



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Estudios Postgrado
Maestría en Energía y Ambiente

**RECOLECCIÓN DE RESIDUOS AGRÍCOLAS DE CAÑA DE AZÚCAR Y SU USO COMO
COMBUSTIBLE PARA GENERAR ENERGÍA ELÉCTRICA**

Ing. Agr. Luis Gabriel Méndez

Asesorado por el M.Sc. Ing. Víctor Hugo Motta Ponciano

Guatemala, julio de 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**RECOLECCIÓN DE RESIDUOS AGRÍCOLAS DE CAÑA DE AZÚCAR Y SU USO COMO
COMBUSTIBLE PARA GENERAR ENERGÍA ELÉCTRICA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

ING. AGR. LUIS GABRIEL MÉNDEZ

ASESORADO POR EL M.SC. ING. VÍCTOR HUGO MOTTA PONCIANO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

MAESTRO EN ENERGÍA Y AMBIENTE

GUATEMALA, JULIO DE 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Christian Moisés de la Cruz Leal
VOCAL V	Br. Kevin Armando Cruz Lorente
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADOR	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
EXAMINADOR	Ing. Juan Carlos Fuentes Montepeque
EXAMINADOR	Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

RECOLECCIÓN DE RESIDUOS AGRÍCOLAS DE CAÑA DE AZÚCAR Y SU USO COMO COMBUSTIBLE PARA GENERAR ENERGÍA ELÉCTRICA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado, con fecha 18 de abril de 2020.

Ing. Agr. Luis Gabriel Méndez

DTG. 309.2021

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Estudios de Postgrado, al Trabajo de Graduación titulado: **RECOLECCIÓN DE RESIDUOS AGRÍCOLAS DE CAÑA DE AZÚCAR Y SU USO COMO COMBUSTIBLE PARA GENERAR ENERGÍA ELÉCTRICA**, presentado por el Ingeniero Agrónomo **Luis Gabriel Méndez**, estudiante del programa de **Maestría en Energía y Ambiente**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Inga. Anabela Cordova Estrada
Decana



Guatemala, julio de 2021.

AACE/cc



Guatemala, Julio 2021

EEPI-0861-2021

En mi calidad de Director de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen y verificar la aprobación del Revisor y la aprobación del Área de Lingüística al Trabajo de Graduación titulado: **"RECOLECCIÓN DE RESIDUOS AGRÍCOLAS DE CAÑA DE AZÚCAR Y SU USO COMO COMBUSTIBLE PARA GENERAR ENERGÍA ELÉCTRICA"** presentado por el Ingeniero **Luis Gabriel Méndez** identifica con carné **200310723** correspondiente al programa de **Maestría en Energía y Ambiente** apruebo y autorizo el mismo.

Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"

Mtro. Ing. Edgar Darío Álvarez Cofi
Director






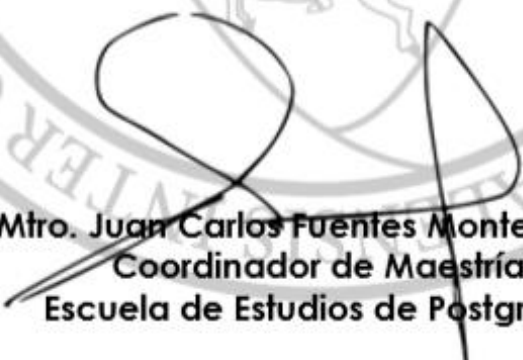
Guatemala, Julio 2021

EEPFI-0862-2021

Como Coordinador del programa de Maestría en Energía y Ambiente doy el aval correspondiente para la aprobación del Trabajo de Graduación titulado: **"RECOLECCIÓN DE RESIDUOS AGRICOLAS DE CAÑA DE AZÚCAR Y SU USO COMO COMBUSTIBLE PARA GENERAR ENERGÍA ELÉCTRICA"** presentado por el Ingeniero **Luis Gabriel Méndez** quien se identifica con el número de carné **200310723**.

Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"



Mtro. Juan Carlos Fuentes Montepeque
Coordinador de Maestría
Escuela de Estudios de Postgrado



Guatemala, Julio 2021

EEPFI-0863-2021

En mi calidad como Asesor del Ingeniero **Luis Gabriel Méndez** quien se identifica con número de carné **200310723** procedo a dar el aval correspondiente para la aprobación del Trabajo de Graduación titulado: **"RECOLECCIÓN DE RESIDUOS AGRÍCOLAS DE CAÑA DE AZÚCAR Y USO COMO COMBUSTIBLE PARA GENERAR ENERGÍA ELÉCTRICA"** quien se encuentra en el programa de **Maestría en Energía y Ambiente** en la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"

MSc & MBA **Víctor Hugo Motta Ponciano**
Asesor

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por estar presente en mi vida y por permitirme llegar a este momento de mi carrera.
Mis padres	Alfredo Colop y Blanca Lidia Méndez, por su apoyo y su amor.
Mi esposa	Yesica Paola Ruano, por su amor, su paciencia y su apoyo.
Mis hijas	Andrea y Angie Méndez, por ser el impulso de mi vida.
Mis hermanos	Esmeralda, Leonel, María Luisa Colop Méndez, por ser mis compañeros en las etapas de mi vida.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser la casa de estudios que inculcó los valores que han definido mi desempeño profesional.
Facultad de Ingeniería	Por brindarme el conocimiento que permite mi ejercicio profesional.
Escuela de Estudios de Postgrado	Por brindarme herramientas para continuar mi desarrollo profesional.
Mi asesor	MSc. Ing. Víctor Hugo Motta Ponciano, por el apoyo brindado en el desarrollo de la presente investigación.
Mis amigos	Laura Ruiz y Luis Monzón, por el apoyo en este ciclo de mi carrera.
Todos los que colaboraron con mi formación	Por su apoyo. Muchas gracias.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN.....	XI
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	XIII
OBJETIVOS.....	XV
RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO	XVII
INTRODUCCIÓN	XIX
1. MARCO TEÓRICO.....	1
1.1. El cultivo de caña de azúcar en Guatemala	1
1.2. Generación de residuos de cosecha	2
1.2.1. Cosecha mecanizada	2
1.2.2. Cosecha manual.....	3
1.3. Ventajas y desventajas del RAC en campo.....	3
1.4. Métodos de recolección de residuos de cosecha	4
1.4.1. Maquinaria de recolección.....	5
1.4.1.1. Enfardadoras cilíndricas	5
1.4.1.2. Empacadoras.....	6
1.4.1.3. Alce y transporte de residuos de cosecha	6
1.5. Características de los residuos de cosecha	8
1.5.1. Poder calorífico.....	8
1.5.2. Humedad	8

1.5.3.	Cenizas	9
1.6.	Producción energética.....	10
1.6.1.	Emisiones de CO ₂ de biomasa de caña	10
1.6.2.	Potencial energético de los RAC.....	11
1.6.3.	Comparación con otras fuentes energéticas	12
1.6.3.1.	Comparación con bagazo de caña	12
1.6.3.2.	Comparación con <i>chip</i> de madera.....	13
1.6.3.3.	Comparación con carbón mineral.....	14
2.	DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN	17
2.1.	Descripción de los residuos de cosecha de caña de azúcar	17
2.1.1.	Cosecha caña manual.....	17
2.1.2.	Cosecha caña mecanizada	17
2.2.	Descripción de equipos de recolección utilizados	18
2.2.1.	Tractores agrícolas.....	18
2.2.2.	Empacadoras de forraje	18
2.2.3.	Empacadora modificada.....	19
2.2.4.	Alzadora de caña	20
2.2.5.	Transporte	20
2.3.	Procesamiento del material para uso en calderas	20
2.3.1.	Recepción de equipos.....	20
2.3.2.	Procesamiento	21
2.3.3.	Determinación de parámetros de calidad del material.....	21
2.3.4.	Determinación de humedad y ceniza	22
2.3.5.	Determinación del poder calorífico	22
2.4.	Determinación del rendimiento y costo de recolección	23
2.4.1.	Rendimiento residuos por hectárea.....	24
2.4.2.	Determinación de costos	25

2.4.2.1.	Costo de recolección	26
2.4.2.2.	Costo de transporte	26
2.4.2.3.	Costo de picado del residuo	26
2.4.3.	Determinación de la relación beneficio-costo	27
3.	PRESENTACIÓN DE RESULTADOS	29
3.1.	Comparación de eficiencias de metodologías recolección	29
3.2.	Determinación de costo y rendimiento por hectárea	31
3.3.	Determinación del poder calorífico de los residuos de cosecha	32
3.4.	Beneficio económico por uso de residuos de cosecha	32
4.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	35
	CONCLUSIONES	37
	RECOMENDACIONES	39
	REFERENCIAS	41
	APÉNDICE	45

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Rendimiento de residuos de cosecha por metodología	25
2.	Rendimiento de maquinaria	30
3.	Comparación de precios de residuos/carbón	34

TABLAS

I.	Poder calorífico RAC verde y quemado	8
II.	Contenido de humedad RAC	9
III.	Contenido de ceniza en los residuos.....	9
IV.	Equivalente energético de combustibles	12
V.	Composición de los combustibles sólidos	14
VI.	Comparación de RAC con carbón y bagazo	15
VII.	Características de empacadora	19
VIII.	Análisis de laboratorio	23
IX.	Rendimiento de residuos de cosecha	24
X.	Tarifario para el periodo de zafra 2019-2020	26
XI.	Determinación de costo.....	27
XII.	Relación beneficio-costo	27
XIII.	Comparación de generación de energía	28
XIV.	Determinación de costo.....	31
XV.	Rendimiento de residuos de cosecha	31
XVI.	Poder calorífico (BTU/lb) promedio	32
XVII.	Relación de carbón/residuos de cosecha.....	33

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
C	Carbono
CO₂	Dióxido de carbono
ha	Hectárea
H	Hidrógeno
h	Hora
lb	Libra
N	Nitrógeno
O	Oxígeno
Q	Quetzal
T	Tonelada
tCO₂eq	Tonelada de dióxido de carbono equivalente

GLOSARIO

Alzadora	Máquina diseñada para la carga de caña de azúcar.
Autovolteo	Implemento agrícola con sistema hidráulico de volteo utilizado en cosecha mecánica para transportar caña y depositarla en jaulas.
Báscula	Instrumento para medir pesos, generalmente grandes, que consiste en una plataforma donde se coloca lo que se quiere pesar.
BTU	British Thermal Unit (unidad térmica británica).
Char	Residuo carbonoso que queda tras la pirolisis de la biomasa, que está formado principalmente por carbono y cenizas, pero que también contiene hidrógeno, oxígeno y una pequeña cantidad de nitrógeno y azufre.
Empacadora de forraje	Implemento agrícola que tiene como único uso recoger el heno, avena, paja, entre otros, y comprimirlo en pacas que finalmente se atan con un hilo especial.

