



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y**  
**AMBIENTALES**  
**CARRERA DE INGENIERÍA EN ENERGÍAS RENOVABLES**

**“CARACTERIZACIÓN DEL BAGAZO DE CAÑA DE AZÚCAR DE**  
**VARIETADES DEL INGENIO AZUCARERO TABABUELA PARA**  
**BIOENERGÍA”**

**Trabajo de grado para obtener el título de Ingeniería en Energías**  
**Renovables**

**AUTOR:** Omar Napoleon Quinteros Vaca

**Director:** Dr. Juan Carlos García Montoya

Ibarra-Ecuador

2020

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y AMBIENTALES**  
**CARRERA DE INGENIERÍA EN ENERGÍAS RENOVABLES**

**“CARACTERIZACIÓN DEL BAGAZO DE CAÑA DE AZÚCAR DE VARIEDADES  
DEL INGENIO AZUCARERO TABABUELA PARA BIOENERGÍA”**

Trabajo de titulación revisada por el Comité Asesor, Previa a la obtención del Título de:  
**INGENIERÍA EN ENERGÍAS RENOVABLES**

**APROBADA:**

Dr. Juan Carlos García Montoya

**DIRECTOR TRABAJO TITULACIÓN**




MSc. José Raúl Guzmán Paz

**ASESOR**



MSc. Doris Salome Chalapunte Flores

**ASESOR**



IBARRA-ECUADOR

JULIO 2020

**AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA  
UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**

**1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA**

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte de manera digital para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

<b>DATOS DE CONTACTO</b>	
CÉDULA:	0401713789
NOMBRES Y APELLIDOS:	Omar Napoleon Quinteros Vaca
DIRECCIÓN:	Provincia del Carchi, cantón Espejo, parroquia San Isidro, calle "9 de octubre"
EMAIL:	omarquinterosv@gmail.com
TELEFONO FIJO Y MOVIL:	0986007407

<b>DATOS DE LA OBRA</b>	
TÍTULO:	CARACTERIZACIÓN DEL BAGAZO DE CAÑA DE AZÚCAR DE VARIEDADES DEL INGENIO AZUCARERO TABABUELA PARA BIOENERGÍA
AUTOR:	Omar Napoleon Quinteros Vaca
FECHA:	27 de julio de 2020
<b>SOLO PARA TRABAJO DE TITULACIÓN</b>	
PROGRAMA:	<input checked="" type="checkbox"/> PRESGRADO <input type="checkbox"/> POSGRADO
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniería en Energías Renovables
DIRECTOR:	Dr. Juan Carlos García Montoya

## 2. CONSTANCIAS

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 27 días del mes de julio de 2020

### EL AUTOR:

(Firma).....

Nombre: Omar Napoleon Quinteros Vaca

## AGRADECIMIENTO

Expreso mi gratitud a Dios, quien es una fuente de inspiración, nobleza y dedicación, además, de la infinita fuente de bendición en mi vida y familia.

Agradezco el continuo apoyo incondicional de mis padres Marta Vaca y Jorge Quinteros, quienes con su amor paciencia y esfuerzos han estado presentes a cada paso de mi vida estudiantil, inculcándome de valores como un buen ser humano. El valor de la perseverancia y la infinita ayuda frente a las dificultades y poder cumplir con la meta de obtener un título universitario.

Mi profundo agradecimiento a todas las autoridades y personal que hacen la IANCEM, por confiar en mí, abrirme las puertas y permitirme realizar todo el proceso investigativo dentro de su empresa.

De igual manera mis agradecimientos a la Universidad Técnica del Norte, a mis profesores en especial, quienes con las enseñanzas de sus valiosos conocimientos hicieron que pueda crecer día a día como profesional, gracias a cada una de ustedes por su paciencia, dedicación, apoyo incondicional y amistad.

Finalmente quiero expresar mi más grande y sincero agradecimiento al Dr. Juan Carlos García, principal colaborador durante todo este proceso, quien con su dirección, conocimiento, enseñanza y colaboración permitió el desarrollo de este trabajo.

## DEDICATORIA

Esta tesis está dedicada a:

A mis padres Marta Vaca y Jorge Quinteros, quienes con su amor, paciencia y esfuerzo me han permitido llegar a cumplir hoy un sueño más, gracias por inculcar en mí el ejemplo de esfuerzo y valentía, de no temer las adversidades porque Dios está conmigo siempre.

A mis hermanos Cristian Quinteros, Jonathan Quinteros, Javier Quinteros y Alex Quinteros por su cariño y apoyo incondicional, durante todo este proceso, por estar conmigo en todo momento gracias. A toda mi familia en especial a mis primas Liz Quinteros, Mirian Vaca, a mi abuelita Lucila Patiño porque con sus oraciones, consejos y palabras de aliento hicieron de mí una mejor persona y de una u otra forma me acompañan en todos mis metas y sueños.

Finalmente quiero dedicar esta tesis a todos mis amigos en especial a Erick Cuasapaz y Elsa Ramírez por apoyarme cuando más los necesito, por extender su mano en momentos difíciles y por el amor brindado cada día, de verdad mil gracias por ser mis hermanos de vida, siempre las llevo en mi corazón.

## ÍNDICE

RESUMEN.....	i
ABSTRACT.....	ii
CAPÍTULO I.....	1
INTRODUCCIÓN .....	1
1.2. Problema .....	3
1.2. Justificación.....	5
1.3. Objetivos .....	7
1.4. Pregunta directriz .....	7
CAPÍTULO II .....	8
MARCO TEÓRICO.....	8
2.1. Biomasa.....	8
2.2. Bioenergía .....	9
2.3. Biocombustibles.....	9
2.3.1 <i>Bioetanol</i> .....	10
2.4. Cogeneración.....	10
2.5. Hidrólisis Enzimática.....	11
2.6. Lignocelulosa .....	12
2.6.1. <i>Celulosa</i> .....	12
2.6.2. <i>Hemicelulosa</i> .....	13
2.6.3. <i>Lignina</i> .....	13
2.7. Morfología .....	13
2.8. Variedades de Caña de Azúcar (IANCEM).....	13
2.8.1. <i>Variedad PR 980</i> .....	14
2.8.2. <i>Variedad CC 85-92</i> .....	14
2.8.3. <i>Variedad CB 40-69</i> .....	15
2.9. Muestreo.....	16
2.10. Calorimetría.....	16
2.11. Caracterización Térmica TGA .....	17
2.12. Análisis Elemental .....	19
2.13. Espectroscopía de Infrarrojo Cercano NIR .....	20
2.2. Marco Legal .....	21

CAPÍTULO III.....	23
METODOLOGÍA .....	23
3.1 Descripción del Área de Estudio.....	23
3.2 Métodos.....	24
3.2.1 <i>Evaluación del Potencial Energético de la Biomasa Agro-residual de los Cultivos de Caña de Azúcar, Mediante Calorimetría, Morfología y Pesaje.</i> .....	24
Delimitación del Área de Estudio. ....	24
Morfología. ....	25
Cosecha de la Caña de Azúcar. ....	27
Obtención del Bagazo. ....	28
Pesaje de Tallos y Hojas. ....	28
Secado por Estufa.....	29
Trituración.....	31
Calorimetría.....	32
3.2.2. <i>Análisis de la Biomasa Agro-residual de Caña de Azúcar de la Forma Elemental, Proximal y estructural</i> .....	33
Análisis Proximal y Estructural (TGA). ....	33
Análisis Elemental. ....	35
3.2.3 <i>Comparación de la Generación de Energía del Uso del Bagazo Entre Cogeneración y Bioetanol del Ingenio Tababuela</i> .....	36
Cogeneración.....	36
Hidrólisis Enzimática. ....	37
3.3 Materiales y Equipos.....	38
CAPÍTULO IV.....	39
RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	39
4.1. Evaluación del Potencial Energético de la Biomasa Agro-residual de los Cultivos de Caña de Azúcar, Morfología, Pesaje y Calorimetría .....	39
4.1.1. <i>Morfología</i> .....	39
4.1.2. <i>Porcentaje de Bagazo Por Variedad</i> .....	42
4.1.3 <i>Peso Húmedo</i> .....	43
4.1.4. <i>Peso seco</i> .....	45
4.1.5. <i>Calorimetría</i> .....	48



4.2. Análisis de la Biomasa Agro-residual de Caña de Azúcar de la Forma Elemental, Proximal y Estructural .....	49
4.2.1. <i>Composición Elemental del Bagazo</i> .....	49
4.2.2. <i>Composición Proximal del Bagazo</i> .....	50
4.2.3. <i>Composición Estructural de Bagazo</i> .....	52
4.3. Comparación de la Generación de Energía del uso del Bagazo Entre cogeneración y Bioetanol del Ingenio Tababuela .....	55
4.3.1 <i>Energía por Cogeneración</i> .....	55
4.3.2. <i>Bioetanol por Hidrólisis Enzimática</i> .....	58
4.3.3 Producción Bioenergética por Cogeneración e Hidrólisis Enzimática al 50-50% .....	59
CAPÍTULO V .....	62
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	62
5.1. Conclusiones .....	62
5.2. Recomendaciones.....	64
REFERENCIAS.....	65
ANEXOS .....	79

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. <i>Hectáreas Cosechadas por Variedad IANCEM</i> .....	14
Tabla 2. <i>Características Agronómicas y Parámetros de Identificación CC 85-92</i> ..	15
Tabla 3. <i>Características de la Variedad CB 40-69</i> .....	15
Tabla 4. <i>Análisis Proximal del Bagazo de Caña de Azúcar</i> .....	18
Tabla 5. <i>Materiales y Equipos Utilizados en los Análisis del Bagazo de Caña de Azúcar</i> .....	37
Tabla 6. <i>Morfología de Hojas de las Variedades de Caña de Azúcar</i> .....	39
Tabla 7. <i>Morfología del Tallo de las Variedad</i> .....	41
Tabla 8 <i>Cantidad de Bagazo húmedo por variedad</i> .....	43
Tabla 9. <i>Rendimientos en Toneladas de Caña de Azúcar, Hojas Vedes, Bagazo</i> ....	44
Tabla 10. <i>Porcentaje de Humedad del Bagazo y Hojas</i> .....	47
Tabla 11. <i>Rendimientos en Toneladas Hojas Secas y Bagazo Seco</i> .....	48
Tabla 12. <i>Valor del Poder Calorífico Superior Seco</i> .....	49
Tabla 13. <i>Análisis Elemental del Porcentaje de N, C, H, S y O</i> .....	50
Tabla 14. <i>Análisis Proximal del Bagazo de Caña de Azúcar Correspondiente a los Porcentajes de Humedad, Material Volátil, Carbono Fijo y Cenizas</i> .....	51
Tabla 15. <i>Parámetros Estructurales de Bagazos de Cada Variedad de Caña de Azúcar</i> .....	54
Tabla 16. <i>Valor del Poder Calorífico Inferior Seco y Poder Calorífico Inferior Húmedo de las Tres Variedades de Caña de Azúcar</i> .....	56
Tabla 17. <i>Energía Obtenida por Combustión Directa del Bagazo</i> .....	57
Tabla 18. <i>Energía Eléctrica Producida por Combustión Directa del Bagazo Húmedo</i> .....	58
Tabla 19. <i>Producción de Bioetanol por Variedades e Ingreso Monetario</i> .....	59
Tabla 20. <i>Energía eléctrica producida e Ingreso Monetario</i> .....	60
Tabla 21. <i>Producción de Bioetanol por Variedad e Ingreso Monetario</i> .....	60

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. <i>Curvas de Tasa de Conversión Como Función de la Temperatura</i> .....	19
Figura 2. <i>Mapa Base de Geoposicionamiento del Ingenio Azucarero del Norte (IANCEM)</i> .....	23
Figura 3. <i>Delimitación del Área de 25m<sup>2</sup> con Ayuda de una Piola Roja y un Flexómetro</i> .....	25
Figura 4. <i>Medición del Largo y Diámetros del Tallo de la Caña de Azúcar</i> .....	26
Figura 5. <i>Medición del Largo y diámetros de la Hoja de la Caña de Azúcar</i> .....	26
Figura 6. <i>Cosecha y Separación Hojas y Tallos en las Parcelas</i> .....	27
Figura 7. <i>Cosecha y Separación Hojas y Tallos en las Parcelas</i> .....	28
Figura 8. <i>Obtención del Bagazo por Medio de un Trapiche</i> .....	29
Figura 9. <i>Muestras de Bagazo y Hojas</i> .....	30
Figura 10. <i>Muestras de Bagazo Trituradas</i> .....	31
Figura 11. <i>Muestra de Bagazo en el Crisol</i> .....	32
Figura 12. <i>Analizador Calorimétrico y Obtención de Datos</i> .....	33
Figura 13. <i>Crisol de la maquina Mettler Toledo para el análisis TGA</i> .....	34
Figura 14. <i>Maquina Analizadora TGA Marca Mettler Toledo</i> .....	35
Figura 15. <i>Curva de Secado de Bagazo y Hojas de Caña de Azúcar</i> .....	46
Figura 16. <i>Curva de Tasa de Conversión como Función de la Temperatura de las Variedades</i> .....	53

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y**  
**AMBIENTALES**  
**CARRERA DE INGENIERÍA EN ENERGÍAS RENOVABLES**

**CARACTERIZACIÓN DEL BAGAZO DE CAÑA DE AZÚCAR DE**  
**VARIEDADES DEL INGENIO AZUCARERO TABABUELA PARA**  
**BIOENERGÍA**

Ante proyecto del trabajo de titulación

Nombre del estudiante: Omar Napoleon Quinteros Vaca

**RESUMEN**

Existe una tendencia cada vez más creciente con respecto al uso de fuentes naturales renovables para producción de energía limpia, con el fin de mitigar los efectos del cambio climático. La presente investigación busca caracterizar el residuo de la caña de azúcar del Ingenio Azucarero Tababuela en Imbabura – Ecuador para producción de bioenergía. Se realizó una localización espacial de superficie cosechada (t/ha) de caña de azúcar con la información obtenida del Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG) y del ingenio azucarero. Se llevó a cabo una evaluación del potencial energético de la biomasa agro-residual mediante calorimetría, morfología y pesaje (t/ha), de las variedades más relevantes presentes en el ingenio azucarero. Tomando en cuenta el residuo agrícola (bagazo) de variedad se efectuó un análisis de forma elemental, estructural y proximal con el método termogravimétrico (TGA). Estos datos permiten analizar beneficios del uso de biomasa como cogeneración y biocombustible. Finalmente, se encontró que la variedad PR 980 tiene mayor ventaja para la producción de bioetanol por la concentración de hemicelulosa y celulosa, por otro lado, CB 40-69 sobrepasa a las demás en producción eléctrica por el poder calorífico superior seco y la baja cantidad de ceniza que posee.

Palabras clave:

Bagazo, poder calorífico, análisis TGA, bioetanol, lignocelulosa

# **CHARACTERIZATION OF THE SUGAR CANE BAGASSE FROM SPECIES OF THE INGENIO AZUCARERO TABABUELA FOR BIOENERGY**

## **ABSTRACT**

There is an increasing trend regarding the use of renewable natural sources for clean energy production, in order to mitigate the effects on climate change. The present study has the aim of characterizing the sugarcane residue (bagaze) from the Tababuela Sugar Mill in Imbabura - Ecuador for bioenergy production. A spatial distribution of harvesting area of sugarcane (ton/Ha) was carried out by using the data from the Ministry of Agriculture and Livestock (MAG). An evaluation of the energy potential of agro-residue biomass was conducted by calorimetry, morphology and weighing (dry ton / Ha), of the most relevant varieties present in the sugar mill. Considering the bagasse variety according to sugar cane crop, an elementary, structural and proximal analysis was experienced by means of thermogravimetric method (TGA). Finally, it was found that the PR 980 variety has a greater advantage for the production of bioethanol by the concentration of hemicellulose and cellulose, on the other hand, CB 40-69 surpasses the others in electrical production by the superior dry calorific value and the low amount of Ash he owns.

Key words: |  
Bagasse, calorific value, TGA analysis, bioethanol, lignocellulosa

## CAPÍTULO I

### INTRODUCCIÓN

En la actualidad se ha observado que las fuentes de energía renovable han experimentado un desarrollo masivo en los últimos años, gracias a la privatización, la desagregación del sector energético y el impulso de incentivos financieros e incluso las iniciativas de política energética (Andoni et al., 2019).

El Programa de las Naciones Unidas PNUD (2017), menciona que la producción de biocombustibles ayuda a sustituir derivados de petróleo, reducir las emisiones de CO<sub>2</sub>, a la vez que crea valor agregado y dinamiza la economía rural. Además, la bioenergía está aumentando, lo que ayuda a satisfacer la creciente demanda de energía en algunos países, además, contribuye a alcanzar objetivos ambientales (Renewable Energy Policy Network for the 21st century REN21, 2016).

Es así como la biomasa suple el 3% de la demanda mundial de energía según datos de la Agencia Internacional de Energía AIE (2018). En América latina alcanza un total de 10% según la Secretaria de Energía de México SENER (2016). Además, un caso en particular es Brasil, el cual posee una potencia instalada de 14 179 GW, la mayoría asociadas a la industria de la caña de azúcar y la valoración del bagazo (Energías Renovables, 2018).

Ecuador posee un total de 1.66% de bioenergía (Balance Nacional de Energía Eléctrica ARCONEL, 2020). Sin embargo, el Estado también ha lanzado un plan piloto de producción de gasolina mezclada al 5% con etanol denominado Ecopaís (E5), y actualmente cuenta con 43 estaciones de servicio en la ciudad de Guayaquil (Bravo y Bonilla, 2011). Al mismo tiempo, cuenta con la producción de biodiésel a partir de la palma africana, siendo esta exportada por completo, como también se fomenta la producción de aceite de Piñón en la provincia de Santa Elena, cuyo objetivo es reemplazar el combustible diésel por el aceite vegetal, para motores de combustión interna de generación eléctrica, constituyendo una alternativa de

energía renovable que contribuya con la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> según menciona la Corporación Eléctrica del Ecuador CELEC (2019).

Tomando en cuenta que el biocombustible procedente de la palma de aceite y piñón se considera como bioenergía de primera generación, la cual, presenta ciertas desventajas en especial con la competencia del uso de la tierra para la producción de alimentos, creando un vínculo difícil de manejar entre estas dos actividades (PNUD, 2017). Como también, es importante señalar que el desarrollo de los biocombustibles de segunda generación las cuales presentan ventajas con respecto de aquellos de primera generación, como el menor nivel de impactos ambientales, un mayor rendimiento en combustible o energía por hectárea, debido a que es posible aprovechar el total de la biomasa residual en suelos cultivados (Centro Boliviano de Estudios Multidisciplinarios CEBEM, 2008).

