC del tallo de la planta. Posteriormente el tallo es llevado a la industria y el RAC es dejado en campo semipicado. (ver figura 4)

Figura 4

Proceso de cosecha de caña de azúcar



Nota. Deere & Company (2022)

- Encallado: Con una máquina especializada, se abren surcos en la tierra que permiten la continuidad de la cosecha para la siguiente temporada y a su vez, el encallado del RAC. (ver figura 5)

Figura 5

Proceso de encallado



Nota. LEMKEN GmbH & Co (2020)

- Secado: Se deja el RAC en campo entre 3 a 5 días para su secado.
- Enfardado: Se comprime el RAC en fardos rectangulares haciendo uso de una enfardadora. (ver figura 6)

Figura 6

Proceso de producción de fardos en campo

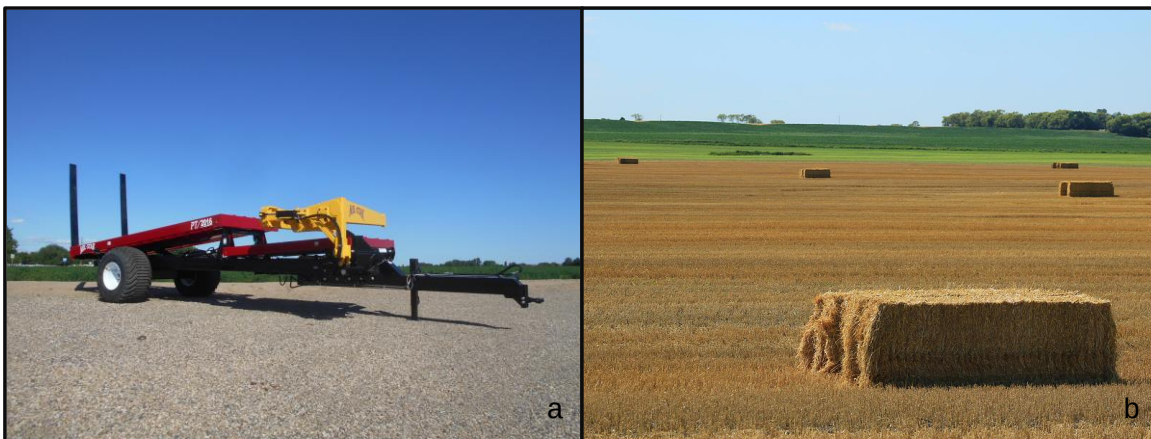


Nota. Massey Ferguson (2022)

- Recolección: Se recolectan los fardos del proceso anterior mediante el uso de un remolque alacrán. (ver figura 7)

Figura 7

Maquinaria para recolección de fardos en campo



Nota. ^aMachineryPete.com (2022) ^bHamm (2022)

- Cargue y transporte: Se cargan los vagones de un camión con los fardos por medio de una alzada y luego se transportan a la planta. (ver figura 8)

Figura 8

Proceso de cargue y transporte de fardos



Nota. ^aProyecto SUCRE (2017) ^bSundry Photography (2019)

- Recepción de fardos: Se utiliza una alzacora para descargar los fardos del camión en la planta.
- Desenfardado, tamizado y triturado: Se separan los fardos, se tamizan y luego se trituran. (ver figura 9)

Figura 9

Proceso de separación, reducción y tamizado de RAC



Nota. Cenicaña (n.d.)

- Almacenamiento: Se almacena el RAC en planta para su posterior uso. (ver figura 10)

Figura 10

Almacenamiento de RAC en fábrica



Nota. Linero (2015)

Ruta 2: Máquina picadora forrajera.

- Cosecha: Se cosecha la caña y luego la máquina de cosecha separa el RAC del tallo de la planta. Posteriormente el tallo es llevado a la industria y el RAC es dejado en campo semipicado. (ver figura 4)
- Encallado: Con una máquina especializada, se abren surcos en la tierra que permiten la continuidad de la cosecha para la siguiente temporada y a su vez, el encallado del RAC. (ver figura 5)
- Secado: Se deja el RAC en campo entre 3 a 5 días para su secado.
- Recolección y picado: Se recolecta el RAC seco, se tritura haciendo uso de una máquina picadora forrajera y luego se deposita en los vagones de un camión. (ver figura 11)

Figura 11

Máquina picadora forrajera trabajando



Nota. Interempresas Media (2019)

- Transporte: Se transporta el RAC picado a planta. (ver figura 12)

Figura 12

Proceso de recolección RAC picado en campo



Nota. Neves (2019)

- Tamizado y triturado: Se tamiza el RAC transportado y luego se tritura nuevamente en planta. (ver figura 9)
- Almacenamiento: Se almacena el RAC en planta para su posterior uso. (ver figura 10)

Ruta 3: Cosecha integral.

- Cosecha integral: Se cosecha la caña y un porcentaje del residuo agrícola de cosecha y se deposita en los vagones del camión. (ver figura 4)
- Encallado: Con una máquina especializada, se abren surcos en la tierra que permiten la continuidad de la cosecha para la siguiente temporada y a su vez, el encallado del RAC. (ver figura 5)
- Transporte: Se transporta el RAC y la caña a la zona de separación en planta. (ver figura 13)
- Separación, tamizado y reducción de RAC: Se separa el tallo de la caña del RAC en planta mediante el uso de estructuras con ventiladores, se tamiza el RAC, luego se tritura. (ver figura 9)
- Almacenamiento: Se almacena el RAC en planta para su posterior uso. (ver figura 10)

Figura 13*Transporte de forraje a fábrica*

Nota. ^aNeves (2019) ^bTransporte Carretero (2014)

7.2. Determinación de grado de relación, nivel de beneficio y vida económica

Para la formulación del modelo, se definió un periodo de evaluación de 10 años para todas las rutas (Ojeda, 2022). Además, fue necesario definir el tipo de relación de las rutas caracterizadas, es decir, si las rutas a evaluar eran mutuamente excluyentes, complementarias o independientes. En este caso, se definieron las 3 rutas como mutuamente excluyentes. Asimismo, se estableció que la cantidad de RAC movida sería la misma para las 3 rutas, es decir, que su nivel de beneficio (ingresos) sería el mismo. Estas características se pueden evidenciar en la tabla 2.