Enfardadora de forraje	Implemento agrícola utilizado para recoger restos de cosecha para configurarlos en fardos, estos pueden ser cilíndricos o prismáticos.
Paca	Fardo o lío prensado, especialmente de paja, forraje o residuos de caña.
Poder calorífico	Es la cantidad de energía por unidad de masa o unidad de volumen de materia que se puede desprender al producirse una reacción química.
Recolección	Actividad que consiste en levantar los residuos que quedan después de la cosecha.
Residuos de cosecha de caña	Es el residuo que queda luego de las labores de cosecha de caña, los constituyen, hojas secas, tallos y puntas de caña.
RAC	Residuos Agrícolas de Caña.
Syngas	Es un combustible gaseoso obtenido a partir de sustancias ricas en carbono.
TM	Tonelada Métrica.
Virador hidráulico	Equipo hidráulico utilizado para el volteo de jaulas para su descarga.

RESUMEN

Con el objetivo de aprovechar el residuo de cosecha de caña de azúcar para la producción de energía eléctrica, se describe la presente metodología donde se realiza el proceso utilizando empacadoras de forraje y maquinaria agrícola.

El costo de recolección está determinado por la maquinaria, mano de obra, materiales y transporte. La maquinaria y transporte se calcularon utilizando el tarifario de la empresa, el costo de procesamiento se calculó con la tarifa comercial de un cargador frontal, una picadora eléctrica y la mano de obra utilizada, el costo de recolección oscila entre Q211.00 y Q.236.00 con rendimientos por hectárea de entre 4 y 5 toneladas por hectárea.

De los residuos recolectados y procesados se enviaron muestras al laboratorio de fábrica, donde se determinó el contenido de humedad, ceniza y poder calorífico en BTU/lb. Estos datos se compararon con los resultados del análisis de carbón mineral, la capacidad de generación de calor de los residuos de caña de azúcar va a depender de la cantidad de humedad y el contenido de impurezas con la que se recolecte, los valores oscilan entre los 4,500 y 5,500 BTU/lb, a valores de humedad entre 11 y 37 % de humedad y entre 9 y 11 % de impurezas.

El beneficio económico que genera la recolección de residuos se determinó a través de la comparación con el precio del carbón, haciendo una equivalencia entre los poderes caloríficos de cada material y el costo equivalente para la producción de energía, donde la relación aproximada es de 2.6 toneladas de

residuos por 1 tonelada de carbón, esto genera un ahorro de entre el 17 y 25 % por tonelada de carbón.

Finalmente se concluye que las metodologías utilizadas son una opción viable para el manejo de residuos de cosecha de caña de azúcar y con esto obtener un beneficio económico con la sustitución del carbón utilizado en la producción de energía.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El residuo agrícola de caña es lo que queda en el campo después de la cosecha, está formado por hojas y despunte, en general se quema a cielo abierto, esta labor llamada requema se realiza para evitar problemas en las labores agrícolas post-cosecha, contribuye al control de plagas y enfermedades ya que estos residuos constituyen hospederos de las mismas y también provocan interferencia con el rebrote de la caña.

Con la requema de los residuos de cosecha al aire libre se generan gases contaminantes al ambiente, lo cual conlleva al aumento de la temperatura ambiente y la emisión de desechos particulados. Al generar calor provoca daño al cultivo donde ya está brotando la caña y también provoca un ambiente de trabajo inapropiado por las temperaturas que se generan en la requema.

La recolección del residuo de caña es una actividad que permite obtener la biomasa dejada en campo para luego utilizarla como combustible en la producción de energía eléctrica, para esto es necesario tener los datos de eficiencia de maquinaria y la metodología que se debe utilizar.

Esto llevó a plantear la pregunta principal de este estudio: ¿cuál es la metodología para recolectar los residuos agrícolas de caña de azúcar y utilizarlos como combustible para generar energía eléctrica?

Esta pregunta se complementa con las respuestas a varias preguntas auxiliares:

- ¿Qué tecnología se puede implementar para recolectar el residuo de caña?

- ¿Cuál es el costo de recolección del residuo de cosecha de caña y qué cantidad se puede obtener?
- ¿Cuál es la capacidad de generación de calor del residuo de cosecha de caña de azúcar?
- ¿Cuál es la relación beneficio-costos de la producción de energía a través de residuos de cosecha de caña?

OBJETIVOS

General

Desarrollar una metodología de recolección de residuos agrícolas de caña de azúcar para su uso como combustible para la generación de energía eléctrica.

Específicos

- Detallar la tecnología para la recolección de residuos de caña de azúcar.
- Determinar el costo de la tonelada métrica de residuos y la cantidad en tonelada métrica que se puede obtener por hectárea.
- Determinar la capacidad de generación de calor del residuo de caña de azúcar.
- Calcular el beneficio económico que se obtiene en la generación de energía con el uso de residuos de cosecha de caña de azúcar.

RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO

La investigación realizada es de tipo cuantitativo-descriptivo, en donde se describe la metodología para la recolección de residuos de caña y el uso como combustible para la generación de energía eléctrica.

Actualmente, en los ingenios de Guatemala los residuos de cosecha del cultivo de caña son poco utilizados para la producción de energía, en algunos casos se utilizan como cobertura de suelo, en otros se queman en campo, algunos pocos utilizan este material en calderas para producción de energía.

La recolección de residuos de cosecha de caña de azúcar puede ser realizada por enfardadoras, ya sea cilíndricas o prismáticas, obteniendo fardos grandes y pesados de entre 770 y 990 lb, estos se utilizan básicamente en cortes mecanizados en verde, ya que el material es abundante, también existen empacadoras de forraje que generan pacas de aproximadamente 44 a 66 lb, estas han dado mejores resultados en residuos de cosecha de corte manual, en el desarrollo de la metodología se utilizaron estas últimas.

La primera metodología, haciendo uso de la empacadora BC5070, permitió empacar los residuos en cañales de corte manual, con los residuos empacados distribuidos sobre el suelo se procedió al alce y transporte, por otra parte también se utilizó la modificación de la empacadora tradicional haciendo uso de un conductor hidráulico, el cual fue adaptado a la empacadora y permitió trasladar el producto a granel a un carretón con autovolteo, con este método se dejó de utilizar pita de amarre de las pacas.

En la labor de alce de pacas de la metodología tradicional se utilizó alzadoras de caña del modelo Cameco Sp 3000, esta maquinaria permitió levantar las pacas para luego depositarlas en jaulas cañeras de 30 a 40 pies, dichas jaulas son remolcadas por tractores agrícolas y se desplazan a lo largo del lote donde queda empacado el residuo.

En la segunda metodología el alce del residuo se realizó directamente hacia carretones con autovolteo auxiliándose del conductor hidráulico, para luego ser depositados en las jaulas. Para la compactación del material en las jaulas se utilizó la alzadora de caña. Luego del llenado de jaulas se procedió a trasladar el material utilizando un cabezal en equipos de 2, 3 y 4 jaulas cañeras hacia el patio de procesamiento en fábrica.

El costo de recolección está determinado por la maquinaria, mano de obra, materiales y transporte, la maquinaria y transporte se calcularon utilizando el tarifario de la empresa, el costo del procesamiento del material se calculó con la tarifa comercial de un cargador frontal, una picadora eléctrica y la mano de obra utilizada.

De los residuos recolectados y procesados se enviaron muestras al laboratorio de fábrica, donde se determinó el contenido de humedad, ceniza y poder calorífico en BTU/lb, estos datos se compararon con los resultados del análisis del carbón mineral.

El beneficio económico que genera la recolección de residuos se determinó a través de la comparación con el precio del carbón y los residuos de caña, haciendo una equivalencia entre los poderes caloríficos de cada material y el costo equivalente para la producción de energía.