Con respecto a la biomasa de segunda generación, algunos estudios indican que el bioetanol fabricado a partir de la lignocelulosa presenta ventajas ambientales esenciales (CEBEM, 2008), dado que es un polímero natural que representa cerca del 50% de la biomasa del planeta, y se encuentra en residuos agrícolas (bagazo de caña de azúcar, rastrojo de maíz, paja de trigo, elotes de maíz, residuos de soya, cascarilla de arroz, entre otros) (Islas y Martínez, 2010), y tomando en cuenta que el bioetanol, se produce principalmente a partir de cultivos agrícolas, como la caña de azúcar, que es la fuente más atractiva porque contiene mono y disacáridos fermentables directamente por las levaduras (Mejías et al., 2016).

Considerando el caso de la caña de azúcar, la cual es una planta correspondiente al género *Saccharum* perteneciente a la familia de las gramíneas (Cardona et al., 2005), y sabiendo que los residuos de esta planta aplican tanto para la producción de electricidad como también de biocombustibles de segunda generación (etanol lignocelulósico, butanol, metanol, etc.) (Hernández et al., 2016), se ha demostrado que en el mundo el 20% de la bioenergía eléctrica mundial se produce con bagazo de caña de azúcar (Agencia Internacional para las Energías Renovables IRENA,

2016). Mientras que Ecuador cuenta con una potencia instalada, en el 2017, de 136 MW producidos a partir del residuo de dicho cultivo (IRENA, 2018).

En relación con el cultivo de caña de azúcar, en el Ecuador se obtiene según los datos del Ministerio de Agricultura y Ganadería MAG (2017) una producción de caña de azúcar de un total de 110 602.67 hectáreas de superficie cosechada. Parte de este cultivo se encuentra en la provincia de Imbabura, la cual cuenta con una producción total de 2 216.97 hectáreas, que podría ser un recurso potencial para la bioenergía derivada del bagazo, ya que según Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura FAO (2011), la estimulación de la producción de biocombustibles de segunda generación sería una mejor opción frente al uso de cultivos de primera generación por la problemática que este implica dentro del país.

Por último, según estudios realizados se estima que una hectárea de caña de azúcar produce un 34% de bagazo y un 35% de cachaza, según Instituto Nacional de Estadística y Geografía de México INEGI (2012). Donde una tonelada de bagazo con 50% de humedad tiene un poder calorífico de 7.64MJ/kg (Ramírez, 2008). Por lo que es considerado una fuente importante y confiable para la producción de energía.

## **1.2. Problema**

Se conoce que el causante más importante del desequilibrio ambiental es el consumo de combustibles fósiles a gran escala, llegando en el 2016 a un nivel de gasto mundial de petróleo de 33.3%, a la vez que el gas natural supone un 24.1% y la nuclear con 4.5% según informa el British Petroleum BP (2017). De igual manera, Ecuador usa energía de fuentes no renovables equivalentes a un 86.9% del total del aprovechamiento energético nacional (Banco Mundial, 2014), mostrando así que los recursos no renovables como fuente energética se encuentran con mayor presencia en el país que la proveniente de recursos renovables.



En consecuencia, sabiendo que la producción de CO<sub>2</sub> será proporcional al consumo de energía fósil; se entiende que en el caso del Ecuador se alcanza un total de 35.02 Mt (AIE, 2016) la cual conlleva a un grave impacto ambiental y por ende un descenso en la calidad de vida de las personas.

En el Ecuador el sector industrial gasta un total de 2 132 Ktoe y el sector transporte 5 575 Ktoe (AIE, 2018), Este último llama la atención por ser el sector con mayor uso de combustibles fósiles siendo también uno de los más contaminantes por emisiones de CO<sub>2</sub>.

FAO (2011) menciona que en Ecuador se trata de sustituir los combustibles convencionales, creando el Consejo Nacional de Biocombustibles en el 2004 donde entra el Plan Piloto de Guayaquil que busca conseguir la mezcla de 5% de bioetanol producido a partir de la caña de azúcar con gasolina y por otro lado el biodiésel, derivado del aceite crudo de palma africana, que se encuentra en estudio para concretar el Programa de Biodiésel. Lo que da a entender que no hay interés en el uso de biomasa de segunda generación para la fabricación de biocombustibles dirigidos al sector de transporte, pese a que no entran en conflicto con el espacio y la producción de alimentos.

CELEC (2016) también señala que los principales cultivos con potencial energético y mayor volumen de biomasa son los residuos de palma africana y el cacao, pero estos subproductos son tratados por un proceso de pirólisis dando como resultado un combustible sólido con mucho potencial energético denominado pellet, pudiendo usarse para calentar agua o cualquier actividad industrial que requiera calor o vapor, entre otros usos. Lo cual indica que, pese al gran consumo de combustibles líquidos derivados del petróleo, no se enfoca o utiliza los agro-residuos para la producción de bioetanol que podría sustituir progresivamente la gasolina.

Así mismo, la Corporación para la Investigación Energética CIE (2020), ha identificado en la amazonia ecuatoriana, un área aproximada de 5 000 hectáreas, de

propiedad de unas 300 familias, dentro de la cual se encuentran dispersas 800 hectáreas cultivadas con caña de azúcar y lo que se pretende es mejorar los cultivos e iniciar un proceso agroindustrial que permita explotar 400 hectáreas de caña para elaboración de azúcar orgánico y, en una segunda etapa, 400 hectáreas para producción de etanol. Pero igual que en los casos anteriores no se consideran el bagazo obtenido como una fuente confiable para la producción de bioetanol.

La producción de biocombustibles en Ecuador se enfoca principalmente en el uso de biomasa de primera generación como el aceite de palma africana y la caña de azúcar con el fin de sustituir los combustibles líquidos derivados del petróleo, pero a pesar de que la biomasa de segunda generación como son los agro-residuos, tienen claras ventajas, solo se las considera para la fabricación de pellets o la combustión directa y no como una alternativa para obtención de combustibles que sustituya la gasolina.

## **1.2. Justificación**

La presente investigación está enfocada al cambio de la matriz energética del Ecuador, además, también tiene como finalidad la implementación de nuevas alternativas energéticas para el crecimiento económico, social y la preservación ambiental dentro del país. Considerando a la biomasa de segunda generación como pilar importante para el logro de estas metas.

Tomando en cuenta que Ecuador es un país agrícola, en donde los residuos de cultivos pueden ser aprovechados como fuentes bioenergéticas que no representan un impacto en la soberanía y seguridad alimentaria, ni se consideran como un riesgo ambiental (García et al., 2013). Posicionando a la biomasa agro-residual como una fuente viable y que podría ser explotada desde el punto de vista de la sostenibilidad pues no implica la búsqueda de nuevas áreas para cultivo, ya que estas ya existen. Según Mejías et al. (2016) los residuos de las cosechas pueden ser utilizados para producción de bioenergía, que en muchos casos son quemados, como los provenientes de caña de azúcar, maíz y fréjol.

Tomando en cuenta que gran cantidad de biomasa se encuentran en los cultivos con mayor superficie cosechada y que, además, se debe de considerar las características de cada uno más allá del área de sembrío, por la razón de que cada residuo agrícola posee distintas características, por ejemplo, la caña de azúcar tiene una producción anual de 7.5 MMt dando un rendimiento 75.89 t/ha, mayor a cualquier cultivo en el Ecuador (MAG, 2018), colocando al bagazo de caña de azúcar, como una buena alternativa para el desarrollo de la bioenergía, promoviendo también el crecimiento económico juntamente con el desarrollo social y ambiental (Islas y Martínez, 2009).

En la provincia de Imbabura no existen estudios de caracterización de biomasa agro-residual relacionados a la caña de azúcar, a pesar de poseer extensas áreas de cultivo. Según MAG (2018) estipula que tiene una gran cantidad de producto agrícola con una superficie cosechada de 2 216.97 ha lo que la pone en el segundo lugar luego del maíz suave seco con un total de 4 185.48 ha. Es por ende vital realizar estudios y análisis que determine la cantidad de residuo agrario generado tras ser cosechado y procesado, pudiendo conseguir así, un resultado del potencial energético más reales.

La producción de energía que sea proveniente del uso de la biomasa de segunda generación, en específico de la obtenida de la caña de azúcar (bagazo) implica una gran oportunidad para nuevos enfoques eficientes en la industria energética del Ecuador, siendo también una alternativa sustentable para la sustitución de combustibles derivados del petróleo, permitiendo, por demás, un mejor desarrollo tecnológico y que impulse al adelanto industrial de la energía limpia.

Con este estudio se pretende promover el aumento de datos confiables que sean de un valor importante para futuras referencias de proyectos bioenergéticos que participen directamente en los procesos de mejoramiento de la calidad de vida a nivel nacional con la mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero como también en la mejora de procesos y tecnologías e incluso en la búsqueda de soluciones bioenergéticas para la demanda actual de combustibles y electricidad que cada día aumenta conforme la sociedad evoluciona.

### **1.3. Objetivos**

#### ***1.3.1. Objetivo general***

Caracterizar el bagazo de caña de azúcar de variedades del ingenio azucarero Tababuela para bioenergía

#### ***1.3.2. Objetivos específicos***

- Evaluar el potencial energético de la biomasa agro-residual de los cultivos de caña de azúcar, mediante calorimetría, morfología y pesaje.
- Analizar la biomasa agro-residual de caña de azúcar de la forma elemental, proximal y estructural.
- Comparar la generación de energía del uso del bagazo entre cogeneración y bioetanol del Ingenio Tababuela.

### **1.4. Pregunta directriz**

- ¿La materia prima (residuo de caña de azúcar) tiene características para transformarse en bioetanol que abastezca parte de la demanda de combustibles?

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

La revisión de literatura que se muestra a continuación es referida al tema de investigación. Se observan casos de estudio, métodos y técnicas que se han empleado para realizar el análisis de la biomasa agro-residual y que pueden usarse en la investigación de caña de azúcar.

#### **2.1. Biomasa**

Las plantas transforman la energía luminosa en energía química y retienen el dióxido de carbono para formar la biomasa (Romero, 2010). El término “biomasa” incluye toda la materia viva, o cuyo origen sea la materia viva, que existe en un instante de tiempo en la Tierra (López, 2002).

Se puede dar una clasificación a los cultivos que son denominados puramente energéticos como biomasa de primera generación; a los desechos agrícolas, forestales y subproductos son catalogados en biomasa de segunda generación y por último el estiércol o la biomasa microbiana es conocida como biomasa de tercera generación (FAO, 2013).

El Ecuador es un país de naturaleza agrícola, donde se puede encontrar grandes plantaciones de Plátano (en todas sus variedades), Palma Africana (Palma Aceitera), caña de azúcar, cacao, arroz, maíz, entre otros (CIE, 2019). Los cuales, luego de ser aprovechados generan una gran cantidad de residuos de materia orgánica, que es desechada en su mayoría, a pesar del importante potencial energético que poseen, según menciona CELEC (2016).

En el pasado, el principal uso directo que se le daba a la biomasa era para cocción de alimentos, calefacción, hacer cerámica, producir metales y, posteriormente, para alimentar las máquinas de vapor (Empresa Provincial de Energía de Córdoba EPEC, 2019).

## **2.2. Bioenergía**

Se entiende por Biomasa, en términos energéticos, un combustible procedente de productos y residuos naturales, tales como los que provienen de la agricultura (incluyendo tanto sustancias vegetales y animales), los resultantes de la actividad forestal e industrias ligadas al bosque, y la fracción biodegradable de los residuos industriales y urbanos (Vignote, 2016).

La energía que se puede obtener de la biomasa viene de la luz solar, la cual, gracias al proceso de fotosíntesis, que es aprovechada por las plantas verdes mediante reacciones químicas en las células, las que toman CO<sub>2</sub> del aire y lo transforman en sustancias orgánicas, según una reacción del tipo: CO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>O (H-COH) + O<sub>2</sub> (EB, 2008).

El uso integral de los residuos agrícolas con fines energéticos representa una oportunidad para mejorar la situación socioeconómica de las áreas rurales de Ecuador, además, una mayor participación de las energías renovables que pueden ser una alternativa fundamental para diversificar la matriz energética del país (CELEC, 2016).

## **2.3. Biocombustibles**

Los biocombustibles son aquellos que se obtienen de la biomasa, siendo los biocombustibles como el alcohol, éteres, ésteres y otros productos químicos que resultan de los compuestos orgánicos de base celulósica extraídas de plantas silvestres o de cultivos, que sustituyen en mayor o menor parte el uso de la gasolina en el transporte o ya sean destinados a la producción de electricidad (Salinas y Gasca, 2009).

En Ecuador, según Castro (2012) existe un plan piloto Ecopaís, en la ciudad de Guayaquil, que se lanzó el 12 de enero de 2011 y su objetivo es comercializar un nuevo combustible denominado Ecopaís, mezcla de 95% gasolina extra y 5% de

etanol anhídrido y en el caso de biodiésel, existe desde mayo de 2010 una planta piloto de la Universidad Católica del Ecuador que produce 100 litros cada seis horas en la ciudad de Ibarra.

### **2.3.1 Bioetanol**

Es producido por la fermentación de los azúcares contenidos en la materia orgánica de las plantas, de donde se obtiene alcohol hidratado con un contenido aproximado de un 5% de agua, que tras ser deshidratado se puede utilizar como un biocombustible (García y García, 2006).

Países como Estados Unidos y Brasil han tomado la bandera en la producción de etanol a partir de fuentes alimenticias, tales como maíz y caña de azúcar, con 6 498.6 y 5 019.2 millones de galones (González et al., 2008). De igual manera, la paja de arroz es uno de los materiales de desecho lignocelulósicos más extendido en el mundo (Karnataka, 2007).

## **2.4. Cogeneración**

La cogeneración es el proceso de producción energética combinada a partir de una única fuente de combustible, por ejemplo, la producción de energía térmica y eléctrica a partir del gas natural (Llerena, 2018). La idea básica es aumentar el rendimiento global integrando los dos sistemas energéticos, como resultado, el sistema combinado entrega una mayor eficiencia y menores costos que solo realizando la operación de cada recurso energético por separado (Calle y Ulloa, 2008).

El uso de un combustible alternativo a los de fuentes fósiles disminuye los niveles de contaminación y contribuye al ahorro energético ya que en una termoeléctrica convencional, de un 100% de energía contenida en un combustible solo el 33% se convierte en energía eléctrica, el resto se pierde, mientras que en los sistemas de cogeneración se aprovecha el 84% de la energía contenida en el combustible para

la generación de energía eléctrica y calor para otros procesos dentro del sistema (25-30% eléctrico y 59%-54% térmico) (Becerra et al., 2016).

En Ecuador la Unidad de Negocio está empeñada en la búsqueda de mayor eficiencia energética de los combustibles y en los procesos de investigación del INER (Instituto de Investigación Geológico y Energético) para producir el mayor rendimiento de energía ya que es de mucha importancia, es así que, en la fase de cooperación, las dos instituciones buscan implementar el Prototipo de Planta de Cogeneración – ORC en los motores de la Central Termoeléctrica Quevedo para obtener una mayor eficiencia térmica en las plantas de generación (CELEC, 2017)

## **2.5. Hidrólisis Enzimática**

La hidrólisis enzimática es un método que permite descomponer la lignocelulosa en azúcares fermentables de una planta (Yang et al., 2011). La principal ventaja del proceso enzimático radica en la no formación de subproductos y la reducción en la demanda energética del proceso ya que no requiere usar grandes presiones ni elevadas temperaturas (Castaño y Mejía, 2008).

Para Viñals et al. (2012) en los materiales lignocelulósicos, la celulosa debe ser primero convertida a azúcares simples por hidrólisis y entonces fermentada para la producción de etanol, debido a esto, la materia prima lignocelulósica debe ser procesada.

Duarte (2008) menciona que la desventaja de la hidrólisis enzimática de celulosa es debido a la asociación de esta con la cantidad de lignina que constituye una barrera física a la penetración de los enzimas. Otros factores que perjudican a esta técnica de proceso como el área superficial accesible, la cristalinidad de la celulosa, el grado de polimerización y el contenido en lignina y hemicelulosa dificultan la accesibilidad de las celulosas reduciendo la eficiencia del proceso de la hidrólisis (Almenares et al., 2011).



## **2.6. Lignocelulosa**

Se sabe que la celulosa, hemicelulosa y lignina, en combinación se la conoce como lignocelulosa, la cual llega a constituir aproximadamente un valor del 50% del material producido por la fotosíntesis, y es el más abundante recurso orgánico renovable en la Tierra (Vargas et al., 2012). Anualmente se forman 200 000 millones de toneladas en el mundo (Cuervo et al., 2009).

En lo que a la composición respecta, el componente polisacárido comprende carbohidratos de alto peso molecular (celulosa y hemicelulosa), que representan entre el 60 y el 80 % del peso total de los materiales lignocelulósicos (Almenares y Serrat, 2008).

Este tipo de biomasa es una importante fuente de energía renovable con potencial en la producción de biocombustibles, cogeneración de energía eléctrica y generación de compuestos químicos, algunos de estos energéticos, entre otras aplicaciones (Castro, 2014).

### **2.6.1. Celulosa**

La celulosa es el principal componente de las paredes celulares de las plantas, es un polisacárido  $(C_6H_{10}O_5)_n$  formado por moléculas de cadenas lineales de  $\beta(1.4)$ -D-glucopiranosas, siendo así el polímero más abundante de la naturaleza (Jiménez et al., 2017).

La celulosa se puede considerar como un material compuesto, construido a partir de microfibrillas a escala nanométrica, los estudios recientes que utilizan técnicas de figura avanzadas, como la microscopía de fuerza atómica (FAM), que han revelado mediciones precisas y una estructura detallada de la superficie de la celulosa en las etapas nativas (Yang et al., 2011).

### **2.6.2. Hemicelulosa**

Este compuesto de la biomasa llega a ser el segundo polisacárido más abundante en la pared celular vegetal, ya que este puede llegar a comprender un total de 30 hasta un 35% del total del peso seco de la pared celular que poseen los vegetales de forma natural (Sousa et al., 2010).

### **2.6.3. Lignina**

La lignina se considera como uno de los constituyentes básicos de la materia vegetal presentes en la naturaleza y cuyo contenido presente en las plantas es variable según la especie que sea; no obstante, se puede considerar que los materiales lignocelulósicos están constituidos por aproximadamente un 25% de lignina (Bedia et al., 2009).

## **2.7. Morfología**

La morfología de la caña de azúcar permite distinguir e identificar las variedades que existen; también relacionarlas con comportamientos en rendimientos y adaptabilidad, considerando las hojas y tallos (Sáenz, 2013). Cada una de las partes se analizan en forma separada; sin embargo, es necesario anotar que están interrelacionadas y, consecuentemente, deben ser concebidas en conjunto (Subirós, 2000).