Tabla 2

Grado de relación, nivel de beneficio y vida económica para las 3 rutas evaluadas

	Ruta 1 Enfardado	Ruta 2 Máquina Picadora Forrajera	Ruta 3 Cosecha Integral
Periodo de evaluación	10 años	10 años	10 años
Cantidad de RAC movido al día	2000 (ton/día)	2000 (ton/día)	2000 (ton/día)
Mutuamente Excluyentes	Si	Si	Si

Nota. Elaboración propia

7.3. Determinación de costos de inversión CapEx

El *CapEx* o *Capital Expenditure* hace referencia a la inversión realizada por una organización para adquirir, mejorar y mantener sus activos fijos tales como propiedad, planta, tecnología o

equipos. Para determinar la inversión inicial de cada una de las alternativas, fue necesario analizar la maquinaria que se requiere para cada ruta. Dado que actualmente los ingenios realizan su operación de cosecha y encallado, solo se tuvo en cuenta aquella maquinaria adicional necesaria para la recolección del RAC en cada ruta.

Para determinar el número de máquinas a utilizar en cada ruta, se utilizó información acerca de la eficiencia de cada máquina y datos generales, recalando el supuesto de que se mueve la misma cantidad de RAC para cada una de las rutas. En la ecuación 1, se observa la forma general para calcular el número de máquinas necesarias de las rutas. Se calcula con el RAC movido al día (toneladas, fardos) dividido entre la eficiencia diaria de la máquina utilizada. Como ejemplo, en la ecuación 2, se muestra el cálculo del número de enfardadoras necesarias para enfardar 2000 toneladas de RAC al día, el resultado de esta ecuación se aproxima al entero superior.

$$\text{número de máquinas} = \frac{\text{unidad de RAC movida al día}}{\text{eficiencia diaria de maquinaria}} \quad (1)$$

$$\text{Enfardadoras necesarias} = \frac{\text{toneladas de RAC movidas al día}}{\text{toneladas de RAC movidas al día por enfardadora}} = 4.37 \approx 5 \quad (2)$$

En la tabla 3, se puede observar el *CapEx* calculado para cada una de las rutas. Se incluye el tipo de maquinaria, su costo en dólares, la cantidad de máquinas necesarias para mover el RAC requerido y el total de inversión necesaria.

Tabla 3*CapEx para las rutas de densificación caracterizadas*

Ruta	Maquinaria	Modelo	Costo Unitario (USD)	Cantidad	Costo (USD)
Ruta 1. Fardos	Enfardadora	Massey Ferguson 2270 XD	\$ 172,377	5.0	\$ 861,885
	Tractor para enfardadora	NEW HOLLAND T8.350	\$ 193,000	5.0	\$ 965,000
	Tractor	New Holland TM 7040	\$ 103,000	2.0	\$ 206,000
	Remolque alacrán	Mil Stak PT 2150	\$ 139,500	2.0	\$ 279,000
	Alzadora	JCB modelo TLT 35	\$ 52,448	2.0	\$ 104,896
	Filtro rotativo	N/A	\$ 200,904	1.0	\$ 200,904
	Banda transportadora	N/A	\$ 775,321	1.0	\$ 775,321
	Picador	N/A	\$ 503,259	1.0	\$ 503,259
	Costo de instalación y seguros	N/A	N/A	N/A	\$ 73,974
Total CapEx Ruta 1					\$3,970,239
Ruta 2. Máquina picadora	Máquina picadora forrajera	New Holland FR 9060	\$ 514,000	5	\$2,570,000
	Tractor	New Holland TM 7040	\$ 103,000	5	\$ 515,000
	Vagón de auto volteo	Richardton 960 Dump Traile	\$ 24,500	10	\$ 245,000
	Filtro Rotativo	N/A	\$ 200,904	1	\$ 200,904
	Banda transportadora	N/A	\$ 775,321	1	\$ 775,321
	Triturador	N/A	\$ 503,259	1	\$ 503,259
	Costo de instalación y seguros	N/A	N/A	N/A	\$ 73,974
	Total CapEx Ruta 2				\$4,883,458
Ruta 3. Cosecha integral	Filtro Rotativo	Nuevo	\$ 200,904.00	1	\$ 200,904
	Banda transportadora	Nuevo	\$1,822,005.00	1	\$1,822,005
	Sistema de limpieza	Nuevo	\$ 399,221.00	1	\$ 399,221
	Triturador	Nuevo	\$ 503,259.00	1	\$ 503,259
	Costo de instalación y seguros	N/A	N/A	N/A	\$ 146,269
Total CapEx Ruta 3					\$3,071,658

Nota. Elaboración propia con base en precios consultados de mercado (Ver anexo 1)

7.4. Determinación de costos de operación y logística

Los costos de operación y logística para las rutas definidas están dados por el consumo de combustible de cada máquina y el costo de mano de obra directa. El cálculo general del costo de combustible se puede observar en la ecuación 3. En esta se relaciona el consumo de gasolina de la máquina con las toneladas movidas al día y el costo de la gasolina, esta ecuación varía dependiendo del dato técnico que se tenga de la maquinaria.

$$\text{Costo de gasolina} = \text{consumo por tonelada de RAC} \times \text{toneladas de RAC movidas al día} \times (3) \text{ costo de la gasolina}$$

Para el cálculo del costo de mano de obra directa se tuvo en cuenta la cantidad de máquinas que se necesitan para la operación en cada ruta, la cantidad de personas necesarias para cada operación y el salario de cada operador, este salario varía con respecto a la labor realizada por el trabajador. En consecuencia, la cantidad de trabajadores necesarios por operación y el salario

fueron discutidos con Cenicaña (Ojeda, 2021). A continuación, se presenta una tabla resumen de los costos de combustible para cada ruta (tabla 4) y de los costos de mano de obra directa (tabla 5).

Tabla 4

Costo de combustible anual por actividad

Ruta	Actividad	Consumo por año (COP)
Ruta 1. Fardos	Enfardado	\$ 2,185,977,095
	Recolección (Remolque alacrán + tractor)	\$ 618,363,283
	Alzadora	\$ 150,029,124
	Transporte a planta	\$ 2,253,934,167
	Costo total por consumo de combustible	\$ 5,208,303,670
Ruta 2. Máquina picadora	Máquina picadora forrajera	\$ 2,152,083,282
	Vagón auto volteo + tractor	\$ 1,568,808,374
	Transporte a planta	\$ 1,351,588,753
	Costo total por consumo de combustible	\$ 5,072,480,410
Ruta 3. Cosecha integral	Transporte a planta	\$ 1,078,854,369
	Costo total por consumo de combustible	\$ 1,078,854,369

Nota. Elaboración propia (Ver anexo 1)