INTRODUCCIÓN

En el cultivo de caña de azúcar se realizan diversas labores agrícolas, una de ellas es la cosecha, la cosecha manual consiste en cortar los tallos y acomodarlos en surcos para su posterior alce, en el corte mecanizado se cortan los tallos en secciones más pequeñas para luego ser depositados en carretones para su posterior carga en jaulas, en cualquiera de las dos metodologías se generan residuos agrícolas, constituidos básicamente por hojas secas y puntas de caña, el manejo de estos residuos es importante ya que de no hacerlo correctamente pueden acarrear problemas de plagas, enfermedades y también la interferencia con otras labores. Por lo general el manejo que se le da a los residuos de cosecha es la requema, que no es más que la incineración del residuo en campo, con ésta práctica existe la generación de gases contaminantes y desechos particulados, si esta labor no se realiza a tiempo, puede provocar daños al rebrote, afectando así la producción del siguiente año.

El estudio aporta una metodología de recolección del residuo de caña que se puede implementar en cualquier ingenio azucarero en el cual haya disponibilidad de residuo, para con esto poder contribuir con la diversificación de las fuentes de producción de biomasa y energía y con ofrecer alternativas para la explotación de la energía renovable en la industria azucarera y, por el contrario, contrarrestar el aumento en el consumo de carbón mineral y *bunker*, con lo cual se hace evidente la búsqueda de alternativas más económicas y más amigables con el ambiente.

El estudio define dos metodologías de recolección para el aprovechamiento del residuo de caña para su uso como combustible, desde su procesamiento en

campo con el uso de implementos y maquinaria agrícola, hasta la entrega en fábrica para su procesamiento, análisis de calidad y producción energética.

La metodología se implementó en residuos de caña después de la cosecha, en donde a través del uso de maquinaria e implementos agrícolas se realizó la labor de empacado del residuo para su alce y transporte para ser trasladado hacia el patio de cogeneración. Al material procesado se le realizó el análisis de laboratorio para determinar su contenido de humedad, cenizas y poder calorífico, para luego realizar la comparación con la generación de energía con carbón.

En el capítulo 1 se muestra el marco teórico que se utilizó como referencia para el desarrollo de la investigación, con esta información se definirán los métodos de recolección de los residuos agrícolas de caña de azúcar y su procesamiento para la utilización de los mismos en la generación de energía eléctrica. En el capítulo 2 se describe el desarrollo de la investigación, donde se incluye la descripción del residuo de cosecha de caña de azúcar, lo cual permitió enfocar la metodología al corte manual.

También se describen los equipos de recolección utilizados, incluyendo la recolección, alce y transporte, así como la descripción del procesamiento previo a su uso en calderas para la producción de energía eléctrica, luego se realiza la determinación del rendimiento por hectárea y el costo de recolección del residuo de caña.

En los capítulos 3 y 4 se describen y discuten los resultados donde se incluyen las comparaciones de las eficiencias de las metodologías de recolección, la determinación del costo por hectárea y la comparación del poder calorífico de los residuos de cosecha y el carbón.

Finalmente se concluye respecto a la metodología que se utiliza para el aprovechamiento de los residuos de cosecha de caña de azúcar, desde su recolección hasta su procesamiento para la producción de energía eléctrica, y se proporcionan recomendaciones consideradas.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. El cultivo de caña de azúcar en Guatemala

En Guatemala el cultivo de caña de azúcar ha venido creciendo desde 1960, lo que ubica al país entre los primeros cinco países exportadores de azúcar a nivel mundial, el segundo lugar en Latinoamérica y el tercero en productividad (toneladas métricas de azúcar/ha) (Melgar, 2012).

El azúcar constituye el segundo producto agrícola en Guatemala en generación de divisas, lo que es una importante contribución a la economía nacional (Melgar, 2012).

El aumento en la productividad ha sido más notable en los últimos 20 años. En la década 1980-1990 se produjeron en promedio 6.77 toneladas de azúcar por hectárea (TAH), mientras que en la década 2000-2010 el promedio fue 10.11TAH.

Los principales factores que han incidido en el desarrollo de la Agroindustria Azucarera Guatemalteca son: ecológico: las condiciones agroecológicas han sido favorables. Organizacional gerencial: industria privada, organización gremial, terminal de exportación, diversificación (cogeneración y etanol). Tecnológico: operaciones en el campo, operaciones en fábrica, investigación, capacitación, transferencia de tecnología, *benchmarking*. Social: responsabilidad social empresarial. (Melgar, 2012, p. 11)

1.2. Generación de residuos de cosecha

En caña de azúcar existen dos métodos de cosecha. Puede ser de forma manual y mecanizada, en ambos métodos la caña puede estar previamente quemada o ser cortada en verde. En el manejo de los residuos de cosecha desde la recolección hasta el transporte, es necesario generar metodologías apropiadas auxiliándonos de diferentes tecnologías tomando en cuenta la cantidad de material y la calidad del residuo disponible en el campo (Ortíz, 2011).

1.2.1. Cosecha mecanizada

La cosecha en verde, que preferentemente se corta de manera mecanizada, produce tres tipos de material: el tallo, el cual va a la fábrica de azúcar y del cual se saca el bagazo; las puntas, que son pequeños tallos delgados con menor cantidad de sacarosa, los cuales para fines de esta tesis no son importantes ya que tienen alta humedad y solo podrían aprovecharse si se llevaran a la fábrica junto al resto de los tallos, de esta manera se podría aprovechar el bagazo de los mismos, sin embargo, su alto contenido de azúcares reductores no los hace técnicamente atractivos. Por otro lado, está el residuo foliar que son las hojas (Muñoz, 2017).

En este tipo de corte, el cañal ha sido quemado previamente, cuando la topografía del suelo lo permite (plana), la cosechadora mecánica corta los tallos y los despunta. Dentro de las cosechadoras existen equipos troceadores, los cuales cortan en trozos más cortos los tallos y luego los impulsan dentro de los camiones recolectores. En otra sección de la cosechadora (parte trasera), se separan y expulsan hacia el suelo los residuos, en su mayoría hojas picadas y tierra (Muñoz, 2017).

1.2.2. Cosecha manual

Como anteriormente se indicaba la cosecha manual se puede realizar con el cultivo previamente quemado o el corte en verde, comúnmente se realiza con el cañal quemado, con esto se facilita el corte al eliminar el exceso de follaje seco.

La cosecha manual inicia con el corte de tallos desde la base, luego se limpia eliminando puntas y follaje, para luego apilar los tallos orientándolos perpendicularmente a los surcos, para luego ser alzados y depositados en vehículos o jaulas para su transporte hacia el ingenio (Ortíz, 2011).

El follaje que fue limpiado en el corte es acomodado de forma similar a la caña y se deja por aproximadamente 2 a 6 días para que se sequen y finalmente eliminarlos en una segunda quema. En algunos casos estos residuos son acomodados sobre el terreno para su descomposición e incorporación del suelo.

Cuando el corte se ha realizado de forma manual, los tallos y los residuos de cosecha pueden ser apilados paralelamente por los cortadores, para recoger los tallos deberán usarse alzadoras. Estas alzadoras alzarán los RAC siguiendo el mismo procedimiento para alzar tallos (Muñoz, 2017).

1.3. Ventajas y desventajas del RAC en campo

Regularmente luego de que se realiza la cosecha el residuo de caña se queda en campo esperando a secarse, para luego ser quemado, esto puede provocar los siguientes efectos negativos:

- Dificultad en las labores de cultivo como la fertilización y control de malezas por la capa de residuos generada.

- Provoca retrasos en el rebrote de la caña.
- Aumento en la incidencia de plagas por ser hospedero de los mismos.

Cuando se realiza la labor de quema previa a la cosecha se reduce en un 48 % la producción de residuos, esto conlleva ciertos inconvenientes como por ejemplo:

- Aumento del uso de herbicidas.
- Disminución de los nutrientes y microorganismos del suelo.
- Disminución de insectos benéficos enemigos naturales de las plagas.
- Producción de gases nocivos como CO, NOx, N2O y CH4, lo que aumenta el riesgo de afecciones respiratorias para las personas cercanas al cultivo (Inta, 2013).

1.4. Métodos de recolección de residuos de cosecha

Existen varios métodos de recolección principalmente en la producción de cereales. En estos cultivos constituye una solución mecánica sencilla ya que los residuos quedan alineados durante la cosecha (León, 2013).

La ventaja de estos materiales es que son homogéneos en su composición y tamaño, no así los residuos de caña, por tal razón no es tan sencillo recolectarlos ya que su constitución no es homogénea y tienen baja densidad. Otra desventaja es que el cultivo de caña de azúcar no se realiza enfocado en el manejo de los residuos, por lo tanto no existe inversión en infraestructura y tecnología para el manejo de los mismos (León, 2013).

1.4.1. Maquinaria de recolección

La enfardadora es un equipo que puede implementarse en campo, con el enfardado se ahorra aún más en transporte. Son las enfardadoras las que recolectan los RAC, estas enfardadoras, al comprimir los residuos, aumentan grandemente la densidad de los mismos, lo que permite lograr los menores costos de transporte. Sin embargo, en fábrica los residuos aún deben desenfundarse y luego picarse, por lo que el ahorro en transporte se compromete con dos operaciones más en el pre-procesamiento. Además, los fardos necesitan también ser alzados al camión, esto implica el uso de alzada o montacargas. Esto representa las desventajas de este tipo de alce (Muñoz, 2017).

Una ventaja adicional del uso de las enfardadoras es que los RAC al comprimirse pierden humedad y aire, por lo tanto, reducen el costo del secado posterior y aumentan la vida útil de los fardos durante almacenajes de largo plazo, a menor contenido de humedad y aire, más lenta será la descomposición de las fibras (Muñoz, 2017).

1.4.1.1. Enfardadoras cilíndricas

La característica principal de esta enfardadora es el embalaje del material en rollos cilíndricos, dependiendo del modelo pueden llegar a pesar hasta 770 lb (Casen, 2012).