## **2.8. Variedades de Caña de Azúcar (IANCEM)**

Según el Ingenio Azucarero del Norte Compañía de Economía Mixta IANCEM (2016) existen ocho variedades de caña de azúcar destinadas para la producción continua de azúcar y que son cultivadas en la propiedad privada de la empresa como también en convenio con agricultores particulares. La tabla 1 muestra la cantidad de hectáreas cosechadas por cada variedad, observando también que cuatro de estas sobresalen de las demás, siendo estas Puerto-Rico 980 (PR 980), Cenicaña 85-92 (CC 85-92), Campo-Brasil (CB 40-69) y Puerto-Rico 61-632 (PR 61-632).

**Tabla 1**

*Hectáreas Cosechadas por Variedad en IANCEM*

Variedades	Área [ha]
CB 40-69	644.18
CC 85-92	304.59
CC 93-4181	0.85
EC-02	1.5
PR 10-16	2.06
PR 61-632	390.02
PR 980	2373.63
RD 75-11	9.92
Total	3726.75

*Nota.* IANCEM (2016)

**2.8.1. Variedad PR 980**

Originaria de Puerto Rico considera una variedad promisoría con buen comportamiento agronómico y alto rendimiento, se adapta a suelos de ligeros a pesados, tolerante a sequías y es proveniente de la combinación de dos variedades Co 281 y P.O.J. 2878 (Ranjel y Londoño, 1976).

**2.8.2. Variedad CC 85-92**

Presenta un buen desempeño en el corte, en la extracción de jugos en el molino y en el proceso de fabricación de la panela; esta variedad fue producida por Cenicaña, Valle del Cauca, Colombia a partir de la cruce de Co 775 y CP 52-68 (Ramírez et al., 2014).

El tallo es largo, levemente decumbente, disposición de entrenudo en zigzag suave, cilíndrico, con longitud de 13-16 cm y diámetro de 30-32 mm (Tique, 2015). La

tabla 2 muestra características de la planta como la altura, diámetro del tallo, toneladas de caña por hectárea y el bagazo producido.

**Tabla 2**

*Características Agronómicas y Parámetros de Identificación CC 85-92*

Altura de la planta [m]	Diámetro del tallo [mm]	Caña [T/ha]	hojas verdes [T/ha]	Bagazo [T/ha]
2.21	28.6	117.46	24.9	53.58

*Nota.* Ramírez et al. (2014)

### **2.8.3. Variedad CB 40-69**

Esta variedad de caña de azúcar es importante porque tienen características particulares con respecto a la adaptación climática y resistencia del suelo a plagas y enfermedades y con respecto a la cantidad de sacarosa producida; en 1974 y 1975, la variedad CB 40-69 estuvo entre las quince variedades principales de caña de azúcar cultivadas en Brasil (Secalla y Olivera, 1963). La tabla 3 muestra las características que posee, en términos de altura, diámetro del tallo y producción de caña por hectárea.

**Tabla 3**

*Características de la Variedad CB 40-69*

Características	Valor	Fuente
Altura de la planta [m]	1.37	(Dariva et al., 1986)
Diámetro del tallo [mm]	25.1	(Dariva et al., 1987)
Caña [T/ha]	108-109-132	(Dariva et al., 1988) (Queiroz, 1959) (Secalla y Olivera, 1967)

## **2.9. Muestreo**

Para la toma de muestras para el caso de los agro-residuos, es fundamental primero conocer que cantidad de biomasa del cultivo se considera como residuo y continuar con el proceso de recolección que está compuesto por operaciones independientes teniendo en cuenta diferentes opciones tecnológicas ya que, la combinación de cada una de ellas en las distintas fases nos dará una posible variante en el proceso de recolección (Velásquez et al., 2011).

Las muestras pueden ser sometidas a métodos de secado al horno a una temperatura de 105°C donde se realizan mediciones diarias de tiempo hasta lograr que el peso de las muestras se estabilice obteniendo así el valor de peso seco del agro residuo que se está estudiando (Velásquez et al., 2011).

## **2.10. Calorimetría**

Los estudios de biomasa sometidos a el método de análisis calorimétrico se realizan tomando una porción pesada de la muestra para el análisis del biocombustible sólido, la cual se quema con una presión alta de oxígeno en una bomba calorimétrica a condiciones especificadas (Comité Europeo de Normalización CEN, 2009). Para ello, se toma tres muestras de biomasa de cada densidad de cultivo en cada sitio de ensayo de 100 g cada uno, las cuales son previamente secadas en estufa (105°C) hasta el peso constante y luego se trituran en un molino hasta un tamaño de al menos 0.2 mm (Muñoz et al., 2016).

Para la determinación del poder calorífico superior (PCS) se utiliza muestras de al menos 1 g estabilizada al aire, posteriormente son combustionadas con exceso de oxígeno en una bomba calorimétrica, modelo PARR6400 (Muñoz et al., 2016). Según Macías et al. (2014) determinó un poder calorífico de 17.30 MJ/kg, de igual manera para Rueda y Tannous (2017) que encontraron un poder calorífico de 17.43 MJ/kg para el bagazo de caña de azúcar.

## **2.11. Caracterización Térmica TGA**

El análisis TGA (por sus siglas en inglés Thermogravimetric Analyzer), permite evidenciar la pérdida de masa con respecto a un aumento de temperatura durante un determinado tiempo, este análisis se realiza por medio del equipo de referencia SDTA851e (Fonseca, 2017).

La caracterización térmica permite cuantificar la energía liberada en los procesos de combustión de la materia para el cálculo del potencial energético y de la densidad de energética de la biomasa residual (Muñoz et al., 2014). Se usa también para caracterizar las propiedades físicas y químicas de los materiales, en función de la temperatura en una atmósfera controlada de forma precisa ya que proporciona información valiosa para el control de calidad, el desarrollo y la investigación (METTLER TOLEDO, 2020).

Es conocido como una técnica comúnmente utilizada para estudiar la relación de descomposición de biomasa, la determinación de las características de la volatilización y los parámetros cinéticos, tales como la energía de activación y el factor pre-exponencial, así como la influencia de la temperatura y velocidad de calentamiento en el desarrollo de las reacciones de descomposición térmica y los mecanismos de reacción (Manals et al., 2011).

Para realizar el análisis TGA un estudio de maíz, se emplean tres rampas de calentamiento diferentes, las cuales son: 5, 10 y 20 °C min<sup>-1</sup>; con un rango de temperatura de 0 a 800°C y se realiza en atmósfera oxidante con flujo de 30 mL min<sup>-1</sup>; una vez es calibrado el equipo se coloca la biomasa en la micro balanza del equipo (Fonseca et al., 2017).

### ***2.11.1. Análisis Proximal***

El análisis proximal presenta la composición química de la biomasa en términos globales como la humedad, material volátil, contenido de ceniza y carbón fijo

(Montoya et al., 2014). Por lo tanto, considerando a los tres componentes de la lignocelulosa están fuertemente unidos por enlaces covalentes y redes (Vargas et al., 2012).

Usando esta técnica Neri (2002) ha obtenido los resultados que se muestran en la tabla 4. Al mismo tiempo, la biomasa con mayor cantidad de ceniza es la que presenta menor contenido energético, como también un menor valor del poder calorífico superior e inferior (Rueda y Tannous 2017)

**Tabla 4**

*Análisis Proximal del Bagazo de Caña de Azúcar con*

Componentes químicos	Cantidad [%]
Humedad	4.42
Material volátil	81.66
Carbón fijo	8.82
Ceniza (tp<420, 420<tp<840. tp>840)	(8.00, 5.10, 2.94)

*Nota.* Neri (2002)

Otros estudios muestran diferentes resultados del análisis proximal. Para Cutimbo (2017) los datos que obtuvo por medio de este método son: humedad con el 6.36%, la cantidad de ceniza es de 3,87%, los materiales volátiles con un total de 83.80% y el carbono fijo de un 16.20%.

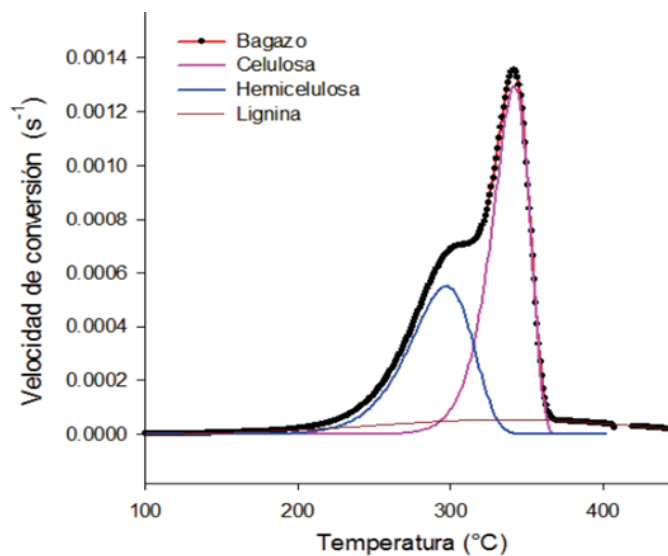
### ***2.11.2. Análisis Estructural***

Puede ser útil en la determinación del higher heating value (HHV) o en español valor calórico alto (Vargas et al., 2012). Según Prabakaran (2017) con esta técnica determino que la hemicelulosa es 20%-25%, Celulosa es de 45%-55%, y la lignina de 18%-24%.

Por otra parte, los parámetros de la desintegración térmica, comienza con la descomposición de la hemicelulosa que se llevó a cabo entre 200 y 400 °C, de la celulosa entre 300 y 410 °C, y la lignina desde 400°C hasta 800 °C referidos al caso del bagazo de caña de azúcar (Rueda y Tannous, 2017). En la figura 1 se muestra un modelo de curvas de tasa de conversión como función de la temperatura para la hemicelulosa, celulosa y lignina.

**Figura 1**

*Curvas de Tasa de Conversión Como Función de la Temperatura*



*Nota.* Adaptado de *Composición del bagazo de caña por análisis termogravimétrico*, por J. Solorza et al., 2013, ([https://www.researchgate.net/publication/258848531\\_Composicion\\_del\\_bagazo\\_de\\_cana\\_por\\_analisis\\_termogravimetrico](https://www.researchgate.net/publication/258848531_Composicion_del_bagazo_de_cana_por_analisis_termogravimetrico))

## 2.12. Análisis Elemental

Este análisis permite conocer la composición elemental de un combustible de biomasa como el carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno (C-H-O-N). Tomando



en cuenta que estas propiedades varían en dependencia del material que se esté analizando por el método en cuestión (Manals et al., 2015).

Para Cutimbo (2017) con el análisis elemental obtuvo resultados que indican el bajo contenido de azufre y nitrógeno (<1%) de las muestras, lo cual es una ventaja de estos materiales para el proceso de combustión por la baja emisión de NO<sub>x</sub> y SO<sub>x</sub>, en la combustión de carbono mezclado con bagazo. En el caso de estudio de Rueda y Tannous (2017) obtuvieron por medio de esta técnica cantidades de C de 45.78%, H de 5.72%, N de 0.44% y O de 48.06% para el bagazo de caña azúcar.

### **2.13. Espectroscopía de Infrarrojo Cercano NIR**

La espectroscopia de infrarrojo cercano NIR (o en inglés Near Infrared Spectroscopy) es un método de análisis rápido cuyas aplicaciones se han hecho en forraje como también se han informado recientemente resultados exitosos para el análisis de composición de materiales vegetales (Huang et al., 2011).

El método se usa con frecuencia para la predicción rápida y confiable de parámetros de calidad en plantas, alimentos, animales y productos farmacéuticos, de igual forma para la determinación de componentes de la pared celular de la planta, como hemicelulosa, celulosa y lignina (Jin et al., 2017).

En general, los modelos basados en los espectros característicos para componentes lignocelulósicos podrían usarse para desarrollar un instrumento simple, de bajo costo y eficiente para maximizar la eficiencia de convertir la materia prima a combustibles líquidos y / o bioproductos (Jin et al., 2017).

Últimamente, la espectroscopía de infrarrojo cercano (NIR) ha sido reconocida como una de las técnicas más prometedoras para la predicción de las propiedades físicas y químicas de los materiales en masa, debido a la preparación de muestras potente, rápida, no destructiva, simple y buena reproducibilidad (Li et al., 2015).

## 2.2. Marco Legal

Para el presente casos de investigación se hace referencias a ciertos artículos estipulados en la constitución del Ecuador como apoyo para lograr el enfoque académico que tiene este estudio con miras de un desarrollo más sustentable y diversificación de la matriz energética nacional. A continuación, se muestran los reglamentos y normativas legales.

Constitución de la República del Ecuador, publicada en el registro oficial en octubre del año 2008 (Política pública energética).

“**Art. 14.** El Estado reconoce el derecho de la población a vivir en un ambiente sano y ecológicamente equilibrado, que garantice la sostenibilidad y el buen vivir, *sumak kawsay*.”

“**Art. 313.** El estado se reserva el derecho de administrar, regular, controlar y gestionar los sectores energéticos, de conformidad con los principios de sostenibilidad ambiental, precaución, prevención y eficiencia.”

“**Art. 413.** El Estado promoverá la eficiencia energética, el desarrollo y uso de prácticas y tecnologías ambientalmente limpias y sanas, así como energías renovables, diversificadas, de bajo impacto que no pongan en riesgo la soberanía alimentaria, el equilibrio ecológico de los ecosistemas ni el derecho del agua.”

“**Art. 414.** El Estado adoptará medidas adecuadas y transversales para la mitigación del cambio climático, mediante la limitación de las emisiones de gases de efecto invernadero, de la deforestación y de la contaminación atmosférica; tomará medidas para la conservación de los bosques y la vegetación, y protegerá a la población en riesgo.”

## **Decreto ejecutivo N°. 1831: 10 de julio 2009**

“Transfiéranse todas las competencias que, en materia de coordinación para la producción, distribución y comercialización, posean las instituciones de la administración pública central e institucional, al ministerio de la Coordinación de la Producción, Competitividad y Comercialización, con el objeto de facilitar el cumplimiento de los planes, programas y proyectos que las instituciones competentes lleven a cabo para implementar una política de bicomcombustibles que coayuden a la política de diversificar la matriz energética, con apego a la Constitución y a la ley.”

## **Plan Nacional del Desarrollo 2017-2021. Toda una vida**

Objetivo 3: Garantizar los derechos de la naturaleza para las actuales y futuras generaciones

Insistencia en la investigación pública para consolidar y ampliar la matriz energética basada en energías renovables y otras no convencionales, con esquema tarifario de incentivos al sector privado y asociativo.

### *Políticas*

“3.4 Promover buenas prácticas que aporte a la reducción de contaminación, la conservación, la mitigación y la adaptación a los efectos del cambio climático, e impulsar las mismas en el ámbito global.”

“3.5 Impulsar la economía urbana y rural, basada en uso de sostenible y agregador de valor de recursos renovables, propiciando a la corresponsabilidad social y el desarrollo de la bioeconomía.”

## CAPÍTULO III

### METODOLOGÍA

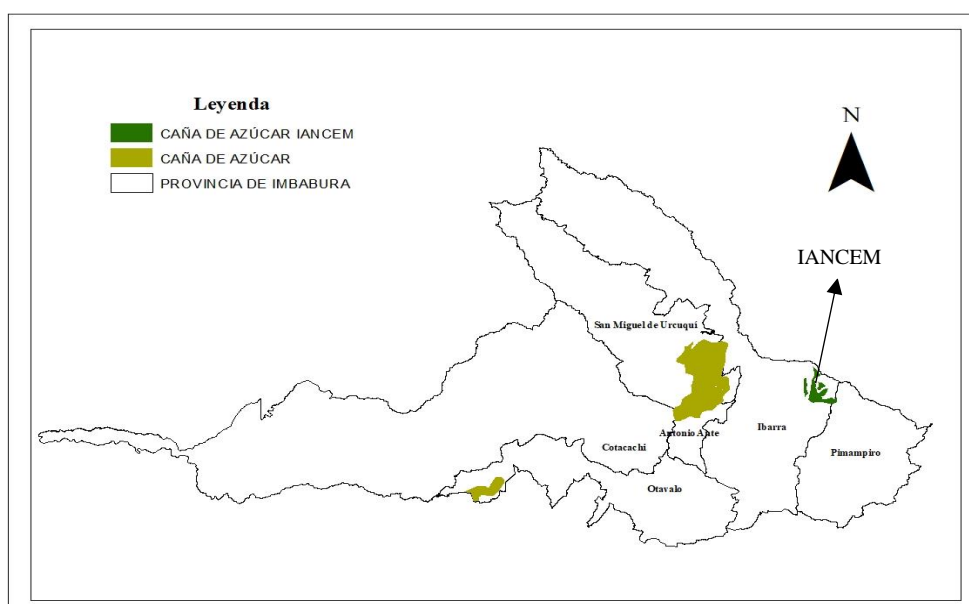
En el presente estudio, se muestra la metodología seguida para el cumplimiento de los objetivos planteados. En cada caso se detallan los pasos que se llevan a cabo. Los procesos fueron basados en investigaciones de caracterización de biomasa agro-residual, adecuándolas para la investigación que se realizó.

#### 3.1 Descripción del Área de Estudio

El área de estudio está en los terrenos de cultivo del Ingenio Azucarero IANCEM, ubicado en Tababuela a la orilla izquierda del río Chota, de la parroquia de Ambuquí cantón Ibarra de la provincia de Imbabura-Ecuador, según el Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal de San Miguel de Ibarra (GAD-I) (2019). Las coordenadas geográficas del ingenio son: latitud  $00^{\circ}28'56''$  N y longitud  $078^{\circ}05'44''$  W a 1520 m.s.n.m. (IANCEM, 2012). La figura 2 muestra un mapa geográfico.

**Figura 2**

*Mapa Base de Geoposicionamiento del Ingenio Azucarero del Norte (IANCEM)*



## 3.2 Métodos

En la presente investigación de biomasa agro-residual de la caña de azúcar, se tomó a las variedades con mayor superficie cosechada del ingenio azucarero, estas son PR 980, CC 85-92 y, CB 40-69, dejando de lado la variedad PR 61-632, ya que en el momento en que se realizó el estudio no se contaba con cultivos maduros y próximos a ser cosechados por el ingenio azucarero.