Tabla 5

Costo de mano de obra directa

Ruta	Actividad	SMMLV	Técnicos por actividad	Técnicos totales por operación	Costo anual (COP)
Ruta 1. Fardos	Enfardado	3	1	5	\$ 180,000,000
	Recolección (Remolque alacrán + tractor)	2.5	2	4	\$ 120,000,000
	Alzadora	3	1	2	\$ 72,000,000
	Transporte a planta	2.5	1	5	\$ 150,000,000
	Desenfardado, tamizado y reducción	3	2	2	\$ 72,000,000
	Total	14	7	18	\$ 594,000,000
Ruta 2. Máquina picadora	Máquina picadora forrajera	3	1	5	\$ 180,000,000
	Vagón auto volteo + tractor	2.5	2	10	\$ 300,000,000
	Transporte a planta	2.5	1	6	\$ 180,000,000
	Área de tamizado y reducción	3	2	2	\$ 72,000,000
	Total	11	6	23	\$ 732,000,000
Ruta 3. Cosecha integral	Transporte a fábrica	2.5	1	8	\$ 240,000,000
	Separación	3	1	1	\$ 36,000,000
	Área de tamizado y reducción	3	1	1	\$ 36,000,000
	Total	8.5	3	10	\$ 312,000,000

Nota. ^a(Ojeda, 2022)

8. Desarrollo de modelo financiero para la valoración y comparación económica de las diferentes alternativas seleccionadas

En este capítulo se plantea el desarrollo del modelo financiero haciendo uso de la información recolectada en la sección 5. Se definirán los parámetros utilizados, los supuestos, se describirá la forma en que se construyó el flujo de caja y los criterios de decisión utilizados.

8.1. Definición de parámetros de entrada

A continuación, se presentan los parámetros del modelo clasificados en tres grupos; datos generales, financieros y técnicos. Dentro del grupo de los datos generales, se recolectó información general del cultivo de caña de azúcar y la disposición del RAC. Asimismo, entre los datos financieros se encuentran la tasa de cambio del peso colombiano con respecto al dólar, el costo de la gasolina, el IPC a largo plazo y demás datos financieros. Adicionalmente, se incluyen datos técnicos de la maquinaria que permiten calcular eficiencias, consumos y costos de todo el proceso de transporte y densificación de RAC.

A continuación, se presentan los datos generales:

- Porcentaje de RAC por tonelada de caña (Ojeda, 2021).
- Número de días de trabajo al año (Ojeda, 2021).
- Toneladas de caña movidas al día por ingenio.
- Distancia promedio entre área de cosecha y planta (Ojeda, 2021).
- Número de horas trabajadas por día (Ojeda, 2022)

A continuación, se presentan los datos financieros:

- Tasa de cambio COP/USD.
- Costo de la gasolina.
- IPC largo plazo.
- Costo de mantenimiento (4%-6% del CapEx) (Investment Centre Division, 2007).
- Costo de instalaciones iniciales.
- Aumento de SMMLV.
- Gasto operacional (% del costo variable) (Ojeda, 2022).
- Porcentaje de financiación (EMIS, 2022).
- TMR
- Tasa de financiación (EMIS, 2022).

- Impuesto de renta.
- WACC (EMIS, 2022).
- SMMLV (EMIS, 2022).

A continuación, se presentan los datos técnicos:

- Volumen de carga vagón bagacero (Cenicaña, n.d.)
- Vagones del camión bagacero (Ojeda, 2022).
- Densidad de fardos (Projeto SUCRE, 2017).
- Densidad de carga máquina picadora forrajera (Congreso Atalac técnicaña, 2018).
- Densidad de caña + RAC para cosecha integral (Cenicaña, n.d.).
- Velocidad promedio de tractomula (Projeto SUCRE, 2017).
- Volumen de fardos (Projeto SUCRE, 2017).
- Peso de un fardo.
- Eficiencia alzadora (Projeto SUCRE, 2017).
- Precio por metro de banda transportadora (Cenicaña, n.d.)
- Metros de banda transportadora para cada ruta (Ojeda, 2022).

8.2. Definición de supuestos

Para la construcción del modelo se definieron los siguientes supuestos:

- a) La cantidad de RAC movida al día es la misma para las tres rutas de densificación evaluadas.
- b) El periodo de evaluación es de 10 años para las tres rutas de densificación.
- c) Para la construcción del modelo no se tomaron en cuenta los ingresos del proyecto para cada ruta dado que no es un factor diferenciador, debido a que, como se supuso anteriormente, todas las alternativas prestan el mismo servicio.
- d) La distancia promedio entre el área de cosecha y la planta es la misma para las tres rutas de densificación evaluadas.
- e) La proyección de los gastos y costos se realizó con base en el IPC de largo plazo definido en un 3% por el Banco de la República de Colombia.
- f) Los costos de mantenimiento se asumen como un 5% del CapEx de cada ruta.
- g) Los gastos operacionales se asumen como un 15.74% del costo total para cada ruta (ver literal 6.4).
- h) El incremento en el SMMLV se fijó en un 8% anual.

- i) Se aplica la depreciación y amortización mediante el método de línea recta.
- j) Se asume un impuesto de renta del 35% para los diez años evaluados.
- k) Se asume una tasa mínima de retorno (TMR) del 16% para las tres rutas de densificación.
- l) Se asume la cantidad de RAC como un porcentaje de las toneladas cosechadas de caña de azúcar como un 25%.

8.3. Construcción de flujo de caja libre

A continuación, en la figura 14, se presenta la estructura general utilizada para la elaboración del flujo de caja libre proyectado a 10 años. Se recalca el hecho de que no se evaluaron beneficios económicos porque se asume que son iguales para las rutas evaluadas dado que se transporta la misma cantidad de RAC. Por lo tanto, los únicos factores que están restando en el modelo son; el escudo fiscal generado por la depreciación lineal de la maquinaria utilizada para cada ruta y el préstamo recibido al principio de los periodos evaluados (año 0) en caso de que se incurra en un porcentaje de deuda. El resto de los ítems, son costos y gastos de cada una de las rutas para la operación durante los 10 años evaluados.

Figura 14

Estructura del modelo financiero para cada ruta

Ítem	
+	Costos Variables
+	Costos de Mantenimiento
+	Mano de obra directa
+	Gastos Operacionales
-	Escudo Fiscal
Total de Costos y Gastos con Escudo Fiscal	
+	CapEx
Flujo de Caja Libre	

Nota. Elaboración propia

El modelo se desarrolló para cada una de las rutas. Ver anexo 1 (hojas electrónicas “Modelo Ruta 1” - “Modelo Ruta 2” - “Modelo Ruta 3”).

8.4. Estimación de gastos operacionales

Para estimar los gastos operacionales se hizo uso de la base de datos de EMIS, en donde se consultaron los estados de resultados y los balances generales de los años 2018 al 2021 para los ingenios Mayagüez, Incauca, Manuelita y Providencia. Se calculó entonces el porcentaje que representaba para cada año el gasto operacional con respecto al costo total, esto se puede apreciar en la tabla 6. Para definir el gasto operacional se decidió sacar el promedio desde el 2018 hasta el 2021 para los cuatro ingenios del porcentaje de gastos operacionales con respecto al costo total. Este valor se fijó en 15.74%.