1.4.1.2. Empacadoras

La empacadora prismática tiene como característica que elabora fardos rectangulares, pueden llegar a un peso de 990 lb (Casen, 2012).

1.4.1.3. Alce y transporte de residuos de cosecha

Entre los aspectos relacionados con la recolección de los residuos, uno de los más importantes por su incidencia técnico económica es el transporte.

El residuo de caña es un material de baja densidad y su alce está limitado por el volumen más que por el peso; por tanto, es imprescindible para la economía del transporte la utilización de todo el espacio disponible y la obtención de una buena compactación.

El aumento de los costos por transporte se debe al poco peso por viaje que genera la recolección de residuos de caña, ya que se tiene un mayor gasto en comparación con un mismo suministro energético que con otros tipos de combustibles, para esto se debe aumentar la densidad de la biomasa (León, 2013).

El preprocesamiento de los RAC es la primera etapa que debe implementarse para recolectar los RAC en el campo. Se inicia al alzar (recoger) los RAC desde el suelo hasta las jaulas (furgones) de los camiones y luego transportarlo hasta las plantas de energía de los ingenios, donde ya se utiliza el bagazo de los tallos de caña para generar vapor y electricidad. Se entiende entonces que el alce y transporte son actividades que deben realizarse posteriormente al corte de caña (Muñoz, 2017).

El alce es una operación que contempla recoger los RAC que quedaron después de la cosecha (corte) y colocarlo en camiones. Para que esto pueda ser posible, primero tienen que cortarse los tallos de caña y los cortadores o cosechadoras mecánicas deberán apilar aparte y visiblemente a los RAC, esto implica un proceso de capacitación al personal y una nueva gestión en el área de CAT de los ingenios para separar perfectamente los tallos de los RAC (Muñoz, 2017).

Después del corte manual (personal cortador) tanto los tallos como los RAC deben quedar apilados paralelamente. Ver el apéndice 1. En el corte mecanizado los RAC quedan sobre el suelo en franjas paralelas sobre surcos y entresurcos, dependiendo del tipo de descarga de las cosechadoras mecánicas (Muñoz, 2017).

Actualmente los tallos son llevados a las fábricas de azúcar para recuperar la sacarosa y las pilas (colchones o camas) de RAC son quemados (corte con quema) o requemados (corte en verde), integrándose las cenizas al suelo como un abono orgánico (aporte de nutrientes). Recientemente se realizan pruebas en algunos campos y los RAC se dejan en el campo para su gradual descomposición (Muñoz, 2017).

Luego de enfardar el residuo de caña se procede a levantarlos, dependiendo la disponibilidad de maquinaria se utilizan montacargas, métodos manuales, pero es más comúnmente utilizar alzadoras que han sido diseñadas para el alce de caña, pero se adaptan a este material (Muñoz, 2017).

Los fardos son depositados en camiones o en jaulas cañeras para ser trasladados hacia el patio de procesamiento del material.

1.5. Características de los residuos de cosecha

Las características de los residuos de cosecha son las siguientes:

1.5.1. Poder calorífico

Debe observarse la siguiente tabla:

Tabla I. **Poder calorífico RAC verde y quemado**

Combustible	Poder calorífico (BTU/lb)
RAC verde	7353
RAC quemado	7531
Promedio	7442
Diferencia	178

Fuente: Muñoz, M. (2017). *Guía para el aprovechamiento del RAC como un biocombustible*.

Como puede verse en la tabla anterior, el poder calorífico promedio en base seca de los residuos verdes es un 2,36 % menor que los residuos quemados, diferencia que no es significativa, por lo que puede afirmarse para fines prácticos que el poder calorífico promedio de los residuos es el mismo, ya sea verdes o después de la quema (Muñoz, 2017).

1.5.2. Humedad

Debe observarse la siguiente tabla:

Tabla II. **Contenido de humedad RAC**

Combustible	% humedad base húmeda
RAC verde	57.87
RAC quemado	29.9
Promedio	43.89
Diferencia	27.97

Fuente: Muñoz, M. (2017). *Guía para el aprovechamiento del RAC como un biocombustible*.

En la tabla anterior se observa la diferencia de los residuos verdes y quemados, los RAC verdes tienen humedad promedio del 57.87 % mientras que la humedad promedio de los residuos después de la quema fue de 29.90 %, lo que representa una diferencia de humedad de 27.97 % (casi la mitad de la humedad que mostraron los RAC verdes) (Muñoz, 2015).

1.5.3. Cenizas

Debe observarse la siguiente tabla:

Tabla III. **Contenido de ceniza en los residuos**

Combustible	% cenizas
RAC verde	8
RAC quemado	6.2
Promedio	7.1
Diferencia	1.8

Fuente: Muñoz, M. (2017). *Guía para el aprovechamiento del RAC como un biocombustible*.

Anteriormente se puede observar que existe una diferencia de 1.8 %, el valor de cenizas en el residuo de caña dependerá de la operación del implemento y la maquinaria de alce, así como las condiciones de humedad del terreno.

1.6. Producción energética

En los últimos años el residuo de caña ha despertado el interés como combustible en los ingenios, ha sido utilizado en algunos casos para contribuir con el déficit energético en los ingenios cuando existen inestabilidades en la molienda de caña. También tiene un alto potencial para la generación de energía eléctrica. Estos residuos constituyen una fuente de energía renovable cada año, con una relación de 0.12 Ton de residuos por tonelada de caña producida (Menes, 2013).

1.6.1. Emisiones de CO₂ de biomasa de caña

Las emisiones de CO₂ en el cultivo de caña son significativas originadas por la labor de quema antes de la cosecha. Esta labor se realiza con varios objetivos, uno de ellos es la visibilidad al momento de cortar la caña al eliminar las hojas secas, lo cual aumenta la eficiencia en el corte por reducir el tiempo de limpieza de los tallos (Reinosa, 2018).

Durante el proceso de quema se generan contaminantes atmosféricos como monóxido de carbono, hidrocarburos y óxido de azufre, gases nocivos que inciden el aumento de enfermedades respiratorias (Reinosa, 2018).

En el suelo la quema de caña provoca la degradación del mismo por la disminución del carbono orgánico aún sin la aplicación de fertilización mineral (Reinosa, 2018).

El impacto que provoca la quema de caña depende de la intensidad del fuego y la cantidad de área quemada. La disminución de áreas a las cuales se

realizó la labor de quema está reflejada en la disminución de las emisiones de CO₂ eq (Reinosa, 2018).

Para el periodo 2013-2014 en Guatemala las estimaciones de la huella de carbono fueron de 894,094 tCO₂eq siendo 110,609.74 tCO₂eq (12 %) las quemas de biomasa de caña en campo, esto incluye la quema para el corte y la requema en labores agrícolas (González, 2015).

1.6.2. Potencial energético de los RAC

Los usos que se le pueden dar a los residuos de cosecha de caña en la actualidad son diversos, estos dependerán de la disponibilidad de recursos y el acceso a la tecnología con la que se cuente. Algunos métodos que se utilizan son la hidrólisis, pirolisis, gasificación y combustión (INTA, 2013).

1.6.3. Comparación con otras fuentes energéticas

Se presenta a continuación:

1.6.3.1. Comparación con bagazo de caña

Debe observarse la siguiente tabla:

Tabla IV. **Equivalente energético de combustibles**

Combustible	Utilización	Humedad %	Poder calorífico GJ/TM	Procesamiento TM/zafra	Energía Total GJ/Zafra	Rendimiento energético
Syngas con vapor	Combustión en quemadores	0	35,000	50,000	1,750,000	2.11
Syngas con O2	Combustión en quemadores	0	28,800	50,000	1,440,000	1.74
Char a granel	Combustión mezcla con bagazao	0	30,000	50,000	1,200,000	1.45
Syngas con aire	Combustión en quemadores	0	17,000	50,000	850,000	1.02
Pellets de RAC	Combustión mezcla con bagazo	10	16,828	50,000	841,000	1.01
Pellets de RAC	Comercialización externa	10	16,828	50,000	841,000	1.01
RAC a granel	Combustión mezcla con bagazo	20	16,594	50,000	829,700	1.00
Bagazo a granel	Combustión	50	6,310	50,000	315,500	0.38

Fuente: Muñoz, M. (2017). *Guía para el aprovechamiento del RAC como un biocombustible*.

En la tabla anterior se evidencia que el combustible que mejor rendimiento alcanza es el Syngas que utiliza vapor como oxidante, esto es debido a que gran parte de ese vapor se convierte en hidrógeno y aumenta el poder calorífico final, este gas presenta poco más del doble de energía que el RAC a granel y 5.5 veces más rendimiento energético que el bagazo húmedo (50.00 %).

El Syngas producido con oxígeno puro presenta oportunidades de alcanzar altos rendimientos energéticos, así este gas presenta 1.74 veces el del RAC a granel. Aunque este gas tiene comparativamente mucho potencial, representa

mayores costos porque se necesita inyectar al reactor oxígeno puro, lo que aumentaría los costos operativos.

El Char representa casi un 45.00 % más de rendimiento energético que el RAC a granel, a pesar que se pierde un 20.00 % del volumen de RAC que le dio origen, mientras que el Syngas producido con aire y los *pellets* tienen poderes caloríficos muy parecidos al RAC a granel con 20.00 % de humedad.

Finalmente, el RAC a granel con al menos un 20.00 % de humedad (referencia para este análisis) tiene aproximadamente 2.5 veces más rendimiento energético que el bagazo promedio que actualmente utilizan los ingenios que tiene un 50.00 % de humedad.