### *3.2.1 Evaluación del Potencial Energético de la Biomasa Agro-residual de los Cultivos de Caña de Azúcar, Mediante Calorimetría, Morfología y Pesaje.*

#### **Delimitación del Área de Estudio.**

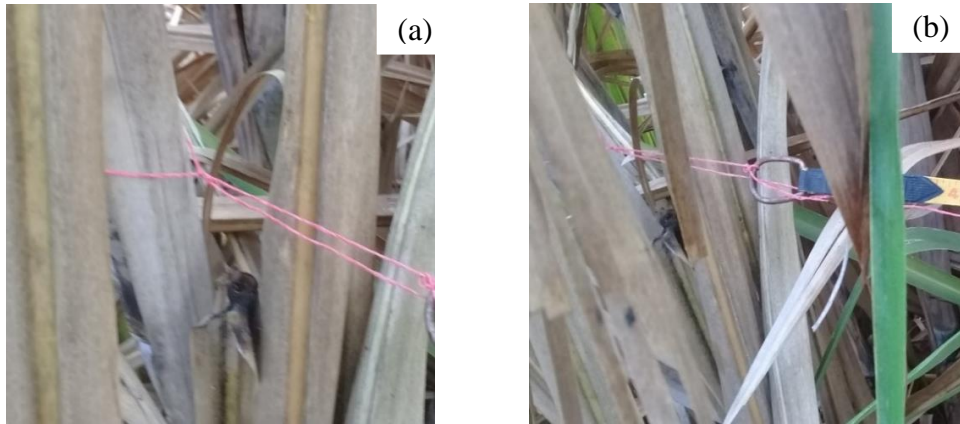
Tomando en cuenta el diseño experimental de Cofre (2016) el cual consistió en delimitar tres áreas de 10 m<sup>2</sup> para proceder con el levantamiento de datos, sin embargo, en este caso de estudio de biomasa de caña de azúcar se realizó la selección de tres parcelas de 25 m<sup>2</sup> para una obtención de un mayor rango de datos que permitan un mejor resultado.

No hubo un orden determinado para elegir cada parcela ya que fueron ubicadas al azar dentro del terreno de cultivo sin tomar en consideración las condiciones del terreno o del cultivo como es la topografía del lugar, el tamaño de la caña de azúcar y la cercanía entre sí, etc. El mismo proceso se realizó para cada una de las variedades.

Par la delimitación del área de estudio, se procedió, en primer lugar, con la fijación de una estaca como punto de partida y guía para precisar las demás a una distancia de cinco metros hasta formar un cuadro casi perfecto, dibujado por una piola roja, la misma que fue puesta de manera en que se pueda visualizar con facilidad. Para la medición exacta de punto a punto, se consiguió con el uso de un flexómetro, como se aprecia en la figura 3.

### Figura 3

*Delimitación del Área de 25m<sup>2</sup> con Ayuda de una Piola Roja y un Flexómetro*



*Nota.* La figura 3(a) muestra la colocación de la piola roja, mientras que en la figura 3(b) se observa la medición con el flexómetro.

### **Morfología.**

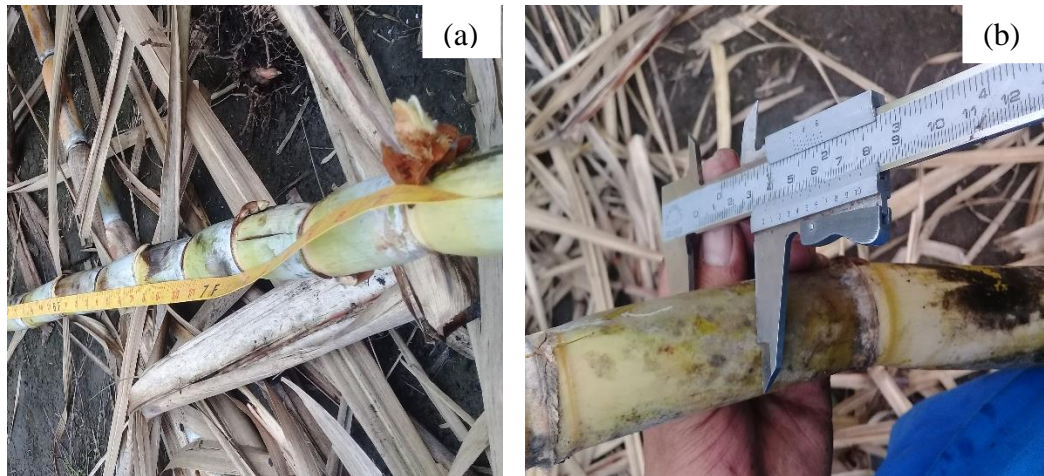
Con los datos obtenidos del análisis de morfología se pretende distinguir e identificar las diferencias que existe entre las variedades de caña de azúcar que se estudiaron; como también lograr relacionarlas con los comportamientos en rendimientos y adaptabilidad, considerando las hojas y tallos (Sáenz, 2013).

El estudio de morfología se efectuó tomado 10 plantas de cada parcela, las cuales sirvieron para realizar las mediciones del largo y anchos tanto de los tallos como también de las hojas de la caña de azúcar de cada variedad. Este proceso se llevó por medio del uso de un pie de rey y un flexómetro.

Las medidas del tallo se tomaron en primer lugar con un flexómetro midiendo la longitud desde la punta hasta la base de la planta, seguidamente las dimensiones de los diámetros del tallo se obtuvieron colocando el pie de rey en la base, luego se realizó lo mismo en la mitad y por último se midió en la punta. Los datos ingresados en Excel (Anexo 1) permitieron obtener los promedios de longitud y ancho de cada variedad.

## Figura 4

### *Medición del Largo y Diámetros del Tallo de la Caña de Azúcar*



*Nota.* La figura 4(a) muestra la medición con flexómetro el largo del tallo y la figura 4(b) representa la medición de los diámetros del tallo.

De igual manera se tomaron tres hojas de cada uno de los 10 tallos para el estudio morfológico, para lo cual, se usa el flexómetro par las mediciones del largo, pero a diferencia que el tallo, la medición del ancho de la parte baja, media y punta son hechas por el mismo instrumento, como se puede mirar en la figura 5. Finalmente, se realizó un conteo de la cantidad de hojas que posee cada planta de caña de azúcar para obtener el promedio de hojas por tallo de cada variedad.

## Figura 5

### *Medición del Largo y diámetros de la Hoja de la Caña de Azúcar*





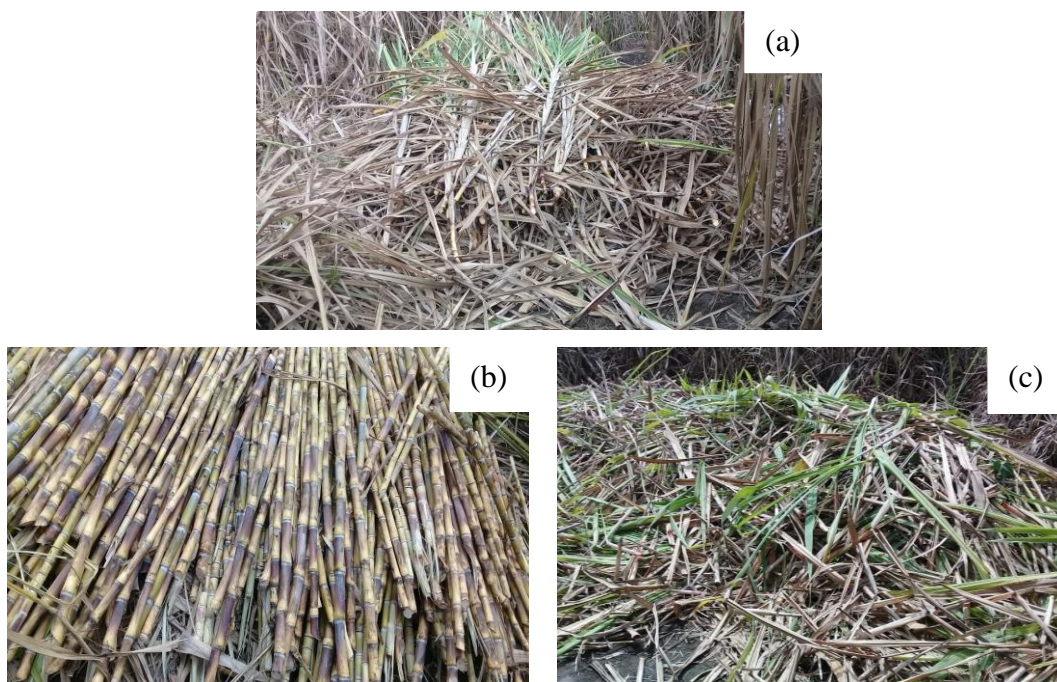
## Cosecha de la Caña de Azúcar.

La remoción de toda la biomasa presente en las parcelas se consiguió basándose en el método directo de Cofre (2016) el cual consiste en cosechar toda la cobertura vegetal existente dentro de las tres áreas del estudio. Este proceso se realizó con el uso de un machete y guantes de cuero para protección.

En primer lugar, se procedió a realizar la remoción de todas las plantas de caña de azúcar cuidando de hacer cortes precisos en la base del tallo para luego ser colocadas cuidadosamente en un espacio apartado. Por último, se continúa con la separación de hojas y tallos como se aprecia en la figura 6.

### Figura 6

#### *Cosecha y Separación Hojas y Tallos en las Parcelas*



*Nota.* La figura 6 (a) corresponde a la cosecha la caña de azúcar presente en las parcelas, en la figura 6 (b) se muestra la colocación de los tallos a parte de las hojas y por último la figura 6 (c) ilustra la distribución de las hojas en un lugar apartado del resto de biomasa.



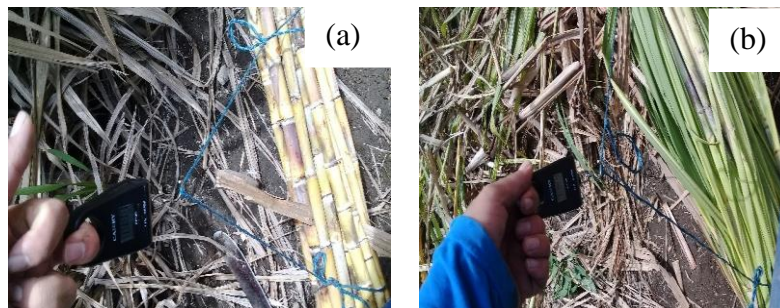
### **Pesaje de Tallos y Hojas.**

El proceso de pesaje de cada uno de los componentes (tallos y hojas) que previamente fueron separados, se realizó con el uso de una piola colocada a manera de una polea y con una balanza digital con capacidad máxima de 20 Kg como se muestra en la figura 7.

En un inicio se toma los tallos de caña de azúcar y se colocan uno sobre otro, el mismo proceso se llevó con las hojas, a continuación, se atan cuidadosamente con la piola para luego ponerlas en la balanza y obtener el peso. El proceso se lleva a cabo hasta terminar de pesar toda la biomasa presente en cada parcela. Estos datos fueron posteriormente tabulados en Excel para cuantificar la producción promedio por hectárea de cada variedad (Anexo 9).

### **Figura 7**

*Pesaje de la Biomasa De Caña de Azúcar*



*Nota.* Se aprecia en las imágenes 7 (a) y 7 (b) el proceso de pesaje de cada uno de los componentes (tallos y hojas).

### **Obtención del Bagazo.**

Emulando el procedimiento de obtención de grados brix por parte del ingenio azucarero (IANCEM, 2016) donde toman cinco muestras de tallos de un kilogramo cada una para extraer el jugo por medio de una prensa hidráulica, sin embargo, en este estudio se tomó 5 kg de muestras de tallos de caña de azúcar de cada una de las

parcelas para luego ser llevados a un trapiche para la obtención del jugo (figura 8), seguidamente se pesa con la balanza digital de mano la biomasa una vez culminado el proceso de extracción. Por último, se tabula la información para encontrar el porcentaje bagazo residual por variedad (Anexo 13). De este bagazo resultante se tomaron muestras de un kilogramo para los estudios en el laboratorio. Este proceso fue hecho en cada una de las variedades.

### **Figura 8**

*Obtención del Bagazo por Medio de un Trapiche*



### **Secado por Estufa.**

Como se ha ido mencionando a lo largo de la investigación, en las zonas de cultivo de las variedades de caña de azúcar donde se delimito tres parcelas distribuidas al azar para realizar los estudios pertinentes y además se tomó cinco kilogramos de tallos para la recolectar el bagazo lo que significa que hay tres muestras de bagazo cada una con un kilogramo de peso para hacer el análisis de secado, por cada variedad, en el Laboratorio de Investigaciones Ambientales (LABINAM) de la universidad Técnica del Norte (UTN) de la ciudad de Ibarra en Ecuador. En el caso de las hojas, también fueron tomadas muestras de un kilogramo por parcela y de igual manera fueron llevados al mismo laboratorio.

A continuación, por una muestra de bagazo y hojas recolectados de cada una de las tres parcelas se obtiene tres ensayos, lo que da por resultado un total de nueve pruebas para el bagazo y nueve pruebas para las hojas verdes sometidas al secado

por estufa, para cada una de las variedades con el fin de obtener un resultado más relevante y acertado.

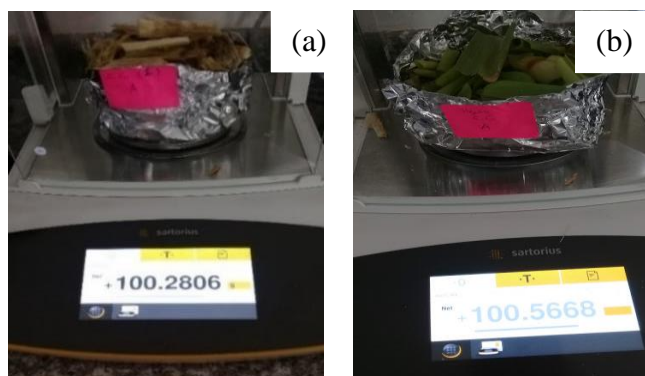
El método de secado se basó en la técnica empleada por Muñoz et al. (2016) donde se tomaron tres muestras de biomasa de cada densidad de cultivo por cada uno de los sitios de ensayo de 100 g, para luego ser introducidos en una estufa a 105°C hasta que se sequen por completo.

El proceso de secado por estufa se efectuó tomando mediciones de peso cada dos horas con el objetivo de determinar el tiempo requerido para estabilizar la muestra en las condiciones antes mencionadas (Anexo 10) y de esta manera proceder con la realización de la curva de secado de cada componente (bagazo y hojas) para cada una de las variedades de caña de azúcar. En la figura 9 se constata la preparación de muestras.

Los materiales que se utilizaron fueron papel aluminio con el cual se construyó pequeños embaces necesarios para la colocación de las muestras de bagazo, y hojas percatándose de que sean resistentes y prácticos a la hora de ser manipulados (figura 9). Con una balanza digital se obtuvo el peso exacto de 100 g, y con el uso de guantes para horno se permitió tomar las muestras directamente de la estufa Memmert sin sufrir quemaduras.

## Figura 9

### *Muestras de Bagazo y Hojas*



*Nota.* En la figura 9 (a) y 9 (b) se representa el peso inicial obtenido por medio de la balanza digital de tallos y hojas.

### **Trituración.**

Emulando a Muñoz et al. (2016) quien hizo la pulverización de la biomasa, una vez que está ya se seca, hasta alcanzar un tamaño de partícula de 0.2 mm, sin embargo, en este estudio, se realizó la trituraron por un molino de cuchillas marca Fritsch con una capacidad mínima de tamaño de partícula de 0.5 mm, por el motivo de que no cuenta con una rejilla dentro de la trituradora inferior a este tamaño.

Con el bagazo de caña de azúcar ya triturado se comenzó a preparar dos muestras de 6 g cada por cada una de las variedades de caña de azúcar, las cuales fueron introducidas en bolsas plásticas con una respectiva etiqueta que permite distinguir a que ensayo y a que variedad pertenece (figura 10), posteriormente fueron enviadas al Laboratorio de Química de la Universidad Central del Ecuador (UCE).

### **Figura 10**

*Muestras de Bagazo Trituradas*



## Calorimetría.

El análisis por calorimetría está basado en la metodología efectuada por Muñoz et al. (2016) en donde se toma una muestra de 1 g de bagazo triturado al aire, pero en este caso de estudio solo se hicieron muestras de 0.5 g pesados en una balanza de marca Sartorius, ya que el crisol no tiene la capacidad de contener un gramo de biomasa triturada y el proceso de combustión con biomasa mayor a este valor causó daños y quemaduras a la banda que está en la parte interna de la bomba de combustión. En la figura 11 se muestra la preparación de la muestra.

### Figura 11

*Muestra de Bagazo en el Crisol*

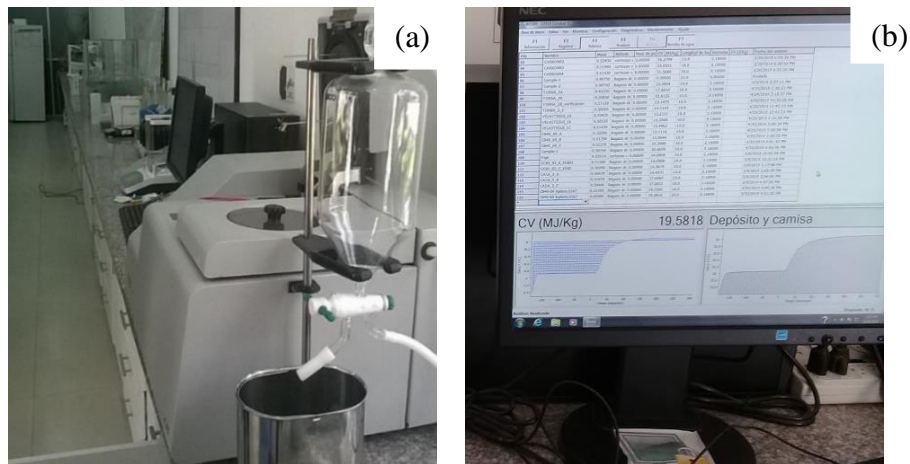


Para este análisis fueron necesarias utilizar tres muestras de 0.5 g por cada una de las variedades de caña de azúcar debido a la complejidad del proceso y disponibilidad de tiempo. Las muestras se colocaron en la bomba de combustión con exceso de oxígeno a 500 Psi para la obtención del poder calorífico.

Los datos obtenidos mediante el proceso de la bomba calorimétrica fueron guardados en la memoria del programa de la máquina LECO (figura 12), los cuales luego son tabulados en una hoja de Excel (Anexo11) para el respectivo cálculo del poder calorífico superior seco (PCSS).

## Figura 12

### *Analizador Calorimétrico y Obtención de Datos*



*Nota.* La figura 12(a) muestra la máquina Leco. La figura 12(b) representa el registro de resultados en la memoria del Programa.

### **3.2.2. Análisis de la Biomasa Agro-residual de Caña de Azúcar de la Forma Elemental, Proximal y estructural**

A continuación, la metodología realizada para el cumplimiento de este objetivo es mostrada en conjunto con los materiales que permitieron desarrollar los análisis de la biomasa del bagazo de caña de azúcar de la manera elemental, estructural y proximal.