Tabla 6

Porcentaje de gastos operacionales con respecto al costo total

Gastos operacionales	2021	2020	2019	2018
Mayaguez	16.66%	16.77%	15.05%	11.89%
Incauca	15.91%	19.74%	19.08%	19.63%
Manuelita	15.57%	13.51%	13.34%	13.94%
Providencia	15.06%	15.37%	14.97%	15.33%
Promedio	15.80%	16.35%	15.61%	15.20%

Nota. Elaboración propia con el apoyo de la base de datos de EMIS

8.5. Estimación del WACC

El WACC (*Weighted Average Cost of Capital*) o en español costo de capital promedio ponderado se calcula con base en el costo de capital y deuda. Para poder obtener este valor es necesario conocer el porcentaje financiado vía capital y vía deuda, la tasa de financiación, la Tasa Mínima de Retorno y el impuesto de renta (ver ecuación 4). Para el cálculo del porcentaje de deuda se utilizó la base de datos de EMIS, en donde se consultaron los estados de resultados y los balances generales de los años 2018 al 2021 para los ingenios Mayagüez, Incauca, Manuelita y Providencia. Con base en los informes consultados, se realizó un análisis del porcentaje de deuda para cada ingenio. Para el cálculo del porcentaje de deuda se utilizó la ecuación 5, en donde se relacionan la deuda a largo plazo y el total de pasivos y patrimonio para calcular un estimado del porcentaje utilizado de deuda y capital.

$$WACC = (\text{Porcentaje de capital} \times TMR) + (\text{Porcentaje financiado} \times \text{Tasa de financiación} \times (1 - \text{impuesto de renta})) \quad (4)$$

$$\text{Porcentaje de deuda del periodo } i = \frac{\text{deuda a largo plazo } (i)}{\text{Total pasivo y patrimonio } (i)} \quad (5)$$

En la tabla 7 se puede observar los resultados obtenidos para los años 2018 al 2021. Se tomó en cuenta el promedio del porcentaje de deuda desde el año 2018 hasta el 2021 para los cuatro ingenios evaluados. El porcentaje de deuda entonces se fijó en 37.8% y el porcentaje de capital en 62.2%.

Tabla 7

Estimación del porcentaje de deuda

Porcentaje de deuda	2021	2020	2019	2018
Mayagüez	45.76%	50.60%	44.87%	50.56%
Incauca	35.61%	35.82%	34.31%	33.60%
Manuelita	45.08%	44.92%	40.85%	39.89%
Providencia	23.50%	23.67%	26.96%	28.72%
Promedio	37.48%	38.75%	36.75%	38.19%

Nota. Elaboración propia haciendo uso de la base de datos de EMIS

Para determinar la TMR y el costo de la deuda se llevó a cabo una reunión con el Profesor Diego Manotas quien sugirió utilizar una TMR cercana al 16% y un costo de la deuda alrededor de un 12% (Manotas-Duque, 2022). Finalmente, se realizó el cálculo del WACC haciendo uso de la ecuación 4 y se fijó para el modelo en 12.90%.

8.6. Estimación de criterios de decisión

Los criterios de decisión que se decidieron utilizar para la comparación de las alternativas fueron el costo presente equivalente (CPE), el costo anual equivalente (CAE) y el costo por tonelada puesta en planta. Estos criterios fueron seleccionados porque el modelo presentado está basado en costos y gastos (flujo de egresos) por lo que no es factible utilizar criterios como el valor presente neto (VPN) o la tasa interna de retorno (TIR).

8.6.1. Costo presente equivalente (CPE)

El CPE es el costo llevado a presente de todos los flujos proyectados descontado a una tasa mínima de retorno (Blank & Tarquin, 2017). Para el cálculo de este criterio, se utilizó la función de Excel VPN (en inglés NPV) el resultado se presenta en la tabla 9.

8.6.2. Costo anual equivalente (CAE)

El CAE es el costo anualizado de todos los flujos proyectados, siendo este el mismo para cada periodo (Blank & Tarquin, 2017). Para el cálculo de este criterio se utilizó la función de Excel Pago (en inglés PMT) el resultado se presenta en la tabla 9.

8.6.3. Costo por tonelada puesta en planta (COP/Ton)

Para el cálculo del costo por tonelada puesta en planta se utilizó la ecuación 6, en donde se divide el CAE entre las toneladas proyectadas de RAC transportadas al año. Los resultados se presentan en la tabla 9.

$$\text{Costo por tonelada puesta en planta} = \frac{\text{CAE}}{\text{Toneladas de RAC movidas al año}} \quad (6)$$

Tabla 8

Resultados criterios de decisión a evaluar

Ruta	CPE	CAE	COP/TON
1. FARDOS	\$70,849,535,311	\$13,005,130,118	\$19,125
2. MÁQUINA PICADORA	\$74,378,902,752	\$13,652,980,278	\$20,078
3. COSECHA INTEGRAL	\$29,142,599,206	\$5,349,411,157	\$7,867

Nota. Elaboración propia (Ver anexo 1 hoja electrónica “Resumen indicadores”)

9. Análisis de riesgo

Existen muchos parámetros en el modelo que están sujetos a cambios. Cambios que pueden deberse al azar, a factores ambientales, a factores sociales, entre otros. En consecuencia, se realizó un análisis de riesgo, haciendo uso de la plataforma @Risk, la cual mediante simulación Montecarlo permite aplicar distribuciones a parámetros fijos y luego simular que pasaría si estos parámetros varían. Se realizó entonces un análisis de riesgo variando los siguientes parámetros.

- Porcentaje de RAC por tonelada de caña: este parámetro puede variar dependiendo del clima, la maquinaria utilizada, el tipo de caña de azúcar o demás factores. Se fijó una distribución normal para este parámetro con una media de 25% (0.25) y una desviación estándar de 0.025.
- Toneladas de caña movidas al día por ingenio: este parámetro afecta las toneladas disponibles de RAC. Debido a que en el Valle del Cauca existen diferentes tamaños de ingenios que cultivan entre 1,500 y 14,000 toneladas de caña al día, se utilizó una distribución triangular para modelar la cantidad de caña movida al día. Se fijó un mínimo

de 1,500 toneladas al día, un máximo de 14,000 toneladas al día y un valor más probable de 8,000 toneladas al día.