Por lo tanto, queda evidenciado que el RAC en cualquiera de los combustibles generados con las tecnologías descritas, representa mayor rendimiento energético que el bagazo, por lo que representa una tecnología promisoría desde un punto de vista energético (Muñoz, 2015).

1.6.3.2. Comparación con *chip* de madera

El *chip* de madera proveniente de la explotación forestal también es una fuente para la producción energética. El poder calorífico de la celulosa está alrededor de 7645 BTU/lb. La variación que tienen estos valores se debe a los contenidos de agua asociados a la especie con la que se trabaje y al tiempo de secado de la madera como por ejemplo: la leña común, su valor promedio es de 4,4497 BTU/lb y la casuarina en 5,846 BTU/lb (Menes, 2013).

Tabla V. **Composición de los combustibles sólidos**

Combustible	C	H	S	N	O	Ceniza	PC (BTU/lb)
RAC	42.4	6.3	-	-	44.3	7.0	8,065
Bagazo	47.0	6.5	-	-	44.0	2.5	8,274
Madera	49.5	6.2	-	1.1	43.1	-	5,792
Turba	21.0	8.3	0.6	1.1	62.9	6.0	3,580
Lignito	42.4	6.6	1.1	0.6	42.1	7.2	7,087
Antracita	84.4	1.9	0.9	0.6	4.4	7.8	13,293

Fuente: Menes, S.; Morales, V.; Mas, J.; Ferreiro, L. y Sardiñas, A. (2013). *Alternativa para aumentar la entrega de energía eléctrica en el central azucarero Antonio Sánchez*. Consultado el 12 de junio de 2018. Recuperado de <http://centrozucar.uclv.edu.cu/media/articulos/PDF/2013/1/10.pdf>

En la tabla anterior se puede observar los valores de la madera por debajo del valor de los residuos de caña.

1.6.3.3. Comparación con carbón mineral

Debe observarse la siguiente tabla:

2. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

2.1. Descripción de los residuos de cosecha de caña de azúcar

Se realiza a continuación:

2.1.1. Cosecha caña manual

La cosecha manual se puede realizar con el cultivo previamente quemado o el corte en verde, comúnmente se realiza con el cañal quemado, con esto se facilita el corte al eliminar el exceso de follaje seco.

La cosecha manual inicia con el corte de tallos desde la base, luego se limpia eliminando puntas y follaje, para luego apilar los tallos orientándolos perpendicularmente a los surcos, para luego ser alzados y depositados en vehículos o jaulas para su transporte hacia el ingenio. Al igual que los tallos, las puntas y follaje en el corte, se apilan perpendicularmente a los surcos para luego ser recolectados.

2.1.2. Cosecha caña mecanizada

En este tipo de corte, al igual que el corte manual, el cañal puede o no estar quemado previamente, la cantidad de residuos entre corte en verde y quemado es variable, siendo el corte en verde el método que más residuo de cosecha provee.

La cosechadora mecánica se encarga de cortar los tallos y despuntarlos. Con los equipos troceadores de estas máquinas, se cortan los tallos en trozos para ser depositados dentro de los camiones para su envío a fábrica. La cosechadora tiene la función de separar y expulsar los residuos de cosecha, en su mayoría hojas picadas.

En la presente investigación no se tomó en cuenta el corte mecanizado ya que en el ingenio donde se realizó la metodología el corte mecanizado se realizó en quemado y la cantidad de residuos es baja (menor a 0.5 Ton/ha), lo cual no la hace económicamente atractiva.

2.2. Descripción de equipos de recolección utilizados

Se describen a continuación:

2.2.1. Tractores agrícolas

Los tractores agrícolas utilizados son de 2 tipos: tractores de 100 Hp para uso del implemento recolector y tractores de 135 Hp para tiro y movimiento de jaulas.

2.2.2. Empacadoras de forraje

Se utilizaron empacadoras de forraje New Holland modelo BC5070, las cuales tienen la capacidad de hacer pacas de aproximadamente 44 a 66 lb, ya que estas se adaptan para recolectar los residuos en el corte manual. Con la ayuda de un tractor para tiro y con la toma de fuerza (PTO), se procede a empacar los residuos de cosecha, los cuales quedan en el campo para ser levantados con el uso de alzadoras de caña y ser depositados en jaulas cañeras.

Tabla VII. **Características de empacadora**

Empacadora convencional	BC5070
Dimensiones paca	0.36x0.46x0.31 a 1.32 m
Recogedor	
Ancho interno/total	1.90 / 2.00 m
No. de ganchos	156 en 6 barras
Sistema de alimentación	Horquilla alimentadora y 3 pares de rotores
Mecanismo de amarre	Anudador/torcedor (HD)
Peso aproximado	1.7 TM
Requerimiento del tractor min.	75 hp

Fuente: elaboración propia.

2.2.3. Empacadora modificada

Se evaluó el uso de un conductor adaptado a la empacadora para poder trasladar el residuo a granel hacia a un carretón autovolteo para evitar el uso de pita por la elaboración de pacas y la reducción en el uso de la maquinaria de alce del residuo. El conductor adaptado a la empacadora convencional va junto al autovolteo integrado a la barra de tiro, los cuales son movidos por un tractor, en este sistema se omite el uso del sistema de amarre y el producto es depositado a granel.

El mecanismo del autovolteo es utilizado para el llenado de jaulas, esto permite el ahorro en maquinaria de alce de los residuos de cosecha.

2.2.4. Alzadora de caña

La labor de alce se realizó utilizando alzadoras de caña del modelo CAMECO Sp 3000, esta maquinaria permite levantar las pacas para luego depositarlas en jaulas cañeras de 30 a 40 pies.

2.2.5. Transporte

Luego del llenado de jaulas se procedió a trasladar el material utilizando un cabezal en equipos de 2, 3 y 4 jaulas, estos equipos fueron pesados en báscula del ingenio para luego ser trasladados hacia el patio de procesamiento en fábrica. Los equipos enviados se pesan en báscula, antes de la descarga, luego con los equipos vacíos se procede a pesar nuevamente para obtener el peso de los residuos transportados por viaje.

2.3. Procesamiento del material para uso en calderas

Se da como a continuación se describe.

2.3.1. Recepción de equipos

Con el equipo previamente pesado, se procede a realizar la descarga, para esto se utiliza un virador hidráulico, el cual se engancha a las jaulas y las voltea para descargarlas. Utilizando cargador frontal se procede a limpiar y apilar el producto para su procesamiento.

El área de descarga está acondicionada con una pared metálica la cual sirve de soporte para el volteo de jaulas, el volteo se realiza una jaula a la vez y con el

uso de cargadores frontales se procede a limpiar el área, para la recepción de otros equipos.

2.3.2. Procesamiento

El procesamiento del material consiste en preparar el material antes de ser picado y enviado a través de bandas transportadoras hacia las calderas. La pita con la que se sujetan las pacas debe ser removida antes del picado, esto para evitar problemas con las cuchillas de la picadora, para esto se utilizan cargadores frontales y mano de obra.

La picadora utilizada tiene capacidad de procesar 12 Ton/hora de material, la cual da como resultado un tamaño de partícula aproximado de 5 mm. El material que se recolectó con la metodología del conductor y autovolteo pasa a ser picado directamente después de la descarga ya que, como anteriormente se mencionó, para esa metodología ya no se utiliza pita para sujetar el material.

El material picado se traslada en bandas transportadoras hacia las calderas para su combustión.

2.3.3. Determinación de parámetros de calidad del material

De los residuos recolectados y procesados se enviaron muestras al laboratorio de fábrica, donde se determinó el contenido de humedad, ceniza (tierra) y poder calorífico en BTU/lb. Los parámetros de calidad para el residuo de caña están basados en los parámetros de bagazo que son: contenido de humedad menor al 50 % y contenido de impurezas (ceniza) menor al 12 %.

2.3.4. Determinación de humedad y ceniza

Luego de entregado el material previamente picado a un tamaño de 5 mm aproximadamente, se pesa una muestra, se introduce al horno a 105°C y después de 24 horas de secado se procede a obtener el peso seco de la muestra. El contenido de humedad se determina sobre base húmeda con la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Humedad} = \frac{(\text{peso húmedo} - \text{peso seco})}{\text{peso húmedo}} \times 100$$

El contenido de ceniza se refiere a la cantidad de impurezas con las que se recolecta el material, para la determinación del contenido de ceniza se utilizó una mufla en la cual se ingresa el producto con un peso conocido, luego se obtiene un segundo peso y la diferencia del peso 1 y el peso 2 es el contenido de ceniza o impurezas del material:

$$\% \text{ Ceniza} = \frac{(\text{peso inicial} - \text{peso final})}{\text{peso inicial}} \times 100$$

2.3.5. Determinación del poder calorífico

Para la obtención del poder calorífico de los materiales el laboratorio cuenta con un calorímetro, el cual permite obtener la cantidad de calor liberado por la muestra.

Tabla VIII. **Análisis de laboratorio**

Muestra	Material	Humedad % (base húmeda)	Ceniza (%)	Poder calorífico (BTU/lb)
1	Residuo cosecha	23.51	11	5,548
2	Residuo cosecha	11.50	9.63	6,486
3	Residuo cosecha	36.91	9.47	5,180
4	Residuo cosecha	27.26	10.27	5,138
5	Carbón	13.25	-	12,072
6	Carbón	12.65	-	12,062

Fuente: elaboración propia.