#### **Análisis Proximal y Estructural (TGA).**

Se elige el método TGA sobre NIR para el análisis estructural ya que desafortunadamente, esta técnica requiere una gran recopilación de datos de alta calidad y un espectro inicial en blanco, lo que limita el uso hasta la fecha para tales aplicaciones (Carrier et al., 2010). Además, el método TGA es más rápido, más fácil de usar y menos costoso que las técnicas y métodos existentes con una precisión comparable o mejorada.

Para el análisis proximal y estructural basados en el método del TGA, se envi6 las muestras al Laboratorio Qu6mico de la UCE, donde toman una peque1a porci6n de la biomasa y la colocan en el crisol (figura 13). Al colocar el crisol dentro de la m1quina Mettler Toledo se obtiene el peso por la balanza interna que posee. Los par1metros de la desintegraci6n t6rmica, comienza con la descomposici6n de la hemicelulosa que se llev6 a cabo entre 200 y 400 °C, de la celulosa entre 300 y 410 °C, y la lignina desde 400°C hasta 800 °C referidos al caso del bagazo de ca1a de az6car (Rueda y Tannous, 2017).

### **Figura 13**

*Crisol de la m1quina Mettler Toledo para el an1lisis TGA*



Este an1lisis tiene la finalidad de estudiar la relaci6n de descomposici6n de biomasa con respecto a la temperatura, la determinaci6n de las caracter6sticas de volatilizaci6n y los par1metros cin6ticos, tales como: la energ6a de activaci6n y el factor pre-exponencial, as6 como la influencia de la temperatura y velocidad de calentamiento en el desarrollo de las reacciones de descomposici6n t6rmica y los mecanismos de reacci6n seg6n menciona Manals et al, (2011). En la imagen se muestra el analizador TGA utilizado de marca Mettler Toledo (figura14).



## Figura 14

### *Máquina Analizadora TGA Marca Mettler Toledo*



Con el fin de completar el análisis estructural se hace uso del programa Originlab 2015 (Anexo 2), en el cual se introduce los datos obtenidos por el análisis TGA enviados desde el laboratorio de la UCE, para la obtención de los porcentajes de hemicelulosa, celulosa y lignina de cada variedad de caña de azúcar.

### **Análisis Elemental.**

Esto se puede realizar en un instrumento especializado conocido como analizador elemental en el momento de la combustión, la muestra genera gases compuestos uniformes de los elementos C, H, N y S. Estos productos de combustión (p. ej. CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, NO<sub>2</sub>, etc.) se miden mediante cromatografía de gases y, por consiguiente, se determina la proporción de los elementos en la muestra original y por último, los valores de C, H, N y S pueden determinarse simultáneamente, mientras que el de O puede analizarse en un segundo paso mediante pirólisis (Mettler Toledo, 2020).

Este análisis permite conocer la composición elemental de un combustible de biomasa como el carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno (C-H-O-N). Tomando en cuenta que estas propiedades varían en dependencia del material que se esté analizando por el método en cuestión (Manals et al., 2015). Los análisis respectivos fueron obtenidos por Laboratorio de Química que pertenece a UCE con lo cual se



conoce los porcentajes de cada componente químico dentro de la caña de azúcar de cada una de las variedades (Anexo 8).

### ***3.2.3 Comparación de la Generación de Energía del Uso del Bagazo Entre Cogeneración y Bioetanol del Ingenio Tababuella***

Para el cumplimiento de este último objetivo correspondiente al tema de investigación se debió llevar a cabo una revisión a profundidad de literatura relacionado con la producción de energía eléctrica por cogeneración como también de la obtención del bioetanol derivado del bagazo de caña de azúcar.

#### **Cogeneración.**

Basándose en la información proporcionada por los directivos del ingenio azucarero sobre la cantidad de energía producida por el sistema de cogeneración y el valor económico que este supone se conoce cuál es el ahorro por el gasto eléctrico por medio de las tarifas energéticas impuestas en el país.

En primera instancia, del total de producción de toneladas de bagazo diario el ingenio azucarero aprovecha el 90% para la combustión directa en la planta de cogeneración que transforma la energía térmica a eléctrica con una eficiencia del 40%, además se estima dos semanas al año para el mantenimiento, por lo que la planta opera alrededor de 355 días (IANCEM, 2019). Datos necesarios para el cálculo de producción energética y los ingresos monetarios.

Para el cálculo de energía, es necesario conocer el poder calorífico inferior seco (PCIS) del bagazo seco de caña de azúcar, obtenido por medio de la ecuación 1 que propone Agüero et al. (2020), en donde es necesario conocer el PCSS encontrado por el análisis de calorimetría y la cantidad de hidrógeno de cada una de las variedades de caña de azúcar.

Sabiendo la humedad del bagazo de cada una de las variedades juntamente con el calor latente de vaporización del agua, permiten determinar el poder calorífico inferior del bagazo húmedo (PCIH) con la ecuación 2 como Zumalacárregui et al.

(2014) realizó en el trabajo de investigación. Con esto se puede finalmente determinar la cantidad de energía que se libera en el proceso de combustión directa del bagazo en el sistema de cogeneración.

$$PCI_{\text{bagazo seco}} = PCIS = PCSS - 5400 \times H = (\text{kcal/kg de bagazo seco}) \quad (1)$$

- H= kg de Hidrógeno/kg de bagazo seco
- 1 kCal = 4 186 kJ

$$PCI_{\text{Bagazo húmedo}} = ((1-0.01 \times H) \times PCI_{\text{bagazo seco}}) - ((0.01 \times H) \times L) \quad (2)$$

- H= Humedad del bagazo en %
- L=Calor latente de vaporización H<sub>2</sub>O a 25°C (2.4423MJ/kg)

### **Hidrólisis Enzimática.**

Basándose en el estudio hecho por Zumalacárregui et al. (2014) donde se opta por hacer un proceso de hidrólisis enzimática con células de *Trichoderma reesei* y considerando que ocurre con un rendimiento de 80% en donde es necesario obtener la máxima cantidad de glucosa a partir de la celulosa por medio de la relación de glucosa/celulosa = 1.111, como también el valor máximo de xilosa procedente de la hemicelulosa con la relación de xilano/ hemicelulosa = 1.236. Datos que cambian dependiendo de la variedad que se estudie y que permiten determinar la producción en litros de etanol.

A diferencia que, en la cogeneración, se realizó el análisis de un escenario con el total del bagazo producido diariamente y otro que opera con el 50% del total del agro-residuo en unión con un sistema de cogeneración, considerando 10 días de mantenimiento lo que equivale a 355 días de operación al año. El cálculo de producción de bioetanol se expresa en la ecuación 3 (Zumalacárregui et al., 2014).

$$V_{\text{etanol}} = \frac{0.65L_{\text{etanol}}}{\text{Kg de glucosa o xilosa}} * \frac{(\text{kg glucosa} + \text{kg xilosa})}{t_{\text{bagazo Húmedo}}} * \frac{10^3}{t} = \frac{L_{\text{etanol}}}{t_{\text{bagazo Húmedo}}} \quad (3)$$

El valor monetario por un litro de bioetanol obtenido a partir del bagazo húmedo de caña de azúcar se estima en 0.452 USD (Zumalacárregui et al., 2014). Dato importante para determinar el ingreso económico teórico si se aplicara este tipo de tecnología.

### 3.3 Materiales y Equipos

La tabla 5 muestra un listado de instrumentos utilizados la cual se halla dividida en dos segmentos, el primero corresponde a los materiales y equipos de laboratorio usados para los correspondientes análisis y toma de muestras, y el segundo con la descripción, que contiene las características que poseen los aparatos como la marca de cada uno.

**Tabla 5**

*Materiales y Equipos Utilizados en los Análisis del Bagazo de Caña de Azúcar*

Materiales y equipos de laboratorio	Descripción	
Pie de rey		
Flexómetro		
Pirola roja		
4 estacas de madera		
Balanza digital de mano	CAMRY	(Anexo 12)
Machete		
Guantes		
Triturador de cuchillas	Fritsch	(Anexo 3)
Estufa	Memmert	(Anexo 4)
Balanza digital	Sartorius	(Anexo 5)
Bomba calorimétrica	Leco	(Anexo 6)
Analizador TGA	METTLER TOLEDO	(Anexo 7)

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIONES

En el presente capítulo se muestra los resultados de cada uno de los objetivos propuestos. Dichos resultados fueron obtenidos con base en la metodología descrita en el capítulo III. La información se muestra en tablas y gráficas para una mejor comprensión, detallada con el fin de explicar el propósito de este tema de investigación sobre el material lignocelulósico para producir bioenergía.

#### **4.1. Evaluación del Potencial Energético de la Biomasa Agro-residual de los Cultivos de Caña de Azúcar, Morfología, Pesaje y Calorimetría**

Se muestran los valores determinados de la medición morfológica, cuantificación de biomasa y poder calorífico de cada variedad tomando además el cálculo con el total del área del terreno cultivado, donde PR 980 cuenta con 2 373.63 ha, CC 85-92 con 304.59 ha, y por último la variedad CB 40-69 con 644.18 ha, sumando un total de 3 322.4 ha de cultivo de caña de azúcar.

##### ***4.1.1. Morfología***

Los resultados obtenidos del estudio morfológico para hojas y tallos de las plantas de caña de azúcar maduras de cada una de las variedades demuestran algunas diferencias en las dimensiones del largo, ancho y grosor, lo que permite identificarlas entre ellas.

Dentro de cada variedad se muestra que las dimensiones que tienen las hojas de la parte baja, media y punta no varían significativamente en los anchos y largos, siendo prácticamente similares entre sí, sin embargo, si se compara las medidas entre cada una de las variedades se observa ciertas diferencias, tales como, el ancho de la base, donde CC 85-92 se destaca por tener el mayor valor de hasta 48.05 mm, sin embargo, al comparar los anchos medios se observa que la variedad PR 980 alcanza el mayor rango con 70.38 mm, de esta manera superando a las demás que

no llegan los 60 mm y finalmente PR 980 posee el ancho de punta mayor de entre las tres variedades, cercano a los 34.53 mm.

En las hojas también se determinó que la variedad que alcanza una mayor longitud es CB 40-69, ya que se encontró que tiene unas medidas de entre 1.51 a 1.52 m, al contrario que CC 85-92 la cual posee las hojas más cortas con un rango de 1.19 m a un máximo de 1.28 m.

Por último, la variedad con más hojas promedio por tallo es CB 40-69 con un total de 37, mientras que, PR 980 y CC 85-92 tienen un total de 31 y 32 hojas respectivamente, lo que influye en la cantidad de biomasa producida. A continuación, se muestran los valores en la tabla 6.

**Tabla 6**

*Morfología de Hojas de las Variedades de Caña de Azúcar*

Variedad	Ancho Promedio Base [mm]	Ancho Promedio Medio [mm]	Ancho Promedio Punta [mm]	Largo Promedio [m]	Nº Promedio hojas
PR 980					
Hoja Base	38.89	70.38	34.53	1.32	
Hoja Media	37.59	69.44	33.47	1.32	31
Hoja Punta	37.08	69.98	32.17	1.30	
CC 85-92					
Hoja Base	47.99	44.88	23.93	1.20	
Hoja Media	48.05	45.12	23.82	1.19	32
Hoja Punta	47.78	45.25	23.75	1.28	
CB 40-69					
Hoja Base	37.00	54.19	14.03	1.51	
Hoja Media	36.72	54.63	13.90	1.52	37
Hoja Punta	37.33	54.63	13.77	1.51	

En el caso del tallo de caña de azúcar, la tabla 7 indica los resultados de las dimensiones obtenidas para las variedades PR 980, CC 85-92 y CB 40-69, donde los valores son expresados en lo que concierne al largo y el diámetro de la parte baja, media y punta del tallo.

El tallo de cada variedad tiene la forma similar a un cilindro, asumiendo que el diámetro del tallo se reduce a medida que se acerca a la parte superior, sin embargo los resultados muestran, que para PR 980 no se cumple con exactitud dicha afirmación, pues el valor promedio de la parte baja del tallo es de 30.69 mm siendo inferior a la medida de la parte media que alcanza una cantidad promedio de 31.02 mm lo que indica que el desarrollo no se comporta como se esperaría que lo hiciera y por último en la parte superior se obtiene un ancho de 29.38 mm.

Los diámetros del tallo para CC 85-92 son descendentes a medida que se acerca a la parte superior, siendo en la base un valor de 28.32 mm, en la parte media de 26.20 mm y en la punta de 23.23 mm semejantes a el resultado que Ramírez et al. (2014) encontró y cuyo valor es de un promedio de 28.6 mm de diámetro en esta variedad pero no menciona en que posición de la planta fue medido y que técnica empleo para el estudio.

Para el último caso, la variedad CB 40-69, presenta diámetros de tallo que al igual que CC 85-92, los valores de la parte base, media y punta disminuyen a medida que se asciende por la planta, aunque no tan significativamente, pues la base posee un valor de 38.87 mm, en la parte media de 37.41 mm y la punta de 35.07 mm, valores que son muy diferentes si se compara con el estudio de Dariva et al. (1987), quien obtuvo un promedio del diámetro de tallo de 25.1 mm mucho menor a lo establecido en este estudio, aunque tampoco el autor hace mención del lugar en la planta donde tomó las medidas.

La variación de los grosores de los tallos que se muestra dentro de cada una de las variedades y en comparación con los datos obtenidos por las investigaciones de otros autores podrían darse por diversas causas, dentro de las cuales se toman en

consideración el tipo de riego, tipo de suelo, precipitación, forma de cultivación, temperatura o, por otro lado, al método de cultivo y muestreo utilizado en ese entonces (Ramírez y García, 2019).

En el caso del largo del tallo, la variedad de menor longitud es CC 85-92 con un valor promedio de 2.30 m semejante al encontrado por Ramírez et al. (2014) con 2.21 m, mientras que PR 980 se considera mediano entre las tres con 2.60 m y por último CB 40-69 con 2.83 m siendo igualmente distinto por el encontrado por Dariva et al. (1986) que determinó un largo promedio de 1.37 m, diferencias que pudieron haberse dado, como anteriormente se mencionó, por las condiciones meteorológicas del lugar y técnicas de cultivo.

**Tabla 7**

*Morfología del Tallo de las Variedad*

Variedad	Diámetro Promedio Base [mm]	Diámetro Promedio Medio [mm]	Diámetro Promedio Punta [mm]	Largo Promedio [m]
Tallo (PR 980)	30.69	31.02	29.38	2.60
Tallo (CC 85-92)	28.32	26.20	23.23	2.30
Tallo (CB 40-69)	38.87	37.41	35.07	2.83

**4.1.2. Porcentaje de Bagazo Por Variedad**

La cantidad de bagazo que se obtiene de una hectárea de caña de azúcar es diferente en cada una de las variedades. Se observa en la tabla 8 que la CB 40-69 tiene un porcentaje mayor de bagazo húmedo con un total de 35.67% lo que significa que produce una mayor cantidad de agro-residuo a diferencia que CC 85-92 con un porcentaje menor con un valor menor de 35.03%.

Por último, según estudios realizados se estima que una hectárea de caña de azúcar produce un 34% según INEGI (2012), demostrando que los resultados obtenidos en este estudio no son muy diferentes, sin embargo, a diferencia de esta investigación no se menciona las variedades que se consideraron para obtener dicho valor.

**Tabla 8**

*Cantidad de Bagazo húmedo por variedad*

Variedad	Bagazo húmedo por hectárea [%]
PR 980	35.33
CC 85-92	35.03
CB 40-69	35.67

#### **4.1.3 Peso Húmedo**

El peso bruto obtenido de los tallos de caña de azúcar, de hojas verdes y el bagazo, de cada una de las variedades, es mostrada en la tabla 9, donde se dan a conocer la cantidad en toneladas que se obtiene por una hectárea cosechada de cada componente, así mismo se constata las diferencias de rendimiento de producción que existen entre PR 980, CC 85-92 y CC 4069.

Observado los datos calculados de la variedad CB 40-69 se encontró que el peso bruto de tallos es superior al resto de variedades ya que alcanza un valor promedio de 157.91 t/ha debido a que, como se pudo mirar, los diámetros del tallo y largos del mismo son mayores que el resto de las variedades analizadas (tabla 7).sin embargo, Dariva et al. (1988) manifiesta que esta variedad tiene rendimientos de 108 t/ha, así mismo Queiroz (1959) consiguió 109 t/ha, de igual manera, Secalla y Olivera (1967) determinaron una producción de 132 t/ha, los cuales demuestran cantidades inferiores a los vistos en este estudio, mismas que podrían variar por las técnicas de cultivo o las condiciones meteorológicas, como Ramírez y García (2019) sugieren.

En el caso de la variedad PR 980 se alcanzó un total de producción de tallos de 131.46 t/ha, es por lo tanto la segunda variedad con mayor producción y por último se encuentra CC 85-92 con un valor de 120.36 t/ha que en comparación al valor obtenido por Ramírez et al. (2014) de 117.46 t/ha, siendo este relativamente inferior y que pudo haberse dado por las condiciones en que fue cultivado.



En el caso de las hojas se muestra un rendimiento mayor en la variedad CB 40-96 con 35.24 t/ha, sin embargo, la variedad PR 980 supera a CC 85-92 con 3.6 t/ha en producción ya que como se observó en la tabla 6, las dimensiones de las hojas en PR 980 sobrepasan a las de CC 85-92 provocando una mayor cantidad de biomasa.

Gracias al cálculo porcentual del bagazo de caña de azúcar de cada una de las variedades (Tabla 8), se encontró que nuevamente que CB 40-69 tiene más rendimiento con respecto a las dos variedades restantes produciendo un promedio de 56.32 t/ha resultado que se explica al conocer que esta variedad posee la mayor producción de tallos los cuales también poseen diámetros superiores a el resto de las variedades estudiadas.

Al considerar la obtención del bagazo por el total de la superficie cosechada se entiende que PR 980 es la que mayor cantidades produce, con un valor de 110.25 Mt debido a que esta variedad es el cultivo que tiene mayor superficie cosechada en los terrenos de siembra del ingenio azucarero y asociados (tabla 1) y por lo cual también sobrepasa el bagazo obtenido por las dos variedades que no se aproximan ni siquiera a la mitad de esta, donde CC 85-92 tiene 12.84 Mt y CB 40-69 con 36.28 Mt.