- Distancia promedio entre área de cosecha y fábrica: Este parámetro fue fijado en el modelo determinístico en 25 Km. Define la distancia que debe recorrer en promedio la caña o el RAC desde cualquier punto de cosecha hasta el punto de fábrica. Se simuló este parámetro con una distribución normal con media 25 Km y desviación estándar de 2.5.
- Densidad de carga: La densidad de carga para cada una de las rutas se simuló con una distribución normal. Este valor define cuántas toneladas se pueden llevar por cada metro cúbico. Estos valores fueron consultados con Cenicaña (Ver anexo 1 hoja electrónica “PARÁMETROS”), su variación depende del grado de compactación del RAC según la tecnología de densificación utilizada. En la tabla 9, se muestran los valores usados para las tres rutas.

Tabla 9

Densidad de carga y desviación estándar para las rutas de densificación

Densidad de carga	Media (ton/m ³)	Desviación estándar
Fardos	0.19	0.0187
Máquina Picadora	0.09	0.0093
Cosecha integral	0.29	0.0290

Nota. Elaboración propia

- Datos de eficiencia y consumo de combustible: Para los datos de eficiencia y de consumo de combustible de maquinaria se utilizaron distribuciones normales. Los valores se presentan en la tabla 10 y 11.

Tabla 10

Eficiencia de maquinaria para simulación Montecarlo

Eficiencia de maquinaria	Media	Desviación estándar
Enfardadora	19.09 t/hr	1.9090
Remolque alacrán	1.30 fardos/min	0.1300
Alzadora	12.00 min/viaje	1.2000
Máquina picadora forrajera	16.80 t/hr	1.6800
Vagón de auto volteo + tractor	16.80 t/hr	1.6800
Camión	30.00 km/hr	3.0000

Nota. Elaboración propia

Tabla 11*Consumo de combustible para simulación Montecarlo*

Ruta	Consumo de combustible	Media		Desviación estándar
1. Fardos	Enfardado	24.70	l/hr	2.4700
	Recolección de fardos	15.60	l/hr	1.5600
	Carga de camión	7.40	l/hr	0.7400
	Transporte a planta de fardos	0.90	l/km	0.0900
2. Máquina picadora forrajera	Picado de RAC en campo	21.40	l/hr	2.1400
	Recolección de RAC picado	15.60	l/hr	1.5600
	Transporte a planta de RAC picado	0.80	l/km	0.0800
3. Cosecha integral	Transporte a planta de caña + RAC	1.00	l/km	0.1000

Nota. Elaboración propia

- Precio del dólar con respecto al peso colombiano: este parámetro se simuló con una distribución triangular, se estableció un valor mínimo de 4,000 COP/USD, un máximo de 5,000 COP/USD y un valor más probable de 4,338 COP/USD.
- Costo del combustible: este parámetro se simuló con una distribución triangular, se estableció un valor mínimo de 9,200 \$/Galón, un máximo de 10,000 \$/Galón y un valor más probable de 9,405 \$/Galón.

9.1. Resultados de simulación

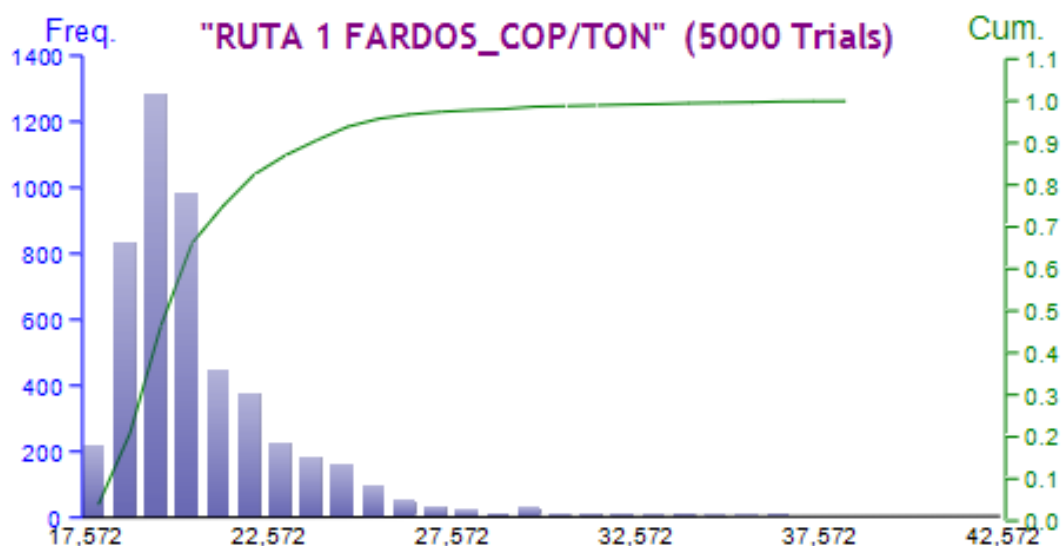
Una vez establecidos los parámetros de entrada se definieron los parámetros de salida de la simulación. Se escogieron el CPE y el costo por tonelada puesta en fábrica para analizar los resultados de la simulación Montecarlo. Finalmente, se definió una corrida de 5,000 réplicas o repeticiones para la simulación.

A continuación, de la figura 15 a 20 se muestran los histogramas de frecuencias obtenidos en la simulación. Igualmente, en las tablas 12 y 13, se muestran los resultados obtenidos de los criterios de decisión para la simulación. El CPE simulado más bajo se atribuye a cosecha integral, seguido de fardos y por último la ruta de máquina picadora, adicionalmente, la ruta con menor

CPE tiene el menor coeficiente de variación, siendo la opción más atractiva según los resultados obtenidos.

Figura 15

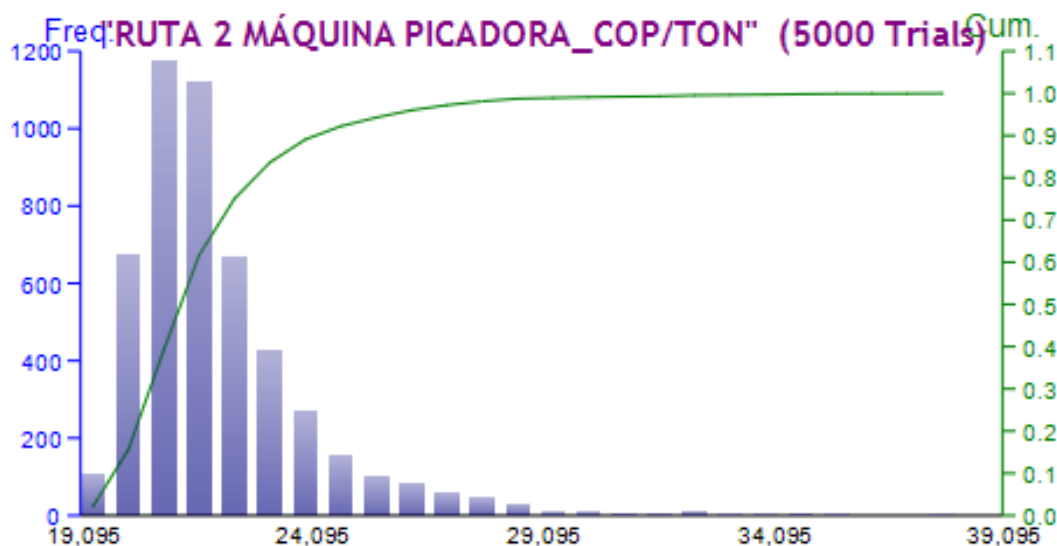
Histograma de frecuencias para la ruta 1 del costo por tonelada puesta en fábrica