En la tabla anterior se puede observar que el poder calorífico del residuo de cosecha está relacionado con el contenido de humedad, a valores altos de humedad hay un menor poder calorífico.

La equivalencia del uso del residuo con relación al carbón guarda una relación entre 2 a 2.6 Ton de residuos/Ton de carbón, esto dependerá de la humedad y el contenido de impurezas con que se obtenga el residuo de caña.

2.4. Determinación del rendimiento y costo de recolección

Se da como a continuación se describe.

2.4.1. Rendimiento residuos por hectárea

El rendimiento de los residuos se determinó con la información obtenida de báscula, los pesos por viaje, luego se sumó todos los pesos por viaje obtenidos de un lote y se dividió por el área de ese lote.

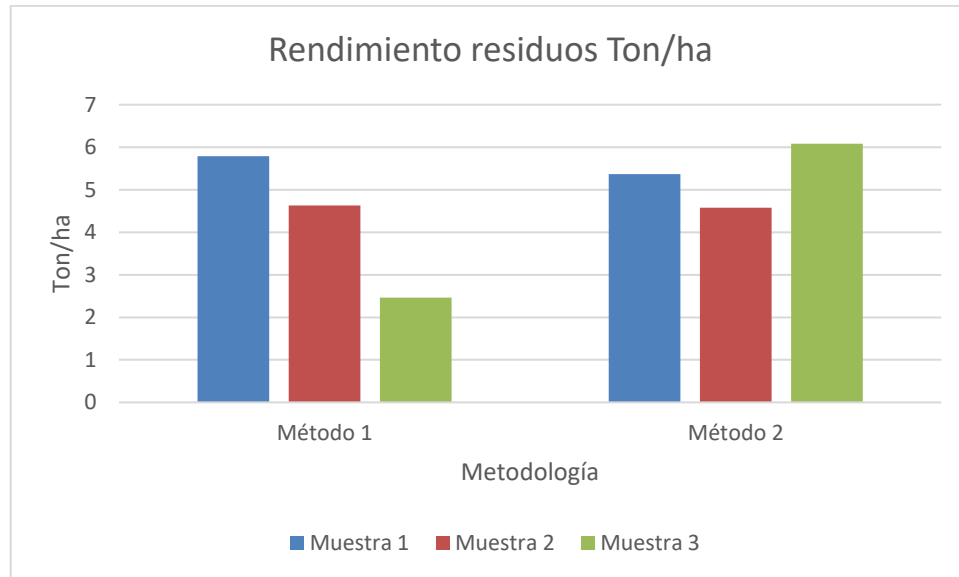
$$\text{Rendimiento Ton/Ha} = \frac{\text{Peso residuos lote}}{\text{Area lote (Ha)}}$$

Tabla IX. Rendimiento de residuos de cosecha

Lote	Metodología	Ton	Área	Ton/Ha
1	1	56.47	9.75	5.79
2	1	80.11	17.31	4.63
3	1	34.48	14	2.46
4	2	46.99	8.75	5.37
5	2	41.67	9.10	4.58
6	2	40.32	6.63	6.08

Fuente: elaboración propia.

Figura 1. **Rendimiento de residuos de cosecha por metodología**



Fuente: elaboración propia.

Los rendimientos de residuos de cosecha van de valores de 2 a 6 toneladas por hectárea, esto dependerá del número de corte del cultivo, ya que por lo general el menor rendimiento se da en cañales de mayor edad, también dependerá de la variedad, hora de quema y madurez del cultivo al momento de la quema.

2.4.2. Determinación de costos

Para la determinación de los costos se utilizó el tarifario de la maquinaria utilizado en la empresa, el costo es determinado por la depreciación y el combustible, la maquinaria utilizada en las 2 metodologías se describe en la siguiente tabla.

Tabla X. **Tarifario para el periodo de zafra 2019-2020**

Descripción categoría	Tarifa Q/hora
Tractor categoría 1, 80-100 hp	90.52
Tractor 136-150 hp	121.26
Empacadora	216.33
Alzadora	145.53
Carreton autovolteo	84.04
Cabezal 120,000 lbs Cat 40	11.16
026:Jaula Cañera A Granel 35 Pies	1.82
052:dolies eje doble	1.06
Costo materiales pita enfardadora/lb	9.50
Cargador Frontal Cat. 14	173.74
Demoladora	1,715.65

Fuente: elaboración propia.

2.4.2.1. Costo de recolección

El costo de recolección se determinó haciendo uso de la tarifa comercial de la maquinaria, materiales y mano de obra.

2.4.2.2. Costo de transporte

El costo de transporte se determinó con la tarifa comercial por kilómetro de equipos trasladados con cabezal.

2.4.2.3. Costo de picado del residuo

El costo de picado del material se determinó por la tarifa comercial de un cargador frontal, una picadora eléctrica y la mano de obra utilizada.

Tabla XI. **Determinación de costo**

Método	Maq.	M.O.	Material	Transp.	Picado residuos	Q/Ton
1	Q. 130.07	Q. 39.38	17.99	10.61	Q.38.00	Q. 236.05
2 (Mod)	Q.144.65	Q.33.19	-	Q.9.34	Q.24.00	Q. 211.18
Carbón	-	-	-	-	-	Q.754.00

Fuente: elaboración propia.

2.4.3. **Determinación de la relación beneficio-costo**

Con el dato del poder calorífico de las distintas muestras se procedió a realizar la comparación del carbón con el residuo de caña de azúcar.

Tabla XII. **Relación beneficio-costo**

Material	Costo	Rel 1/2.6	Ahorro/Ton Carbón	35000 TM RAC
Carbón	Q.754.00	-	-	-
Residuo 1	Q.236.05	Q.613.73	Q.140.27	Q.1,888,250
Residuo 2	Q.211.18	Q. 549.07	Q. 204.93	Q. 2,758,673

Fuente: elaboración propia.

Asumiendo la producción de energía del carbón en 1.8 MWH/TM, con el precio Spot de la energía promedio de 63.32 US\$/MWH y la relación 2.6 toneladas de residuos por 1 de carbón, se procedió a calcular la ganancia por la generación de energía.

Tabla XIII. Comparación de generación de energía

Material	MWH/T M	Precio Spot energía US\$/MWH 2019	Ingreso US\$/T M	Costo US\$/TM (Rel 1:2.6)	Ganancia US\$/2.6 TM residuos	Diferencia residuos con carbón US\$
Carbón	1.8	63.32	113.98	100.53	13.45	-
Residuo caña 1	-	-	-	81.83	32.15	18.70
Residuo caña 2	-	-	-	73.21	40.77	27.32

Fuente: elaboración propia.

En la tabla anterior se puede observar que en cualquiera de las dos metodologías se obtiene una ganancia mayor al uso del carbón, el costo del carbón actualmente es de Q.754.00, lo que indica que el máximo costo al que se puede obtener la tonelada de residuo es de Q.290.00, arriba de esto ya no genera ganancia.

3. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

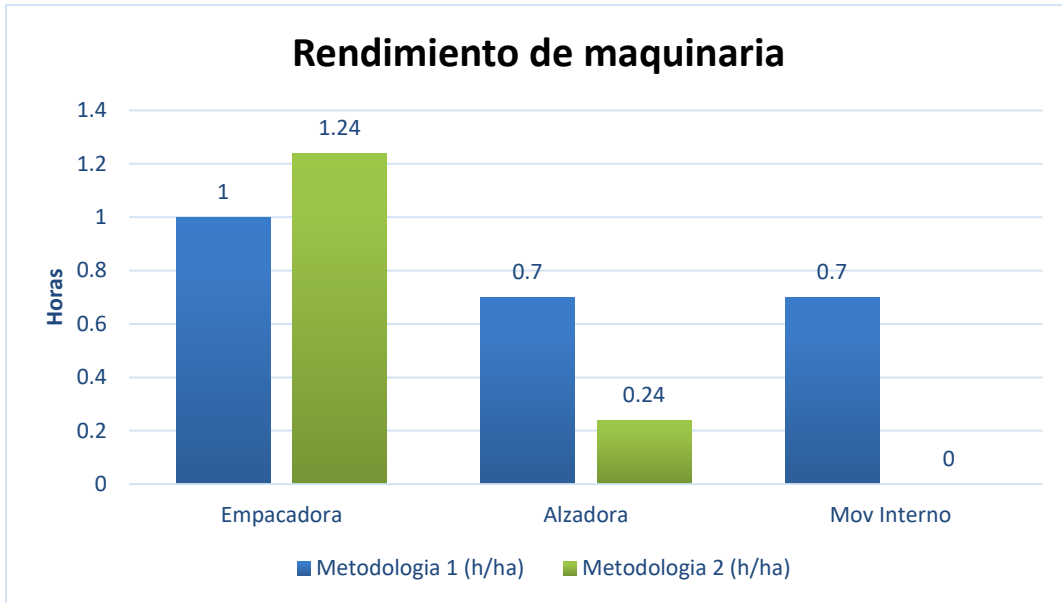
3.1. Comparación de eficiencias de metodologías recolección

En esta investigación se desarrollaron dos metodologías de recolección: en la metodología 1 se utilizaron empacadoras New Holland BC5070, tractores de 100 Hp para uso del implemento, tractores de 135 Hp para movimiento de jaulas y alzadora, esta metodología consiste en empacar los residuos de cosecha, auxiliándonos de cinta plástica, para luego levantarlos con uso de alzadora, depositarlos en jaulas cañeras y luego ser trasladados con el uso de cabezales en equipos de 2, 3 y 4 jaulas.