**Tabla 9**

*Rendimientos en Toneladas de Caña de Azúcar, Hojas Verdes, Bagazo*

Variedad	Superficie Cosechada [ha]	Caña de Azúcar Promedio [t/ha]	Hojas Verdes Promedio [t/ha]	Bagazo Promedio [t/ha]	Bagazo Promedio por Total de Superficie Cosechada [Mt]
PR 980	2373.63	131.46	33.3	46.45	110.25
CC 85-92	304.59	120.36	29.7	42.17	12.84
CB 40-69	644.18	157.91	35.24	56.32	36.28

#### **4.1.4. *Peso seco***

La información obtenida muestra diferencias importantes entre cada una de las variedades de caña de azúcar con respecto a la biomasa seca como también las diferencias que existen en los porcentajes de humedad de cada componente de la planta.

Los datos cronológicos del secado de las muestras de bagazo y hojas de cada una de las variedades de caña de azúcar se representan gráficamente como una curva que disminuye conforme va aumenta el tiempo de secado necesario para llegar al punto en que ya no es posible extraer más humedad, logrando mantener una cantidad de masa estabilizada.

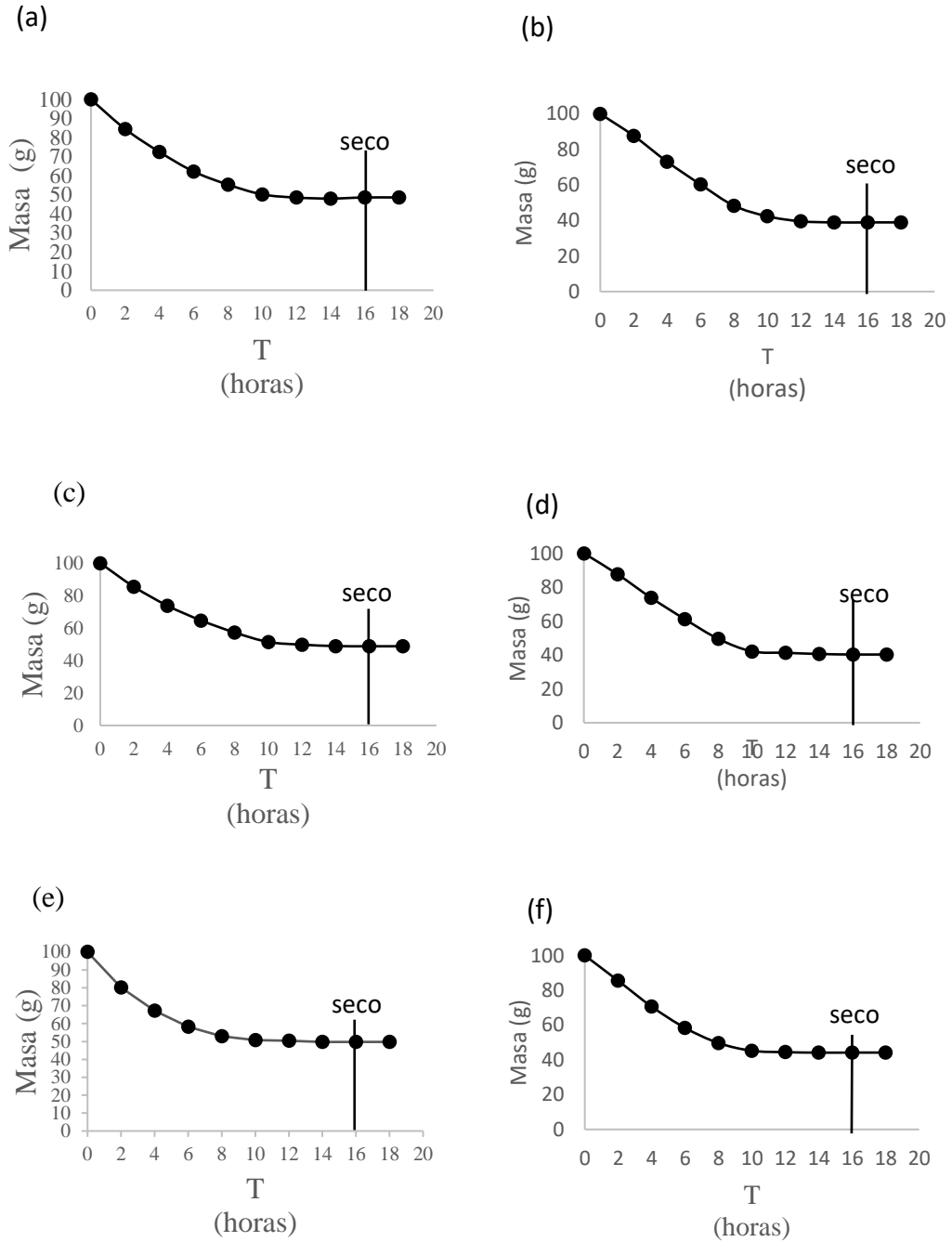
En la figura 15 son representadas las curvas de secado en las cuales se evidencia un descenso de humedad aproximada del 40% durante las 10 primeras horas luego de este tiempo la perdida de agua es menor, haciendo que la curva tienda a ser una línea constante paralela al eje x.

En la figura 15 también se ilustra de igual manera el tiempo determinado para que cada uno de los componentes analizado (bagazo y hojas) lleguen a estabilizarse al cumplir las horas requeridas de permanencia en el interior de la estufa con una temperatura controlada de 105 °C, luego de esto no es posible extraer más contenido de humedad de las muestras.

Dicho tiempo es señalado por una línea vertical en el punto en que se estabilizaron las muestras y que es igual a un total de 16 horas en donde se logra el agro-residuo completamente libre de agua, sin embargo, la cantidad de humedad extraída fue diferente en cada variedad como también para cada uno de los componentes (bagazo y hojas).

**Figura 15**

*Curva de Secado de Bagazo y Hojas de Caña de Azúcar*



*Nota.* La figura 15 (a) y 15 (b) muestran la curva de secado de bagazo y hojas de la variedad PR 980, así mismo la figura 15 (c) y 15 (d) corresponden al bagazo y hojas de la variedad CC 85-92 y, por último, la figura 15 (d) y 15 (e) corresponden

a las curvas de secado de la variedad CB 40-69, de bagazo y hojas respectivamente.

Los datos obtenidos de la realización de la curva de secado permitieron conocer el porcentaje de humedad que tiene el bagazo y hojas de cada variedad. En la tabla 10 se aprecia que el bagazo de la variedad PR 980 contiene más humedad con un valor de 51.37% de igual manera las hojas con 61.07%. En la variedad CB 40-69 se observa que tiene menor cantidad de agua con un total en bagazo y hojas de 50.24% y 55.83% respectivamente. Finalmente, la variedad CC 85-92 obtuvo valores de humedad en el bagazo y hojas de 51.21% y 59.07%, posicionándola en un punto medio entre las dos anteriores variedades.

**Tabla 10**

*Porcentaje de Humedad del Bagazo y Hojas*

Variedad	Humedad Promedio del bagazo [%]	Humedad Promedio en hojas [%]
PR 980	51.37	61.07
CC 85-92	51.21	59.72
CB 40-69	50.24	55.83

Mediante los datos obtenidos del valor de humedad que se puede extraer de las hojas y del bagazo de cada una de las variedades de caña de azúcar, se logró determinar la cantidad de toneladas de agro-residuo seco que se obtienen en una hectárea.

En el caso de la variedad de caña de azúcar CB 40-69 posee una producción más alto por hectárea de bagazo y hojas (tabla 9) y debido a que tiene un porcentaje menor de humedad en cada uno, se logra un mayor rendimiento de biomasa seca de 27.50 t en bagazo y 15.57 t de hojas secas.

En la variedad PR 980 la cantidad de bagazo seco es de 22.37 t/ha y en hojas de 12.96 t/ha, dando como resultado una producción total de bagazo por toda la

superficie cosechada de 53.11 Mt mayor al de la variedad CB 40-69 que tan solo tiene 17.72 Mt.

Por último, en el cálculo de la variedad CC 85-92 se determinó que la cantidad de agro-residuo seco correspondiente al bagazo es de un total de 20.56 t/ha, mientras que, en el caso de las hojas, la producción llega a un estimado de 11.96 t/ha, por lo tanto, la obtención de biomasa seca es inferior si se compara con las otras dos variedades anteriormente vistas. La información obtenida se presenta a continuación en la siguiente tabla 11.

**Tabla 11**

*Rendimientos en Toneladas Hojas Secas y Bagazo Seco*

Variedad	Superficie Cosechada [ha]	Hojas Secas [t/ha]	Bagazo Seco [t/ha]	Bagazo Seco Total por Superficie Cosechada [Mt]
PR 980	2373.63	12.96	22.59	53.61
CC 85-92	304.59	11.96	20.57	6.27
CB 40-69	644.18	15.57	28.02	18.05

#### **4.1.5. Calorimetría**

En el análisis del poder calorífico de la variedad de caña de azúcar PR 980 mostró un valor promedio de PCSS de 15.91 MJ/kg. De igual manera el poder calorífico de la variedad de CC 85-92 es de 16.07 MJ/kg que supera con 0.16 MJ/kg a la variedad anterior y por último la variedad CB 40-69 le corresponde un valor de 17.37 MJ/kg sobrepasando a las dos anteriores, siendo la que mayor cantidad de energía produce al ser combustionado el bagazo, como se observa en la tabla 12.

Los valores obtenidos por la calorimetría son diferentes a los vistos en la literatura y tan solo CB 40-69 se acerca a estos datos con 17.37 MJ/kg, ya que, Macías et al. (2014) determinaron un PCSS de 17.30 MJ/kg, de igual manera, Rueda y Tannous (2017) obtuvieron un PCSS de 17.43 MJ/kg para el bagazo de caña de azúcar,

aunque ninguno menciona que variedad de caña usaron para el análisis al contrario que en esta investigación.

Las variaciones de PCSS que se observa entre variedades, se debe a las cantidades de ceniza que producen como se ve en la tabla 13, ya que, a mayor producción de este residuo, menor es la energía que liberan en procesos de combustión directa, como menciona Rueda y Tannous (2017), por lo tanto, sería mejor utilizar el agro-residuo con mayor PCSS en un sistema que produce energía eléctrica de la quema directa de biomasa.

**Tabla 12**

*Valor del Poder Calorífico Superior Seco*

Variedad	PCSS Promedio [MJ/kg]
PR 980	15.91
C 85-92	16.07
CB 40-69	17.37

#### **4.2. Análisis de la Biomasa Agro-residual de Caña de Azúcar de la Forma Elemental, Proximal y Estructural**

Los estudios hechos permitieron conocer las características químicas que posee cada una de las variedades de caña de azúcar como también, la composición lignocelulosa que tienen cada una de ellas, esto fue posible por medio de los métodos y análisis de laboratorio elegidos que son TGA y elemental. Los ensayos se llevaron a cabo en el Laboratorio Químico de la UCE.

##### **4.2.1. Composición Elemental del Bagazo**

Los resultados del análisis elemental muestran que el porcentaje de nitrógeno (N) es mayor en la variedad CB 40-69 con 1.53%. Mientras que en la cantidad de carbono (C), los valores se mantienen casi iguales entre cada variedad de caña de

azúcar, en otro caso la variedad CC 85-92 posee una menor proporción de Nitrógeno (N) con 0.21% como también una menor concentración de azufre (S) con 0.17%, como se observa en la tabla 13, por lo tanto demuestra que tiene una ventaja importante a la hora de combustionar el bagazo, pues al tener menor cantidad de N y S posee una baja emisión de NOx y SOx en la combustión de carbono mezclado con bagazo (Rueda y Tannous. 2017), al contrario que CB 40-69 que tiene mayor cantidad de dichos elementos.

Cutimbo (2017), usando el análisis elemental obtuvo resultados que indican el bajo contenido de azufre y nitrógeno <1%. Rueda y Tannous (2017), obtuvieron por medio de este análisis cantidades de C de 45.78%, H de 5.72%, N de 0.44% y O de 48.06% para el bagazo de caña azúcar.

Los valores encontrados de N, C, H, S y O de estas variedades están dentro de los rangos establecidos o cercanos a los observados en la literatura, pero al contrario que en esta investigación los autores de los estudios tomados como referencia no especifican a qué tipo de variedad de caña de azúcar utilizaron para los correspondientes análisis de composición química o de las cualidades energéticas que poseen, dando a entender que son estudios generalizados para el bagazo.

**Tabla 13**

*Análisis Elemental del Porcentaje de N, C, H, S y O*

Variedad	N [%]	C [%]	H [%]	S [%]	O [%]
PR 908	0.23	44.39	8.85	0.23	46.30
CC 85-92	0.21	44.79	9.40	0.17	45.43
CB 40-69	1.53	44.76	8.1	0.27	45.34

#### **4.2.2. Composición Proximal del Bagazo**

Con el análisis proximal se encontró que la variedad PR 980 tiene un porcentaje de humedad de 5.20%, para CC 85-92 con 5.21%, mientras que 5.81% para CB 40-69.

En el caso de materiales volátiles CB 40-69 tiene el valor más alto de entre las tres variedades con 82.68%. La cantidad de carbón fijo se encuentra con mayor cantidad en la variedad de PR 980 con un 7.74% y es menor en CB 40-69 el cual obtiene un valor de 11.19%.

Por último, se encontró que CC 85-92 tiene 5.65% de cenizas con 2.09% de diferencia a PR 980, además se observa que CB 40-69 posee una cantidad de ceniza menor a todas las variedades con 5.43%. Los resultados de la caracterización son presentados en la tabla 14.

**Tabla 14**

*Análisis Proximal del Bagazo de Caña de Azúcar Correspondiente a los Porcentajes de Humedad, Material Volátil, Carbono Fijo y Cenizas*

Variedad	Promedio Humedad [%]	Promedio Material Volátil [%]	Promedio Carbón fijo [%]	Promedio Cenizas [%]
PR 980	5.20	78.62	14.57	7.74
CC 85-92	5.21	82.28	11.75	5.65
CB 40-69	5.81	82.68	11.19	5.43

El análisis proximal de las variedades de caña de azúcar es coincidente con otros valores vistos en la literatura, donde Neri (2002) menciona que consiguió resultados de humedad de un 4.42%, una cantidad en material volátil de 81.66%, carbón fijo con 8.82% y ceniza con un total de 8%, 5.10% y 2.94% dependiendo de la temperatura.

Así mismo, Cutimbo (2017) con este análisis obtuvo que los datos de humedad son de 6.36%, cantidad de ceniza de 3.87%, material volátil de 83.80% y carbono fijo de un 16.20%, que son valores próximos a los datos obtenidos en este estudio. Sin embargo, ningún autor hace mención sobre qué tipo de variedad de caña de azúcar realizaron los estudios.



Como anteriormente se menciona, el porcentaje de ceniza bajo es beneficioso ya que habrá una mayor cantidad de energía liberada en la combustión directa del bagazo, de igual manera, al tener una mayor cantidad de materiales volátiles se puede decir que el rendimiento de la quema del agro-residuo de caña de azúcar es mejor

La Société Générale de Surveillance o en español la Sociedad General de Vigilancia (SGS) (2020) sugiere que la materia volátil es una cuestión de seguridad y salud fundamental, ya que los carbones con un alto nivel de materias volátiles presentan un mayor riesgo de combustión espontánea. En el caso del bagazo de caña de azúcar de la variedad CB 40-69 sugiere que el alto contenido de este compuesto químico de un valor de 82.68% implica una mayor liberación de energía al ser quemado.

#### ***4.2.3. Composición Estructural de Bagazo***

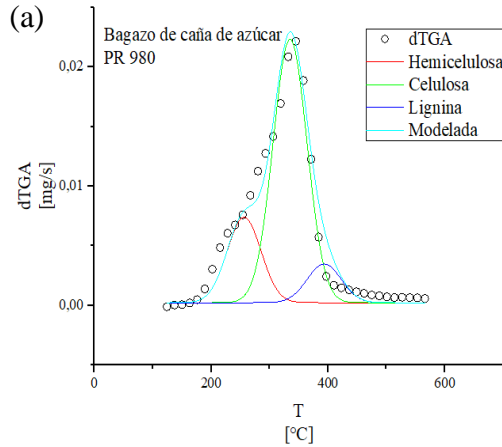
Los resultados del análisis por TGA permiten la construcción de las curvas de tasa de conversión como función de la temperatura en °C mostrado en el eje x, mientras que en el eje y se halla la derivada TGA en mg/s para cada una de las variedades de caña de azúcar.

En la figura 16 se muestra la curva conseguida a partir de los parámetros cinéticos fijos con el esquema de reacciones paralelas autónomas la cual fue ilustrada como una línea continua, mientras que los datos experimentales aparecen representados por símbolos circulares (o).

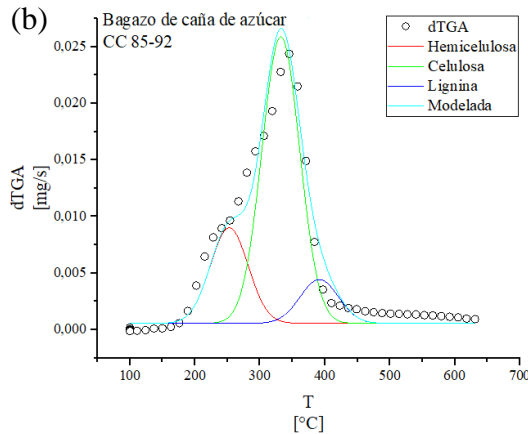
En la curva derivada TGA existieron ciertos picos o deformidades que indican el punto en el que los componentes de la lignocelulosa combustionan. Al deconvolucionar por medio del programa OriginPro 2015, se obtienen curvas de colores, donde la línea roja representa la hemicelulosa, la verde corresponde a la celulosa, el azul es usado para identificar a la lignina, por último, la línea de la curva modela se representa de color celeste.