Nota. Elaboración propia haciendo uso de @Risk

Figura 16

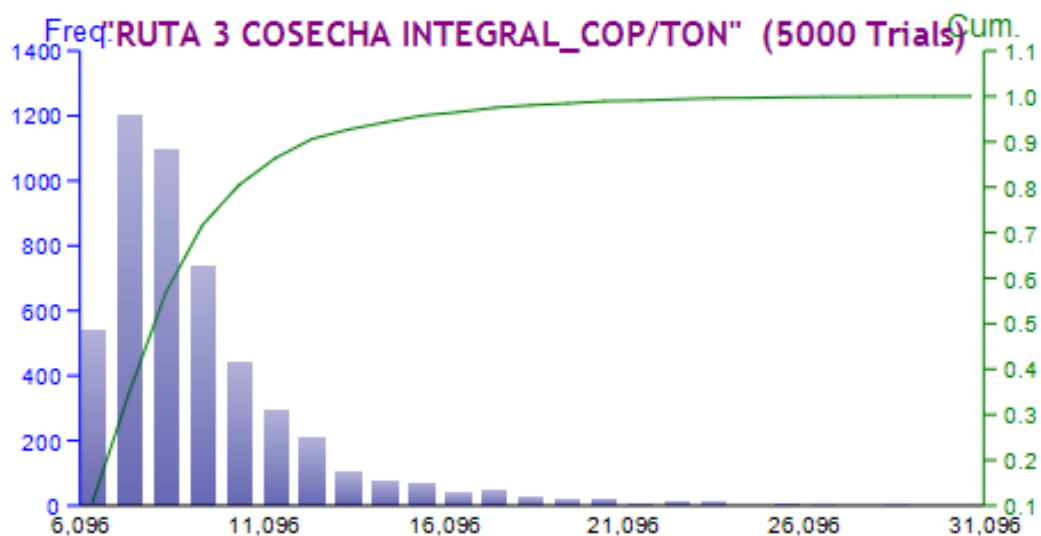
Histograma de frecuencias para la ruta 2 del costo por tonelada puesta en fábrica



Nota. Elaboración propia haciendo uso de @Risk

Figura 17

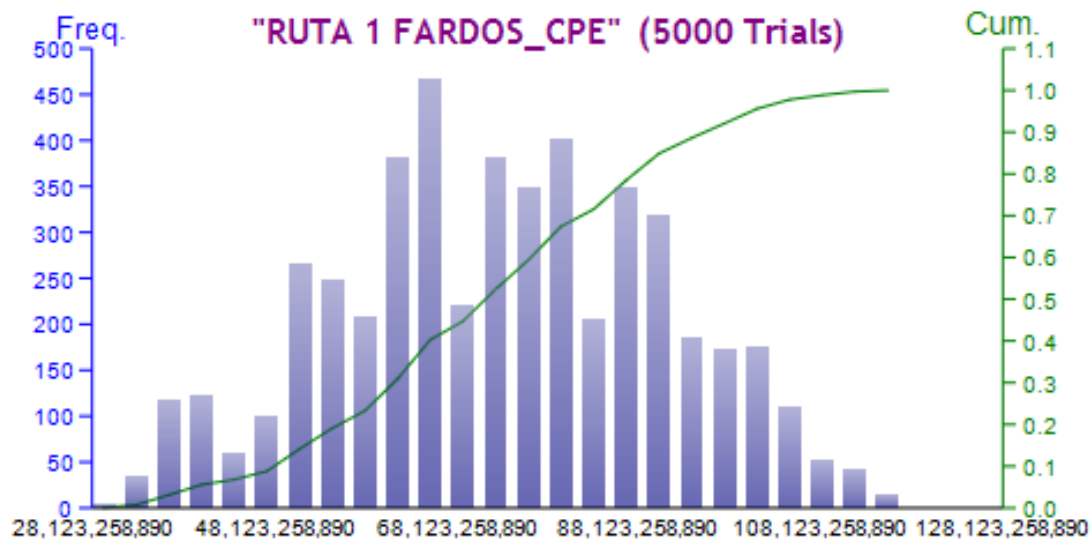
Histograma de frecuencias para la ruta 3 del costo por tonelada puesta en fábrica



Nota. Elaboración propia haciendo uso de @Risk

Figura 18

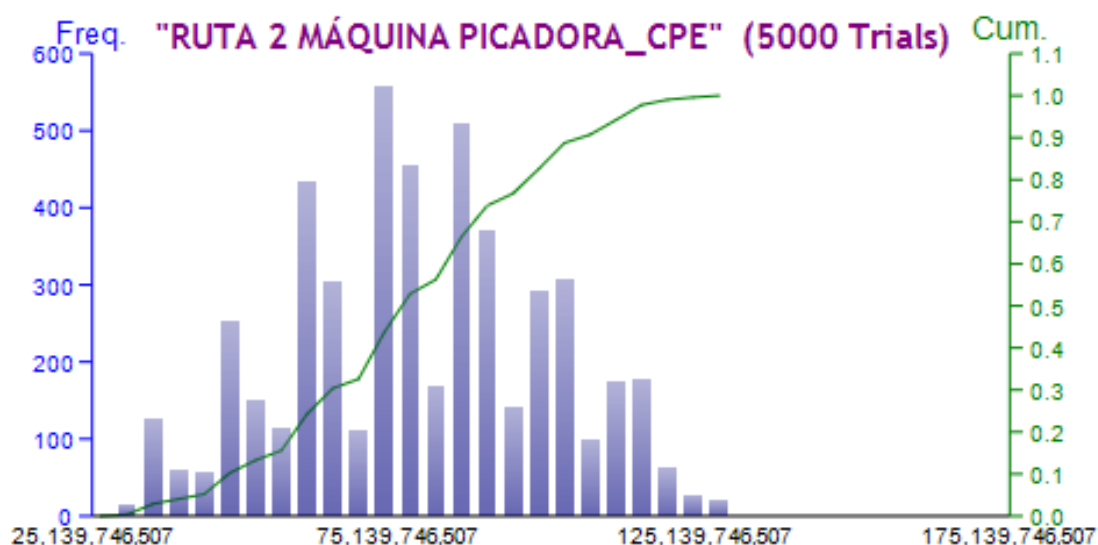
Histograma de frecuencias para la ruta 1 del costo presente equivalente