La metodología 2 consistió en la utilización de la empacadora New Holland BC5070 con la adaptación de un canal conductor hidráulico, tractores de 135 Hp, autovolteo y alzadora, esta metodología permite la eliminación del sistema de amarre, por lo cual no se utilizó pita para amarrar los residuos y el material fue depositado a granel en jaulas cañeras, igualmente con uso de cabezales fueron trasladados en equipos de 2, 3 y 4 jaulas.

Los rendimientos de las dos tecnologías fueron medidos a través de su eficiencia en horas/hectárea. Los resultados se pueden observar en la siguiente figura:

Figura 2. Rendimiento de maquinaria



Fuente: elaboración propia.

En la gráfica anterior se observa el aumento en horas de la metodología 2 en horas de empacadora, asimismo esta metodología permite la disminución de horas por el uso de alzadora y la eliminación de horas por uso de tractores para el movimiento de jaulas.

3.2. Determinación de costo y rendimiento por hectárea

Se da como a continuación se describe:

Tabla XIV. **Determinación de costo**

Método	Maquinaria	M.Obra	Materiales	Transporte	Picado chip	Costo/Ton
1	Q. 130.07	Q. 39.38	17.99	10.61	Q.38.00	Q. 236.05
2	Q.144.65	Q.33.19	-	Q.9.34	Q.24.00	Q. 211.18
Carbón	-	-	-	-	-	Q.754.00

Fuente: elaboración propia.

El tipo de metodología utilizada influye en el costo de recolección, ya que la metodología 2 a pesar de que tiene un mayor gasto en maquinaria, tiene un ahorro mayor en materiales, ya que no se utiliza pita para amarrar las pacas de residuos de cosecha.

Tabla XV. **Rendimiento de residuos de cosecha**

Metodología	Ton	Área	Ton/Ha
1	171.06	41.06	4.17
2	128.98	24.48	5.27

Fuente: elaboración propia.

El rendimiento de los residuos de cosecha de caña está entre los valores de 2 a 6 Ton/Ha, esto dependerá de la edad del cultivo, tipo de madurante

aplicado, variedad, humedad de suelo, entre otros, el tipo de metodología utilizado es un factor que influye poco sobre la cantidad de residuo recolectado.

3.3. Determinación del poder calorífico de los residuos de cosecha

Es importante la siguiente tabla:

Tabla XVI. **Poder calorífico (BTU/lb) promedio**

Material	Poder calorífico (BTU/lb) promedio
Residuo cosecha	5,588

Fuente: elaboración propia, con ayuda del análisis de laboratorio de fábrica.

El poder calorífico de los residuos de cosecha analizados es de 5,588, esto está influenciado por la humedad con la que se recolecte el material, a mayor humedad hay una disminución del poder calorífico.

3.4. Beneficio económico por uso de residuos de cosecha

El beneficio económico del uso de los residuos de cosecha en la generación de energía viene determinado por el combustible utilizado en generación de energía y que tiene un costo mayor, en este caso es el carbón, ya que con el bagazo es imposible competir porque a pesar de tener humedades arriba del 50 % y con poderes caloríficos que no sobrepasan los 3,500 BTU/lb, el costo de producción es bajo por tratarse de un subproducto de la molienda.

Dadas estas condiciones se procedió a comparar el beneficio de la utilización de los residuos de cosecha en combinación con los otros combustibles utilizados para generar energía, teniendo como resultado la siguiente tabla:

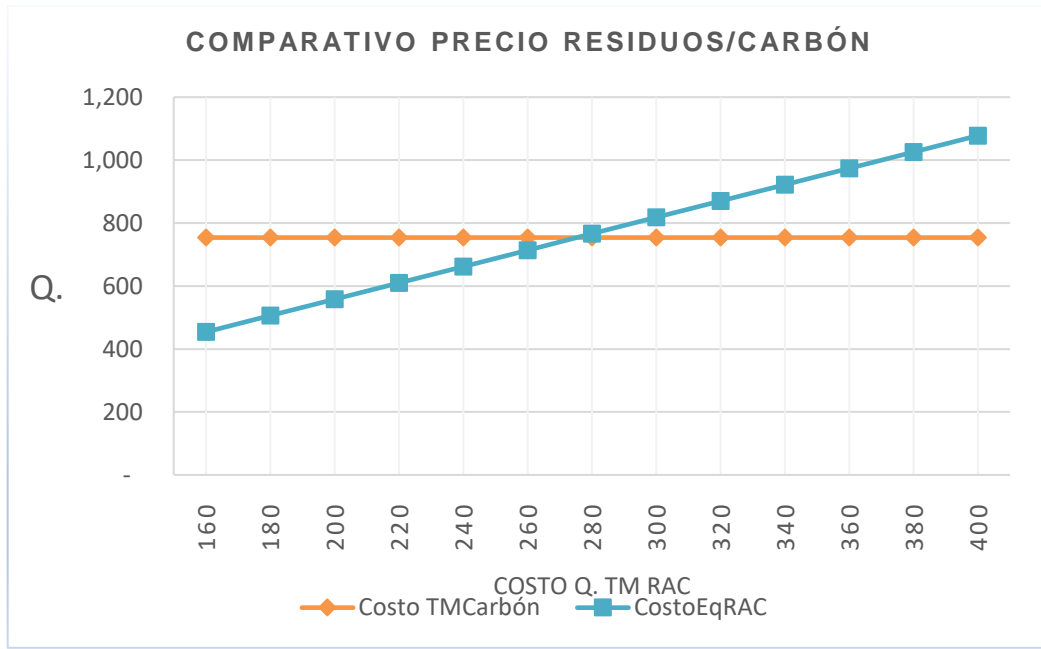
Tabla XVII. **Relación de carbón/residuos de cosecha**

Relación carbón/residuos	1/2.6	Costo picado	Total	Comparativo costo	Ahorro/2.6Ton	Producción 35000
Costo de carbón	Q 754.24	-	-	-	-	-
Costo Met. 1	Q 198.05	Q 38.00	Q 236.05	Q 613.73	Q 140.51	Q 1,891,481
Costo Met. 2	Q 187.18	Q 24.00	Q 211.18	Q 549.07	Q 205.17	Q 2,761,904

Fuente: elaboración propia.

En cualquiera de las 2 metodologías descritas existe un ahorro por el uso de residuos de cosecha en mezclas para uso en calderas, el beneficio estará determinado por el costo del carbón.

Figura 3. **Comparación de precio de residuos/carbón**



Fuente: elaboración propia.

En la figura anterior es posible observar que a un precio de Q.754.00 por tonelada de carbón, el costo máximo que se puede tener de recolección es de Q.270.00, las dos metodologías utilizadas están por debajo de ese costo, pero es importante siempre tomar en cuenta el costo del carbón, la variación del precio de este determinará qué tan rentable es la metodología.

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Con la falta de alternativas para la explotación de la energía renovable en la industria azucarera y, por el contrario, el aumento en el consumo de carbón mineral y *bunker*, se hace evidente la búsqueda de alternativas más económicas y más amigables con el ambiente.

Definir metodologías para el aprovechamiento de la biomasa de caña es importante, ya que ello permitirá aprovechar el residuo de caña para su uso como combustible en la producción de energía, evitando las pérdidas de este material en campo, disminuyendo la contaminación por la quema del mismo y apoyando las labores consecutivas que se realizan en campo.

Este estudio brinda una metodología de recolección del residuo de caña de azúcar desde su procesamiento en campo con el uso de implementos y maquinaria agrícola, hasta la entrega en fábrica para su procesamiento, análisis de calidad y el beneficio que se obtiene con la mezcla o sustitución del carbón.

En la metodología desarrollada en este estudio se utilizaron empacadoras de forraje, estas fueron desarrolladas en residuos de cosecha de corte manual, se determinaron las eficiencias y la funcionabilidad de dos variaciones en el método, la diferencia entre ellas es la integración del equipo de levante y la omisión del uso de materiales, específicamente pita para amarre de las pacas, las dos metodologías son adaptables a nuestro medio.

El costo de la tonelada de residuos está determinado por la cantidad de maquinaria, mano de obra y materiales utilizados en la recolección, la

metodología que se utilice también es un factor importante ya que existen diferencias entre un método y otro, siendo el método integral más económico, otro aspecto que se debe tomar en cuenta en la recolección de residuos es el rendimiento del material por hectárea, ya que varios factores influyen en la disponibilidad de residuos después de cosecha, como por ejemplo edad del cultivo, maduración al corte, la quema del cultivo previo a cosecha, el rendimiento de estos oscila entre valores de 2 a 4 toneladas por hectárea.

Para poder determinar si un material se puede utilizar en sustitución de otro combustible se debe evaluar la capacidad de generar calor, esta capacidad calorífica está influenciada por el contenido de humedad y por el contenido de impurezas con que se obtenga el material, el poder calorífico del residuo de caña oscila entre 4500 y 5500 BTU/lb, comparado con el carbón se tiene una relación de 2 a 2.6, que tiene un poder calorífico entre 10,000 y 12000 BTU/lb.

Teniendo en cuenta la relación que existe entre los residuos de cosecha y el carbón se puede determinar el beneficio económico que se tiene sustituyendo en mezclas este combustible, el beneficio que se puede obtener por la sustitución del carbón está determinado por el precio del mismo, ya que con precios arriba de Q.754 se puede recolectar los residuos a Q.280.00, también es importante tomar en cuenta las impurezas con que el material es llevado a las calderas, en esta investigación se obtuvieron valores menores al 12 % de impurezas.