**Figura 16**

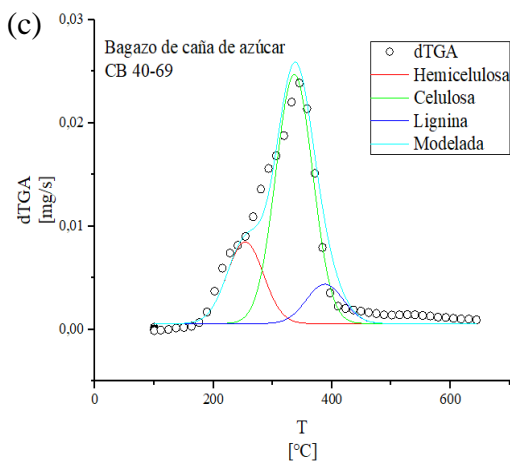
*Curva de Tasa de Conversión como Función de la Temperatura de las Variedades*



Model		Gauss	
Equation			
$y=y_0 + (A/(w*\sqrt{\pi/2})) * \exp(-2*((x-xc)/w)^2)$			
Reduced Chi-Sqr	2,40365E-6		
Adj. R-Square	0,94557		
		Value	Standard Error
Peak1(B)	y0	2,21457E-4	4,5033E-4
Peak1(B)	xc	256,27281	17,99773
Peak1(B)	w	58,10979	24,93188
Peak1(B)	A	0,52119	0,33011
Peak1(B)	sigma	29,05489	12,46594
Peak1(B)	FWHM	68,41905	29,35505
Peak1(B)	Height	0,00716	0,00196
Peak2(B)	y0	2,21457E-4	4,5033E-4
Peak2(B)	xc	334,99088	14,87762
Peak2(B)	w	58,2079	27,13818
Peak2(B)	A	1,6129	1,32507
Peak2(B)	sigma	29,10395	13,56909
Peak2(B)	FWHM	68,53456	31,95277
Peak2(B)	Height	0,02211	0,00823
Peak3(B)	y0	2,21457E-4	4,5033E-4
Peak3(B)	xc	393,43066	120,11939
Peak3(B)	w	58,3029	103,73487
Peak3(B)	A	0,2376	1,1193
Peak3(B)	sigma	29,15145	51,86744
Peak3(B)	FWHM	68,64642	122,13848
Peak3(B)	Height	0,00325	0,00985



Model		Gauss	
Equation			
$y=y_0 + (A/(w*\sqrt{\pi/2})) * \exp(-2*((x-xc)/w)^2)$			
Reduced Chi-Sqr	2,22994E-6		
Adj. R-Square	0,9502		
		Value	Standard Error
Peak1(dTGA)	y0	5,54775E-4	2,65296E-4
Peak1(dTGA)	xc	252,7455	13,67326
Peak1(dTGA)	w	58,19044	18,92193
Peak1(dTGA)	A	0,61589	0,28306
Peak1(dTGA)	sigma	29,09522	9,46097
Peak1(dTGA)	FWHM	68,51401	22,27887
Peak1(dTGA)	Height	0,00844	0,00166
Peak2(dTGA)	y0	5,54775E-4	2,65296E-4
Peak2(dTGA)	xc	332,12577	11,45407
Peak2(dTGA)	w	58,15205	20,86423
Peak2(dTGA)	A	1,84658	1,163
Peak2(dTGA)	sigma	29,07602	10,43211
Peak2(dTGA)	FWHM	68,4688	24,56575
Peak2(dTGA)	Height	0,02534	0,00724
Peak3(dTGA)	y0	5,54775E-4	2,65296E-4
Peak3(dTGA)	xc	391,36478	90,54062
Peak3(dTGA)	w	58,94614	79,05213
Peak3(dTGA)	A	0,28631	0,9759
Peak3(dTGA)	sigma	29,47307	39,52606
Peak3(dTGA)	FWHM	69,40378	93,07677
Peak3(dTGA)	Height	0,00388	0,00833



Model		Gauss	
Equation			
$y=y_0 + (A/(w*\sqrt{\pi/2})) * \exp(-2*((x-xc)/w)^2)$			
Reduced Chi-Sqr	2,3826E-6		
Adj. R-Square	0,94362		
		Value	Standard Error
Peak1(dTGA)	y0	5,57938E-4	2,73295E-4
Peak1(dTGA)	xc	253,55839	20,96981
Peak1(dTGA)	w	61,73157	25,5408
Peak1(dTGA)	A	0,61214	0,41473
Peak1(dTGA)	sigma	30,86579	12,7704
Peak1(dTGA)	FWHM	72,68337	30,072
Peak1(dTGA)	Height	0,00791	0,00252
Peak2(dTGA)	y0	5,57938E-4	2,73295E-4
Peak2(dTGA)	xc	336,42792	38,33084
Peak2(dTGA)	w	62,18865	44,32435
Peak2(dTGA)	A	1,88331	3,48607
Peak2(dTGA)	sigma	31,09433	22,16217
Peak2(dTGA)	FWHM	73,22154	52,18793
Peak2(dTGA)	Height	0,02416	0,02796
Peak3(dTGA)	y0	5,57938E-4	2,73295E-4
Peak3(dTGA)	xc	388,00182	250,00651
Peak3(dTGA)	w	62,104	155,50556
Peak3(dTGA)	A	0,29774	3,18689
Peak3(dTGA)	sigma	31,052	77,75278
Peak3(dTGA)	FWHM	73,12187	183,09381
Peak3(dTGA)	Height	0,00383	0,03168

*Nota.* Por medio de OriginPro 2015 se obtuvo como resultado cuadros de datos calculados por el programa que son necesarios para la determinación del porcentaje

de los componentes de la lignocelulosa. Donde valor del área bajo la curva de hemicelulosa para PR 980 fue de 0.52119, para el caso de celulosa da 1.6129 y en lignina con 0.2376, cómo se ilustra la figura 16 (a).

En el caso de la figura 16 (b), se observa un cuadro de valores del área bajo la curva de hemicelulosa en CC 85-92 de 0.61589, para la celulosa se mira una cantidad de 1.84668 y para lignina de 0.2863.

Por último, como se mira en la figura 16 (c) en la variedad de caña de azúcar de CB 49-69, el cuadro de valores se aprecia un área bajo la curva de en hemicelulosa de 0.61214, para el caso de celulosa con 1.8833, teniendo al final una área de 0.29774 para la lignina.

En la tabla 15 son presentados los parámetros cinéticos escogidos para la construcción de los datos de las curvas modeladas (figura 15), donde para la variedad de CB 40.69 se obtuvo un valor de hemicelulosa de 21.91%, siendo este menor que CC 85-92 que tuvo 22.08%. En el caso de la celulosa de PR 980, tiene una mayor cantidad entre las tres variedades con 68.04%. Por último, en la lignina la variedad con más cantidad es CB 40-69 con 10.67%.

**Tabla 15**

*Parámetros Estructurales de Bagazos de Cada Variedad de Caña de Azúcar*

Variedad	Promedio Hemicelulosa [%]	Promedio Celulosa [%]	Promedio Lignina [%]
PR 980	21.96	68.04	9.99
CC 85-92	22.08	67.66	10.27
CB 40-69	21.91	67.42	10.67

Los resultados obtenidos, en relación con la hemicelulosa, están dentro de los rangos vistos por otros autores, sin embargo, en el caso de celulosa y lignina son

diferentes a los encontrados por Prabakaran (2017), quien con esta técnica determinó que la hemicelulosa es 20%-25%, celulosa de 45%-55%, y la lignina con 18%-24%. De igual manera, Rueda y Tannous (2017), encontraron una hemicelulosa al 30%, celulosa de 55% y lignina 15%, la variedad que más se acerca estos rangos es CC 40-69, con lignina de 10.67% y celulosa de 67.42%. Diferencias que pueden surgir a raíz de los métodos de cultivo como también por el tipo de suelo y las variables meteorológicas como se menciona anteriormente.

Por último, cabe recalcar que una mayor cantidad de celulosa y hemicelulosa es beneficiosa para la obtención de bioetanol por medio de un sistema que use la hidrólisis enzimática, como también una menor cantidad de lignina que aumenta los rendimientos de producción.

### **4.3. Comparación de la Generación de Energía del uso del Bagazo Entre cogeneración y Bioetanol del Ingenio Tababuela**

Con los cálculos de PCIH se encontró cuanta energía aporta cada una de las variedades de caña de azúcar, como también el valor energético que se extraen por tonelada de bagazo húmedo, además se determinó la cantidad de electricidad que se produce y el valor monetario anual que supone dicha producción energética.

En el caso de la hidrólisis enzimática los cálculos permitieron encontrar la cantidad de litros de bioetanol que cada variedad es capaz de producir por una tonelada de bagazo húmedo y el ingreso monetario anual en un sistema con el uso del 100% de la cantidad de agro-residuo producido por el ingenio y también para el caso en que se combina la producción de un 50-50% con un sistema de cogeneración.

#### **4.3.1 Energía por Cogeneración**

El PCIS fue posible obtenerlo gracias a los datos conseguidos de la cantidad de hidrógeno que cada una de las variedades poseen (tabla 13), datos necesarios para el cálculo en la ecuación 1, por medio de la cual se encontró que la variedad de PR

980 tiene un menor PCIS con una cantidad de 13.91 MJ/kg mientras que CB 40-69 supera a las demás con un valor de 15.54 MJ/kg, lo que es beneficioso para la producción de energía por combustión directa del bagazo húmedo.

Una vez fue encontrado el PCIS se logró conseguir los valores de PCIH obtenidos por medio del cálculo de la ecuación 2 con la relación de cantidad de humedad del bagazo de cada variedad de caña de azúcar (tabla 10). El PCIH, muestra que en CB 40-69 sigue siendo mayor de las tres variedades de caña de azúcar, lo que significa que se obtiene mayor energía en el sistema de cogeneración. En la tabla 16 se representa los datos.

**Tabla 16**

*Valor del Poder Calorífico Inferior Seco y Poder Calorífico Inferior Húmedo*

Variedad	PCIS Promedio [MJ/kg]	PCIH Promedio [MJ/kg]
PR 980	13.91	5.51
CC 85-92	13.95	5.55
CB 40-69	15.54	6.50

La energía obtenida de la combustión directa del bagazo húmedo para la producción eléctrica en el sistema de cogeneración demuestra que en el caso de la variedad PR 980, la energía que se obtiene de una tonelada de bagazo húmedo es de 5.51 GJ, para CC 85-92 es de 5.55 GJ y CB 40-69 con la mayor cantidad de energía de 6.50 GJ como se aprecia en la tabla 16, esto es posible ya que CB 40 69 posee el PCIH más alto.

El ingenio azucarero produce 330 toneladas de bagazo húmedo diariamente de las cuales el 90% es aprovechado en el sistema de cogeneración lo que significa que diariamente se usa 297 toneladas para que el sistema se mantenga operando normalmente. Se consideran 10 días del año para los protocolos de mantenimiento.

Además, se encontró que, del total de bagazo utilizado al día, un 69.28% corresponde al bagazo procedente de la variedad PR 980, el 8.14% pertenece a CC 85-92 y CB 40-69 aporta con el 22.58%, esto por razón de que el ingenio azucarero cosecha la caña de azúcar de las tres variedades en un lapso similar de tiempo.

La energía que aporta cada variedad al combustionar el bagazo húmedo de caña de azúcar es diferente por el PCIH que posee cada una, por esto, PR 980 diariamente genera 1.13 TJ, así mismo, CC 85-92 aporta con 0.13 TJ de igual manera CB 40-69 con 0.44 TJ, dando por resultando una producción diaria de energía de 1.7 TJ, por lo tanto, mensualmente se obtiene 51.6 TJ y anualmente un valor de 611.1 TJ.

Finalmente, la energía extraída de la combustión directa del agro-residuo por el total de superficie de cada variedad es diferente ya que PR 980 genera 601.67 TJ, para CC 85-92 da un valor de 71.27 TJ y en el caso de CB 40-69 posee un 231.59 TJ dando como resultado un total de 904.5 TJ, como se muestra a continuación en la tabla 17.

**Tabla 17**

*Energía Obtenida por Combustión Directa del Bagazo*

Variedad	Energía de combustión [GJ/t bagazo húmedo]	Energía de combustión por el 90% t bagazo húmedo-día [TJ]	Energía de combustión t bagazo húmedo-mes [TJ]	Energía de combustión t bagazo húmedo-año [TJ]	Energía de combustión de t bagazo húmedo del total de superficie cosechada [TJ]
PR 980	5.5	1.13	34.01	402.40	601.67
CC 85-92	5.55	0.13	4.03	47.66	71.27
CB 40-69	6.50	0.44	13.09	154.89	231.59
Total		1.7	51.1	605.0	904.5

La eficiencia con que la planta de cogeneración transforma la energía térmica en eléctrica es de un 40% (IANCEM, 2019), por lo tanto, se obtuvo una cantidad de energía eléctrica producida diariamente de 191.26 MWh, donde la variedad de caña de azúcar PR 980 aporta con 127.22 MWh, de igual manera CC 85-92 también

entrega 15.07 MWh, mientras CB 40-69 contribuye con 48.97 MWh. La energía eléctrica que se obtiene mensualmente es de 5.68 GWh y una producción anual de 67.22 GWh, dando por resultado un ingreso monetario de 4.75 MM USD año. Dinero que el ingenio azucarero evita pagar al sustentar el consumo energético mediante este sistema, como se muestra en la tabla 18.

**Tabla 18**

*Energía Eléctrica Producida por Combustión Directa del Bagazo Húmedo*

Variedad	Energía eléctrica día [MW h]	Energía eléctrica mes: [GWh]	Energía eléctrica año: [GWh]	MM USD/kWh-año
PR 980	125.95	3.78	44.71	3.16
CC 85-92	14.92	0.45	5.30	0.37
CB 40-69	48.48	1.45	17.21	1.22
Total	189.35	5.68	67.22	4.75

**4.3.2. Bioetanol por Hidrólisis Enzimática**

Para el caso supuesto de una planta de hidrólisis enzimática se hace uso del 100% del bagazo de caña de azúcar húmedo producido diariamente en el ingenio azucarero, lo que equivale a 330 t en un sistema que obtiene bioetanol a partir de células de *Trichoderma reesei* con un rendimiento al 80%.

Del total de bagazo utilizado se estima que PR 980 aporta con un total 69.28%, mientras que CC 85-92 le corresponde el 8.14% y CB 40-69 aporta con el 22.58%, y por último se toma en cuenta un tiempo anual de operación de 335 días asumiendo diez días por protocolos de mantenimiento.

Se demuestra una producción de bioetanol por tonelada de bagazo húmedo de caña de azúcar es desigual en cada una de las variedades resultantes de las cantidades diferentes de hemicelulosa y celulosa que estas variedades poseen (tabla 14), por lo tanto, PR 980 tiene mayor ventaja en rendimiento promedio de producción con 335.74 L, mientras que CC 85-92 obtiene una cantidad de 333.65 L, por último, la

producción de menor cantidad corresponde a CB 40-69 ya que solamente puede generar 325.90 L.

La producción diaria de bioetanol procedente del uso de bagazo de caña de azúcar húmedo es de 110 ML, de los cuales PR 980 aporta con 76.75 ML de igual manera CC 85-96 con 8.96 ML mientras que CB 40-69 entrega 24.29 ML, dando una producción mensual de 3 300.12 ML, y anualmente una cantidad de 39.05 MML, dando un ingreso monetario anual de 17.65 MM USD. Los datos se representan en la tabla 19.

**Tabla 19**

*Producción de Bioetanol por Variedades e Ingreso Monetario*

Variedad	Bioetanol [L/t bagazo húmedo]	Bioetanol diario [ML]	Bioetanol mensual [ML]	Bioetanol anual [MM L]	Ingreso Monetario [MM USD/L bioetanol-año]
PR 980	335.74	76.75	2302.60	27.25	12.32
CC 85-92	333.65	8.96	268.85	3.18	1.44
CB 40-69	325.90	24.29	728.67	8.62	3.90
Total		110.00	3300.12	39.05	17.65

#### **4.3.3 Producción Bioenergética por Cogeneración e Hidrólisis Enzimática al 50-50%**

Para el caso en que se usa el agro-residuo de caña de azúcar en un 50-50% para la cogeneración e hidrólisis enzimática respectivamente implica que, a cada sistema de generación bioenergética le corresponde 165 t del bagazo, donde el 69.28% es proporcionado por la variedad PR 980 al igual que CC 85-92 y CB 40-69 contribuyen en un 8.14% y 22.58% respectivamente.

En la producción de energía eléctrica obtenida por el sistema de cogeneración, se aprecia que de la energía por combustión directa del bagazo de caña de azúcar húmedo de la variedad PR 980 se transforma a 69.97 MWh, lo mismo sucede con CC 85-92 obteniendo 8.29 MWh, como también CB 40-69 con 26.93 MWh dando



un total diario de 105.19 MWh, determinando que mensualmente produce un 3.16 GWh y una cantidad anual de 37.34 GWh, como se ve en la tala 20.

**Tabla 20**

*Energía eléctrica producida e Ingreso Monetario*

Variedad	Energía eléctrica día [MW h]	Energía eléctrica mes: [GWh]	Energía eléctrica año: [GWh]	MM USD/kWh-año
PR 980	69.97	2.10	24.84	1.41
CC 85-92	8.29	0.25	2.94	0.17
CB 40-69	26.93	0.81	9.56	0.57
Total	105.19	3.16	37.34	2.15

El bioetanol obtenido del sistema de hidrólisis enzimática de eficiencia al 80% se obtiene una producción diaria de 55 ML de los cuales PR 980 aporta con 38.30 ML, mientras que CC 85-92 entrega 4.48 ML y por último esta CB 40-69 con 12.14 ML. La producción mensual es de 1.65 MML llegando a un valor anual de 8.95 MML. Los datos se aprecian con mayor claridad en la tabla 21.

**Tabla 21**

*Producción de Bioetanol por Variedad e Ingreso Monetario*

Variedad	Bioetanol diario [ML]	Bioetanol mensual [MML]	Bioetanol anual [MM L]	Ingreso Monetario [MM USD/L bioetanol-año]
PR 980	38.38	1.15	13.82	6.24
CC 85-92	4.48	0.13	1.61	0.73
CB 40-69	12.14	0.36	4.37	1.98
Total	55.00	1.65	19.80	8.95

Con la combinación 50-50% para la producción de energía eléctrica y de bioetanol se obtiene diferentes ingresos monetarios, ya que la cantidad de dinero que entra al producir electricidad es equivalente a 2.15 MM USD/kWh-año mientras que para

el biocombustible se obtiene un ingreso de 8.95 MM USD/L bioetanol año, dando por resultado un ingreso monetario unificado de 11.10 MM USD al año.

Como ya se ha demostrado el rendimiento energético es desigual en cada una de las variedades de caña de azúcar, esto es debido a las diferencias en la composición química, de la cantidad de hemicelulosa, celulosa y lignina, además del PCSS, esto influye también en la eficiencia de producción de cada sistema (cogeneración e hidrólisis enzimática)

En el caso de la cogeneración, se ha demostrado que la variedad de caña de azúcar con características mejores de PCSS, cantidad de ceniza bajos, materiales volátiles altos, entre otros, es CB 40-69, ya que tiene la capacidad de aportar con un valor de energía de 6.50 GJ por tonelada de bagazo húmedo, extraída de la combustión directa del bagazo, mientras que, PR 980 se halla por debajo con un valor energético de 5.5 GJ/t bagazo húmedo (tabla 16).