Nota. Elaboración propia haciendo uso de @Risk

Figura 19

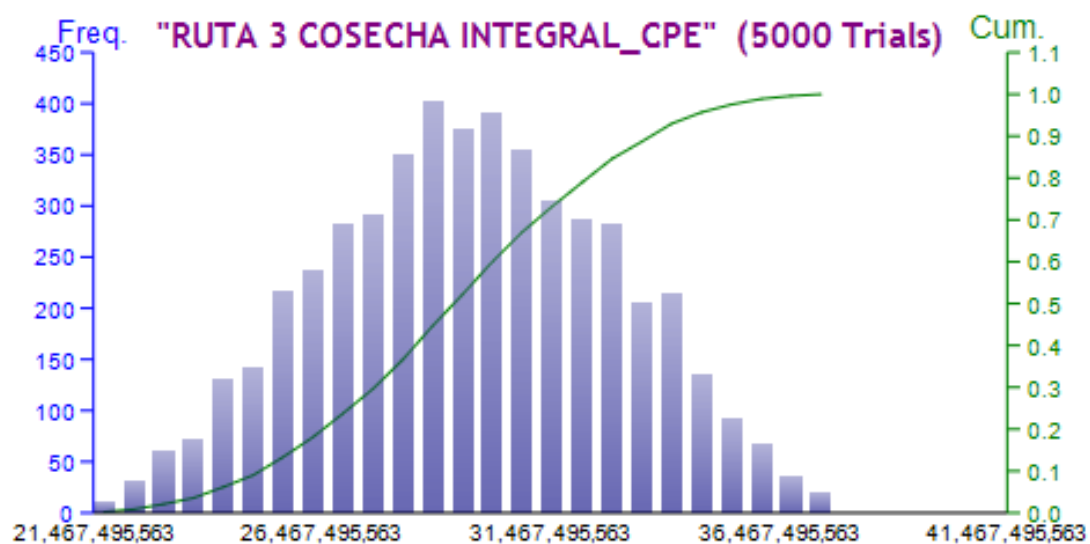
Histograma de frecuencias para la ruta 2 del costo presente equivalente



Nota. Elaboración propia haciendo uso de @Risk

Figura 20

Histograma de frecuencias para la ruta 3 del costo presente equivalente



Nota. Elaboración propia haciendo uso de @Risk

Tabla 12

Resultados obtenidos para el costo por tonelada puesta en fábrica

Ruta	COP/TON (Determinístico)	Media del COP/TON (Simulación)	Coefficiente de variación
1. FARDOS	\$19,125	\$20,416	0.1246
2. MÁQUINA PICADORA	\$20,078	\$21,762	0.0958
3. COSECHA INTEGRAL	\$7,867	\$8,977	0.3336

Nota. Elaboración propia haciendo uso de @Risk

Tabla 13

Resultados obtenidos para el costo presente equivalente

Ruta	CPE (Determinístico)	Media del CPE (Simulación)	Coefficiente de variación
1. FARDOS	\$70,849,535,311	\$71,214,376,701	0.2513
2. MÁQUINA PICADORA	\$74,378,902,752	\$76,629,153,403	0.2725
3. COSECHA INTEGRAL	\$29,142,599,206	\$29,373,949,407	0.1088

Nota. Elaboración propia haciendo uso de @Risk

Pruebas de hipótesis

Como la cosecha integral produce el menor CPE con el menor coeficiente de variación, no es necesario realizar pruebas de hipótesis sobre estos resultados para corroborar la significancia estadística de las simulaciones realizadas.

Debido a que para el costo en COP/ton tiene el mayor coeficiente de variación, se realizará la prueba de hipótesis para la diferencia de medias (muestras grandes) entre el costo en COP/ton de la cosecha integral y de la máquina de fardos. La información necesaria y el procedimiento, según Navidi (2006), son los siguientes:

Media máquina de fardos = $\mu_1 = 20416$ COP/ton

Desviación estándar máquina de fardos = $\sigma_1 = 0.1246 \times 20416 = 2543.83$ COP/ton

Media cosecha integral = $\mu_2 = 8977$ COP/ton

Desviación estándar cosecha integral = $\sigma_2 = 0.3336 \times 8977 = 2994.73$ COP/ton

Tamaño de muestra $n_1 = n_2 = 5000$ réplicas de la simulación

Como se desea saber si el costo por tonelada es estadísticamente mayor para la máquina de fardos, entonces la hipótesis nula y la hipótesis alternativa serían las siguientes:

$H_0: \mu_1 - \mu_2 \leq 0$ contra $H_1: \mu_1 - \mu_2 > 0$

$$\text{Así, se calcula } z = \frac{(\mu_1 - \mu_2) - 0}{\sqrt{\sigma_1^2/n_1 + \sigma_2^2/n_2}} = \frac{(20416 - 8977) - 0}{\sqrt{2543.83^2/5000 + 2994.73^2/5000}} = 205.85$$

Para estas hipótesis se debe determinar el P-valor como el área bajo la curva normal a la derecha de z o con la fórmula de Excel: $1 - \text{DISTR.NORM.ESTAND}(205.85) = 0.000000$

Por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula y así existe evidencia estadística que $\mu_1 - \mu_2 > 0$ o, equivalentemente, que $\mu_1 > \mu_2$, o sea que la media del costo por tonelada de la cosecha integral es menor que la de la máquina de fardos. Un análisis semejante se puede hacer entre la cosecha integral y la máquina picadora, obteniéndose una conclusión semejante.