Las ganancias por venta de energía van desde los US\$ 12 a 15.40 por cada tonelada de residuos de cosecha, esta ganancia está determinada por el costo de recolección.

CONCLUSIONES

1. Se desarrolló la metodología de recolección, la cual permitió la obtención del residuo de cosecha de caña de azúcar, la misma permite reducir los problemas ambientales por la labor de requema y reduce los hospederos de plagas y enfermedades, en una de las dos metodologías se elimina la contaminación por uso de pita plástica, lo que conlleva un mayor beneficio económico y ambiental.
2. La tecnología de recolección utilizada constó de empacadoras de pasto, maquinaria agrícola, jaulas cañeras y cabezales para el transporte del material para su procesamiento y uso en calderas para la producción de energía eléctrica.
3. El costo de la tonelada métrica de residuos de cosecha de caña lo componen la maquinaria utilizada, la mano de obra, transporte y procesamiento, dependiendo la tecnología utilizada los valores varían desde Q211.00 y Q.236.00, y la cantidad de residuos que se puede obtener por hectárea oscila entre 4.17 y 5.27 toneladas por hectárea.
4. La capacidad de generación de calor de los residuos de caña de azúcar va a depender de la cantidad de humedad y el contenido de impurezas con la que se recolecte, los valores oscilan entre los 4,500 y 5500 BTU/lb, a valores de humedad entre 11 y 37 % de humedad y entre 9 y 11 % de impurezas.

5. El beneficio económico obtenido por la generación de energía por el uso de los residuos depende del combustible utilizado para comparar, en esta investigación se utilizó la comparación con el carbón, donde la relación aproximada es de 2.6 toneladas de residuos por 1 tonelada de carbón, esto genera un ahorro entre el 17 y 25 % por tonelada de carbón. Las ganancias por venta de energía van desde los US\$ 12 a 15.40 por cada tonelada de residuos de cosecha, esta ganancia está determinada por el costo de recolección.

RECOMENDACIONES

1. Implementar la metodología para la recolección de residuos de caña de azúcar donde lo permitan las condiciones de terreno y cantidad de material.
2. Utilizar la metodología de adaptación del conductor, ya que esta permite un mayor ahorro económico y menor contaminación ambiental por el uso de pita para el amarre de los paquetes.
3. Determinar el beneficio económico de la utilización de residuos de cosecha, con radios de operación mayores a 23 kilómetros.
4. Evaluar metodologías para el secado del residuo de cosecha y evaluar el beneficio por el aumento del poder calorífico.
5. Desarrollar metodologías para realizar la limpieza del residuo antes de la combustión para disminuir los desgastes en calderas.

REFERENCIAS

1. Barrera, D. (2012). *Pirolisis de residuos de cosecha de caña de azúcar (RAC) como alternativa de aprovechamiento en procesos de cogeneración*. (Tesis de Maestría). Universidad del Valle Colombia, Colombia. Recuperado de <http://bibliotecadigital.univalle.edu.co/bitstream/10893/8696/1/TESIS-final-pirolisis-RAC.pdf>
2. Casen S.; Marto, L.; Medina, M.; Romero R.; Torres, A. y Pérez, D. (2011). *Evaluación del desempeño de dos enfardadoras para la recolección de residuo agrícola de cosecha (RAC) de caña de azúcar en Tucumán*. Tucumán, Argentina: Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres. Recuperado de <http://www.eeaoc.org.ar/upload/contenido/pdf/20121122111107000000.pdf>
3. Castillo, J. y Lucuara, J. (2016). *Uso de residuos agrícolas de cosecha (RAC) como combustible no convencional para generar energía eléctrica en calderas de potencia*. Cali, Colombia: Cenicaña. 07 de Junio 2018. Recuperado de <http://www.ceaca.com/wp-content/uploads/2016/06/7-USO-DE-RESIDUOS-AGR%C3%8DCOLAS-DE-COSECHA-COMO-COMBUSTIBLE.pdf>
4. Gonzáles, O. y Guerra, A. (2015). *La huella de carbono del azúcar de Guatemala. Zafra 2013-2014*. Ciudad de Guatemala, Guatemala: Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático (ICC).

Recuperado de <https://icc.org.gt/wp-content/uploads/2016/07/La-huella-del-carbono-del-azucar-de-guatemala.pdf>

5. León, S.; Ramírez, D.; Hernández, T.; Medina, E. (2013). *Paja de la caña de azúcar. Sus usos en la actualidad*. La Habana, Cuba: Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar. Recuperado de <http://www.redalyc.org/pdf/2231/223128548003.pdf>
6. Lozano, S.; Contreras, S. y López, G. (2012). *Sistema de recolección de residuos agrícolas cañeros en un ingenio del Valle del Cauca. Modelado y Costeo*. Valle del Cauca, Colombia: Universidad Autónoma de Occidente. Recuperado de https://www.academia.edu/9591325/Sistema_de_recoleccion_de_residuos_caneros_modelado_y_costeo
7. Mathier, D.; Saleme, P.; Bragachini, M.; Sánchez, F. y Méndez, J. (2013). *La caña de azúcar como cultivo energético*. Buenos aires, Argentina: INTA. Recuperado de <http://www.cosechaypostcosecha.org/data/articulos/agoindustrializacion/La-Cana-De-Azucar-Como-Cultivo-Energetico.pdf>
8. Melgar, M.; Meneses, A.; Orozco, H.; Pérez, O. y Espinosa, R. (2014). *El cultivo de la caña de azúcar en Guatemala*. Ciudad de Guatemala, Guatemala: CENGICAÑA.
9. Menes, S.; Morales, V.; Mas, J.; Ferreiro, L. y Sardiñas, A. (2013). Alternativa para aumentar la entrega de energía eléctrica en el central azucarero Antonio Sánchez. *Revista Centro Azúcar*,

- volumen* (40), 68-69. 12 de Junio 2018. Recuperado de <http://centroazucar.uclv.edu.cu/media/articulos/PDF/2013/1/10.pdf>
10. Muñoz, M. (2017). *Guía para el aprovechamiento del RAC como un biocombustible*. Ciudad de Guatemala, Guatemala: CENGICAÑA.
 11. Muñoz, M. y Méndez, J. (2017). *Caracterización de parámetros combustibles de los residuos agrícolas de la cosecha (RAC) de acuerdo al tiempo de secado natural en campo*. Ciudad de Guatemala, Guatemala: CENGICAÑA.
 12. Ortiz, H. (2017). *Efectividad de la recuperación de residuos de cosecha de la caña de azúcar con equipo mecánico*. México D.F., México: Grupo MASCAÑA. Recuperado de <http://conadesuca.gob.mx/pdfsATAM/6%20pEFECT%20RECUP%20RESIDUOS%20%20COSECHA%20CA%20C3%91A%20AZUC%20CON%20EQUIPO%20MEC%20.pdf>
 13. Rincón, J. y Silva, E. (2014). *Bioenergía: fuentes, conversión y sustentabilidad*. Bogotá, Colombia: Red Iberoamericana de Aprovechamiento de Residuos Orgánicos en Producción de Energía. Recuperado de <https://docplayer.es/64628857-Bioenergia-fuentes-conversion-y-sustentabilidad-editores-red-iberoamericana-de-aprovechamiento-de-residuos-organicos-en-produccion-de-energia.html>
 14. Ripoli, T.; Molina Jr., W.; Stupiello, J.; Nogueira, M. y Saccomano, J. (1991). Potencial energético de residuos de cosecha de caña verde. *Revista Stab*, 10 (1), 1-2. Recuperado de

https://www.academia.edu/29134187/Potencial_Energetico_De_Residuos_De_Cosecha_De_Ca%C3%B1a_Verde

15. Toledo, E.; Cabrera, A.; Leyva, A. y Pohlan, A. (2008). *Estimación de la producción de residuos agrícolas en agroecosistemas de caña de azúcar*. La Habana, Cuba: Instituto de Ciencias Agrícolas. Recuperado de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=193221653004>

APÉNDICE

Apéndice 1. **Ordenamiento del residuo de cosecha**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. **Empacadora de forraje**



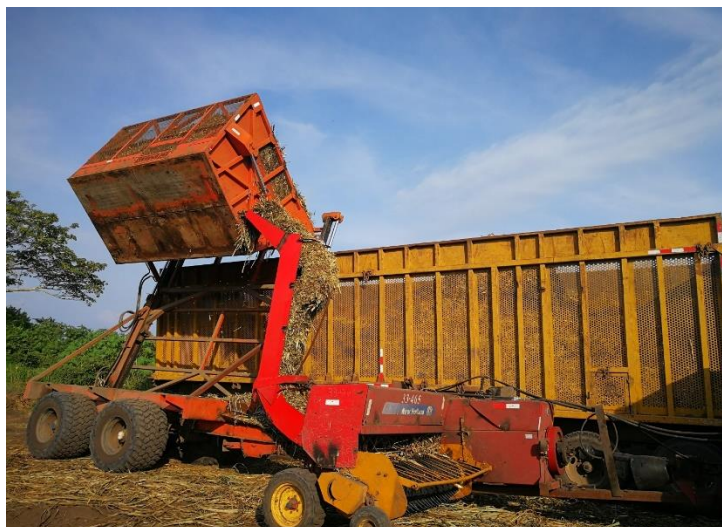
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. Empacadora modificada



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. Carga de equipos



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 5. Alce de residuos empacados



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 6. Transporte de equipos



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 7. **Pesado de equipos**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 8. **Recepción de equipos**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 9. Procesamiento del material



Fuente: elaboración propia.