10. Conclusiones y recomendaciones

- Los datos arrojados por el modelo determinístico fueron congruentes con el análisis de riesgo realizado.
- Con base en el modelo determinístico, en el análisis de riesgo y en las pruebas de hipótesis, se sugiere la cosecha integral como la alternativa más económica de densificación de residuo agrícola de cosecha de caña de azúcar debido a que cuenta con el menor costo presente equivalente y el menor costo por tonelada puesta en fábrica. Esta conclusión coincide con la información recolectada en Cenicaña.
- Debido a que el modelo contiene información que puede variar en el tiempo, se recomienda su aplicación como herramienta de soporte para la toma de decisiones respecto del mejor método de densificación de RAC, revisando detalladamente la nueva información que surja para alimentar el modelo.
- A medida que la tecnología de densificación de caña de azúcar avance y cuando resulte conveniente analizar nuevas rutas, es importante investigar el cambio en el modelo dadas las eficiencias de las nuevas tecnologías.
- Debido a que los parámetros utilizados en el modelo financiero fueron consultados con base en información secundaria, se plantea la posibilidad de su utilización en un caso de estudio que permita recolección de datos primarios.

11. Referencias

- Asocaña. (2020). *Somos azúcar y mucho más - Informe Anual 2019 - 2020*. 96.
- Assureira, E., & Assureira, M. (2017). Agricultural and forest residues in peru: Potential for the bioenergy use. *European Biomass Conference and Exhibition Proceedings, 2017(25thEUBCE)*, 185–190.
- Blank, L., & Tarquin, A. (2017). *Engineering Economy* (Eighth edi). McGraw-Hill Education.
- Cenicaña. (n.d.). Aprovechamiento Energético de RAC - Rutas. *Programa Procesos de Fábrica*.
- Cherubin, M. R., Carvalho, J. L. N., Cerri, C. E. P., Nogueira, L. A. H., Souza, G. M., & Cantarella, H. (2021). Land use and management effects on sustainable sugarcane-derived bioenergy. *Land*, 10(1), 1–24. <https://doi.org/10.3390/land10010072>
- Cobo-Barrera, D. F. (2012). *Pirólisis de residuos de cosecha de caña de azúcar (RAC) como alternativa de aprovechamiento en procesos de cogeneración* (Vol. 66). Universidad del Valle.
- Crop residue - Wizdom.ai*. (2021). https://www.wizdom.ai/topic/crop_residue/2032590
- Deere & Company. (2022). *CH570 Cosechadora de Caña*. <https://www.deere.com/latin-america/es/cosechadoras/cosechadora-de-caña-de-azúcar/ch570/>
- EMIS. (2022). *Estados de resultados y balance general de los ingenios (Mayagüez - Incauca - Manuelita - Providencia)*.
- Go, A. W., & Conag, A. T. (2019). Utilizing sugarcane leaves/straws as source of bioenergy in the Philippines: A case in the Visayas Region. *Renewable Energy*, 132, 1230–1237. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.09.029>
- Hamm, R. (2022). *Square Hay Bales in a Field*. <https://pixels.com/featured/square-hay-bales-in-a-field-robert-hamm.html>
- Hiloidhari, M., Das, D., & Baruah, D. C. (2014). Bioenergy potential from crop residue biomass in India. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 32, 504–512. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.025>
- IEA. (2019). Renewables 2019 – Analysis - IEA. *International Energy Agency*, 204. <https://www.iea.org/reports/renewables-2019>

- Interempresas Media. (2019). *Claas amplía y renueva la gama de picadoras de forraje Jaguar*.
<https://www.interempresas.net/Agricola/Articulos/257179-Agritecnica-2019-Claas-amplia-y-renueva-la-gama-de-picadoras-de-forraje-Jaguar.html>
- Investment Centre Division. (2007). *FORMULACIÓN Y EMPLEO DE PERFILES DE PROYECTO*. FAO.
- LEMKEN GmbH & Co. (2020). *Steel meets soil, once again, but different*.
<https://www.producer.com/crops/steel-meets-soil-once-again-but-different/>
- Linero, F. (2015). Aproveitamento da Palha de Cana de Açúcar. *Seminário Brasileiro Agroindustrial*.
- MachineryPete.com. (2022). *2022 Mil-Stak PT/2150 Hay Stacking Equipment*.
<https://www.machinerypete.com/details/hay-stacking-equipment/2022/mil-stak/pt-2150/19338807>
- Manotas-Duque, D. F. (2022). *Reunión de avances Profesor Diego Manotas*.
- Massey Ferguson. (2022). *Introducing the MF 2200*.
https://www.masseyferguson.com/en_sea/product/balers/mf-2200.html
- Morais, M. C., Siqueira-Neto, M., Guerra, H. P., Satiro, L. S., Soltangheisi, A., Cerri, C. E. P., Feigl, B. J., & Cherubin, M. R. (2020). Trade-offs between sugarcane straw removal and soil organic matter in Brazil. *Sustainability (Switzerland)*, 12(22), 1–13.
<https://doi.org/10.3390/su12229363>
- Neves, J. L. (2019). *SOFIEN*.
- Ojeda, W. (2021). *Reunión de avance 2021 Cenicaña*.
- Ojeda, W. (2022). *Reunión de avance 2022 Cenicaña*.
- Ojeda, W., Salterén, S., Lucuara, J., Gómez, A., & Gil, N. (2018). XI Congreso Atalac Tecnicaña. *Valorización de Residuos Agrícolas de Cosecha (RAC) de La Caña de Azúcar Mediante Densificación Mecánica*. <https://www.azc.com.co/xi-congreso-atalac-tecnicana-agroindustria-inteligente/>
- Perea-Moreno, A. J., García-Cruz, A., Novas, N., & Manzano-Agugliaro, F. (2017). Rooftop analysis for solar flat plate collector assessment to achieving sustainability energy. *Journal of Cleaner Production*, 148, 545–554. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.019>

Projeto SUCRE. (2017). *Recolhimento e qualidade da palha*.

Rivera-Cadavid, L., Manyoma-Velásquez, P. C., & Manotas-Duque, D. F. (2019). Supply chain optimization for energy cogeneration using sugarcane crop residues (SCR). *Sustainability (Switzerland)*, 11(23). <https://doi.org/10.3390/su11236565>

Sundry Photography. (2019). *Camión que transporta fardos de heno en una autopista en el condado de Ventura, al sur de California*. [https://www.istockphoto.com/es/foto/camión-que-transporta-fardos-de-heno-en-una-autopista-en-el-condado-de-ventura-al-sur-gm1194770173-340333152?phrase=lorry with hay bales](https://www.istockphoto.com/es/foto/camión-que-transporta-fardos-de-heno-en-una-autopista-en-el-condado-de-ventura-al-sur-gm1194770173-340333152?phrase=lorry+with+hay+bales)

Transporte Carretero. (2014). *Cosecha de la caña de azúcar: Transportistas de corta y larga distancia con menos rentabilidad*. <https://www.transportecarretero.com.uy/noticias/nacionales/transportistas-de-corta-y-larga-distancia-con-menos-rentabilidad.html>

United Nations Framework Convention on Climate Change. (2021). *UNFCCC*. <https://unfccc.int/>