Lo contrario sucede en la hidrólisis enzimática, debido a que la variedad de caña de azúcar con un mejor rendimiento de producción de bioetanol es PR 980, esto es gracias a las mayores cantidades de celulosa, hemicelulosa y una menor cantidad de lignina, logrando un resultado de producción de 335.74 litros por tonelada de bagazo húmedo y en este sistema se obtiene un rendimiento inferior por parte de CB 40-69 con 325.90 L (tabla 18)

Por lo tanto, las características térmicas junto con la composición química de cada variedad de caña de azúcar determinan los rendimientos de producción dependiendo del tipo de sistema que se utilice, ya que, como se ha comprobado, la producción de energía eléctrica y de bioetanol derivado del bagazo pueden ser muy eficientes en un caso y en otro puede ser menor, Esto depende de la tecnología que cada proceso emplea, la composición química y características térmicas del agro-residuo.

## CAPÍTULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1. Conclusiones

Los tallos de caña de azúcar con diámetros más anchos pertenecen a la variedad CB 40.69 con medidas promedio en la base de 38.87 mm, a la parte media le corresponde un ancho de 37.41 mm y en la punta tiene 35.07 mm, la cual posee además los tallos más largos con un promedio de longitud de 2.83 m, cuyas características morfológicas determinaron que es la variedad con mayor producción de caña de un promedio de 157.91 t/ha, lo que significa también una mayor producción de bagazo húmedo con 55.27 t/ha, considerándose esta como la de mejor rendimiento por cosecha.

La composición química de la caña de azúcar demostró que la variedad CC 85-92 tiene una cantidad de nitrógeno del 0.21% y de azufre de 0.17%, inferior en comparación con las otras variedades, indicando de esta manera que en la quema del bagazo por combustión directa no produce grandes cantidades de emisiones de NO<sub>x</sub> y SO<sub>x</sub>.

Al observar la composición química de la variedad CB 40-69 se demostró que tiene el menor porcentaje de ceniza de 5.43% y mayor cantidad de materiales volátiles de 82.68%, por lo tanto, obtiene una mayor cantidad de PCSS de 17.37 MJ/kg, demostrando así que es la variedad más eficiente en la producción de energía térmica al someter al bagazo de caña de azúcar a procesos de combustión directa, generando un total de 6.50 GJ/t <sub>bagazo húmedo</sub> en un sistema de cogeneración.

Finalmente, la cantidad en los componentes de la lignocelulosa permitió observar que la variedad PR 980 destaca de entre las tres variedades ya que indica una gran cantidad de celulosa de 68.04% con una hemicelulosa del 21.96%, y lignina de 9.99%, posicionándola como la variedad con una mayor producción de bioetanol con un total de 335.74 L/t <sub>bagazo-húmedo</sub> por medio de hidrólisis enzimática.

En la producción eléctrica por cogeneración se encontró que, del total del agro-residuo usado le corresponde un 69.28% al bagazo procedente de la variedad PR 980, un 8.14% pertenece a CC 85-92 y el 22.58% restante corresponde a CB 40-69, lo que determina una producción diaria de 189.35 MWh, mensualmente se obtiene 5.68 GWh y anualmente alcanza 67.22 GWh, equivaliendo a un ingreso monetario al año de 4.75 millones de dólares, dinero que el ingenio azucarero se ahorra al sustituir directamente la energía distribuida por Sistema Nacional Interconectado (SNI).

En el caso supuesto de la producción de bioetanol por medio de la hidrólisis enzimática que utiliza células de *Trichoderma reesei* con un rendimiento al 80% aprovechando todo el bagazo producido se tiene una generación diaria de 110 ML, mensualmente la cantidad es de 3300.12 ML y al año se consigue 39.05 MML de bioetanol, lo que resulta en un ingreso monetario de 17.65 millones de dólares superior al obtenido por cogeneración.

Por último, en el escenario hipotético de una producción eléctrica con el uso del 50% del bagazo de caña producido en la obtención de electricidad y el otro 50% restante empleado para la producción de bioetanol, se obtuvo una producción anual de electricidad de 37.34 GWh, y una cantidad de 19.80 MML de bioetanol al año, alcanzando un ingreso monetario de 11.10 MM USD año, cifra que demuestra que la combinación de estos dos sistemas puede ser beneficioso para el ingenio azucarero.

Al utilizar la mayor cantidad del agro-residuo de caña de azúcar en un sistema de cogeneración se observa que se obtiene una buena porción de energía eléctrica que se usa para autosustentar el suministro eléctrico en el proceso de producción pero que cuyo beneficio en términos monetarios es menor si se compara con la cantidad de dinero que se obtiene de la conversión del bagazo a bioetanol por hidrólisis enzimática. Sin embargo, al combinar los dos sistemas se obtiene una cantidad de capital considerable que podría beneficiar al ingenio azucarero.

## **5.2. Recomendaciones**

Realizar estudios de caracterización de agro-residuos de las variedades de caña de azúcar PR 61-632, RD 75-11, PR 10-16, EC-02, CC 93-4181, entre otras, con fines bioenergéticos en procesos de cogeneración como también por hidrólisis enzimática para la obtención de bioenergía auto sustentable enfocada a la diversificación de la matriz energética del Ecuador.

Realizar estudios detallados por medio de análisis termogravimétricos (TGA) complementados por ensayos de Espectroscopía de Infrarrojo Cercano (NIR) para establecimientos más precisos de la composición lignocelulósica y los efectos que produce debido a la concentración de cada elemento en la estructura química del bagazo de caña de azúcar enfocado procesos de producción de bioetanol.

Realizar experimentaciones con diferentes pretratamientos de descomposición de la lignina presente en la caña de azúcar de cada variedad para el mejoramiento de los rendimientos de proceso de fabricación de bioetanol en un sistema de hidrólisis enzimática.

## REFERENCIAS

- Agencia Internacional de Energía AIE. (2016). *AIE Atlas de energía*. Obtenido de:  
<http://energyatlas.iea.org/#tellmap/-1076250891/2>
- Agencia Internacional de Energía AIE. (2018). *La bioenergía moderna es la gigante ignorada del campo de las energías renovables*. Obtenido:  
<https://www.iea.org/renewables2018/>
- Agencia Internacional de Energía AIE. (2018). *Total Primary Energy Supply (TPES) by source*. Obtenido de:  
<https://www.iea.org/statistics/?country=ECUADOR&year=2016&category=Key%20indicators&indicator=TPSbySource&mode=chart&categoryBrowse=false&dataTable=BALANCES&showDataTable=true>
- Agencia Internacional para las Energías Renovables IRENA. (2016). *Renewable Capacity Statistics 2016*. Obtenido de: [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2016/RE\\_stats\\_highlights\\_2016.pdf?la=en&hash=8BID790C526D4E2882DB7F4C168BDFBDFFEA0CC](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2016/RE_stats_highlights_2016.pdf?la=en&hash=8BID790C526D4E2882DB7F4C168BDFBDFFEA0CC)  
C
- Agüero, A., Pisa, J., Agüero, C. y Torres, A. (2020). *Poder Calorífico del Bagazo de Caña de Azúcar*. Recuperado de:  
[https://www.academia.edu/11636411/Extensi%C3%B3n\\_Poder\\_Calor%C3%ADfico\\_del\\_Bagazo\\_de\\_Ca%C3%B1a\\_de\\_Az%C3%BAcar](https://www.academia.edu/11636411/Extensi%C3%B3n_Poder_Calor%C3%ADfico_del_Bagazo_de_Ca%C3%B1a_de_Az%C3%BAcar)
- Almenares, J. y Serrat, M. (2008) Aspectos tecnológicos generales para la conversión a etanol de la biomasa lignocelulósica. *Tecnología Química, vol. XXVIII*. (núm. 3). 63-70. Recuperado de:  
<http://www.redalyc.org/pdf/4455/445543757008.pdf>
- Almenares, J., Ngoma, F. y Serrat, M. (2011). *Aspectos tecnológicos generales para la conversión a etanol de la biomasa lignocelulósica II*. Obtenido de:

[http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2224-61852011000300012](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-61852011000300012)

Andoni, M., Robu, V., Flynn, D., Abram, S., Geach, D., Jenkins, D., McCallum, P., y Peacock, A. (2019). Blockchain technology in the energy sector: A systematic review of challenges and opportunities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 100 (2019) 143–174144

Balance Nacional de Energía Eléctrica – ARCONEL. (2020). Balance Nacional de Energía Eléctrica. Obtenido de: <https://www.regulacionelectrica.gob.ec/balance-nacional/>

Banco Mundial. (2014). Consumo de energía procedente de combustibles fósiles (% del total). Recuperado de: <https://datos.bancomundial.org/indicador/EG.USE.COMM.FO.ZS>

Becerra, A., Buitrago, A. y Pinto, P. (2016). Sostenibilidad del aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar en el Valle del Cauca, Colombia. *Ingeniería Solidaria*, vol. 12. (20). 133-149. doi: <http://dx.doi.org/10.16925/in.v12i20.1548>

Bedia, J., Rosas, J., Marqués, M., Gerrero, O., Ruiz, L., Rodriguez, J. y Cordero, T. (2009). Materiales de carbono a partir de la lignina. Recuperado de: [http://www.gecarbon.org/Boletines/articulos/boletinGEC\\_012\\_art.1.pdf](http://www.gecarbon.org/Boletines/articulos/boletinGEC_012_art.1.pdf)

Bravo, E. y Bonilla, N. (2011). Las nuevas políticas de agrocombustibles en el Ecuador. Obtenido de: [https://www.academia.edu/5078106/Pachamama\\_en\\_fuego\\_LAS\\_NUEVAS\\_POL%C3%8DTICAS\\_DE\\_AGROCOMBUSTIBLES\\_EN\\_EL\\_ECUADOR](https://www.academia.edu/5078106/Pachamama_en_fuego_LAS_NUEVAS_POL%C3%8DTICAS_DE_AGROCOMBUSTIBLES_EN_EL_ECUADOR)

Calle, J., Ulloa, E. (2008). Sistema de generación de energía eléctrica mediante bagazo de caña de azúcar aplicado al Valle de Yunguilla. Recuperado de: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/287>

- Cardona, C., Danches, O., Montoya, I. y Quintero, J. (2005). Producción de etanol carburante. *Materias primas convencionales*, 48.
- Carrier, M., Loppinet-Serani, A., Denux, D., Lasnier, J., Ham-Pichavant, F., Cansell, F. y Aymonier, C. (2011). Thermogravimetric analysis as a new method to determine the lignocellulosic composition of biomass. Doi: 10.1016/j.biombioe.2010.08.067
- Castaño, P. y Mejía, C. (2008). Producción de etanol a partir de almidón de yuca utilizando la estrategia de proceso sacarificación- fermentación simultáneas (ssf). *VITAE*. 15. (2). 251-258
- Castro, M. (2012). Reflexiones en torno al desarrollo de los biocombustibles en Ecuador. Recuperado de: <http://www.olade.org/sites/default/files/CIDA/Biocomustibles/Otros/CEDA%20Reflexiones%20desarrollo%20Biocombustibles%20Ecuador.pdf>
- Castro, Y. (2014). Aprovechamiento de biomasa lignocelulósica, algunas experiencias de investigación en Colombia. Recuperado de: [https://www.researchgate.net/profile/Yineth\\_Pineros-Castro/publication/279448880\\_Aprovechamiento\\_de\\_biomasa\\_lignocelulosica\\_algunas\\_experiencias\\_de\\_investigacion\\_en\\_Colombia/links/5728c00608aef5d48d2c8661/Aprovechamiento-de-biomasa-lignocelulosica-algunas-experiencias-de-investigacion-en-Colombia.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Yineth_Pineros-Castro/publication/279448880_Aprovechamiento_de_biomasa_lignocelulosica_algunas_experiencias_de_investigacion_en_Colombia/links/5728c00608aef5d48d2c8661/Aprovechamiento-de-biomasa-lignocelulosica-algunas-experiencias-de-investigacion-en-Colombia.pdf)
- Centro Boliviano de Estudios Multidisciplinarios CEBEM. (2008). Biocombustibles de segunda generación. Obtenido de: <https://www.revistasbolivianas.org.bo/pdf/rvr/v2n2/a05.pdf>
- Centro Ecuatoriano de Derecho Ambiental CEDA. (2011). Hacia una matriz energética diversificada en Ecuador. Obtenido de: <http://biblioteca.olade.org/opac-tmpl/Documentos/cg00344.pdf>
- Cofre, R. (2016). Composición florística, estructura y estimación de la biomasa vegetal de los páramos de Cajanuma, parque Nacional Podocarpus.



Obtenido de:  
<https://www.semanticscholar.org/paper/Composici%C3%B3n-flor%C3%ADstica%2C-estructura-y-estimaci%C3%B3n-de-Betancourt-Rodrigo/349e9d5e84b1d45b3cbd45da6955395fe16c46ab>

Comité Europeo de Normalización CEN. (2009). Biocombustibles fósiles determinación del poder calorífico. AENOR. 8.

Corporación Eléctrica del Ecuador CELEC (2017). Prototipo de Planta de Cogeneración – ORC. Recuperado de:  
<https://www.celec.gob.ec/termopichincha/index.php/noticias/471-presentacion-del-prototipo-de-planta-de-cogeneracion-orc>

Corporación Eléctrica del Ecuador CELEC. (2016). Biomasa: una alternativa energética. Obtenida de:  
<https://www.celec.gob.ec/termopichincha/index.php/noticias/403-masa-una-alternativa-energetica>

Corporación Eléctrica del Ecuador CELEC. (2019). Proyecto biocombustible. Obtenido de: <https://www.celec.gob.ec/termopichincha/index.php/retos-empresariales/proyectos-de-generacion-no-convencional/proyecto-biocombustible>

Corporación para la Investigación Energética CIE. (2019). Bioenergía. Recuperado de: <http://energia.org.ec/cie/energia-biomasa/>

Cuervo, L., Folch, J. y Quiroz, R. (2009). Lignocelulosa Como Fuente de Azúcares Para la Producción de Etanol. Recuperado de:  
[https://www.researchgate.net/profile/Jorge\\_Folch-Mallol/publication/266610846\\_Lignocelulosa\\_Como\\_Fuente\\_de\\_Azucars\\_Para\\_la\\_Produccion\\_de\\_Etanol/links/54451eba0cf2f14fb80e9651.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Jorge_Folch-Mallol/publication/266610846_Lignocelulosa_Como_Fuente_de_Azucars_Para_la_Produccion_de_Etanol/links/54451eba0cf2f14fb80e9651.pdf)

Cutimbo M. (2017). Estudio exploratorio del proceso de combustión de carbón y biomasa mediante análisis termogravimétrico para su aprovechamiento en

la generación de calor (tesis maestría). Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia

Dariva, T., Da Silva, M. y Marchezan, E. (1986). Competição de cultivares de cana-de-açúcar em santa maria, RS. *Brasilia*. (5):515-522.

Duarte, Y. (2008). Evaluación de la etapa de Pretratamiento e Hidrólisis Enzimática para la obtención de etanol a partir del bagazo de la caña de azúcar. Universidad Central Marta Abreu de las Villas. Santa Clara. Cuba. *Revista de Ciencias Ambientales y Recursos Naturales*. Vol.2. (No.6). 27-41. Recuperado de: [https://www.researchgate.net/publication/323959087\\_Aprovechamiento\\_de\\_los\\_residuos\\_agroindustriales\\_y\\_su\\_contribucion\\_al\\_desarrollo\\_sostenible\\_de\\_Mexico](https://www.researchgate.net/publication/323959087_Aprovechamiento_de_los_residuos_agroindustriales_y_su_contribucion_al_desarrollo_sostenible_de_Mexico)

Empresa Provincial de Energía de Córdoba EPEC. (2019). Energía renovable: la biomasa. Recuperado de: <https://www.epec.com.ar/docs/educativo/institucional/biomasa.pdf>

Energía Biomasa EB. (2008). Energías Renovables 2008 - Energía Biomasa. Recuperado de: [http://www.energia.gov.ar/contenidos/archivos/publicaciones/libro\\_energia\\_biomasa.pdf](http://www.energia.gov.ar/contenidos/archivos/publicaciones/libro_energia_biomasa.pdf)

Energías Renovables. (2018). Biomasa. Presentamos la liga mundial de la biomasa eléctrica: <https://www.energias-renovables.com/biomasa/presentamos-la-liga-mundial-de-la-biomasa-20170528>

Espinoza, J., y Pelaez, M. (diciembre 2015). Energías renovables en el Ecuador. Obtenido de: [https://www.researchgate.net/publication/286756139\\_Estado\\_de\\_uso\\_de\\_la\\_biomasa\\_para\\_la\\_produccion\\_de\\_bioenergia\\_biocombustibles\\_y\\_bioproductos\\_en\\_Ecuador?enrichId=rgreq-322f540ea5de6d6238aca38f689720d6-XXX&enrichSource=Y292ZXJQYWdlOzI4NjclNjEzOTtBUzozMTc3](https://www.researchgate.net/publication/286756139_Estado_de_uso_de_la_biomasa_para_la_produccion_de_bioenergia_biocombustibles_y_bioproductos_en_Ecuador?enrichId=rgreq-322f540ea5de6d6238aca38f689720d6-XXX&enrichSource=Y292ZXJQYWdlOzI4NjclNjEzOTtBUzozMTc3)

- Fonseca S., Rodríguez H. y Camargo G. (2017). Caracterización de residuos de maíz del municipio de Ventaquemada, Colombia. Recuperado de: [http://www.exeedu.com/publishing.cl/av\\_cienc\\_ing/2017/Vol8/Nro2/4-ACI1284-16-full.pdf](http://www.exeedu.com/publishing.cl/av_cienc_ing/2017/Vol8/Nro2/4-ACI1284-16-full.pdf)
- García, J. y García, J. (2006). Biocarburantes líquidos. Biodiesel y bioetanol. Pág. 76. Obtenido de: [http://www.madrimasd.org/informacionidi/biblioteca/Publicacion/doc/VT/vt4\\_Biocarburantes\\_liquidos\\_biodiesel\\_y\\_bioetanol.pdf](http://www.madrimasd.org/informacionidi/biblioteca/Publicacion/doc/VT/vt4_Biocarburantes_liquidos_biodiesel_y_bioetanol.pdf)
- Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal de San Miguel de Ibarra (GAD-I). (2019). Datos Demográficos. Recuperado de: <https://www.ibarra.gob.ec/web/index.php/ibarra1234/informacion-general/660-datos-demograficos>
- Golato, M. (2014). Metodologías termogravimétricas y fusibilidad de cenizas. Obtenido de: <http://www.eeaoc.org.ar/upload/publicaciones/archivos/484/20150122101127000000.pdf>
- González, A., Jiménez, I., Rodríguez, M., Restrepo, S. y Gómez, J. (2008). Biodiesel: Una mirada a la contribución de la Universidad de los Andes. Obtenido de: <http://www.scielo.org.co/pdf/ring/n28/n28a11.pdf>
- Hernández, J., Silva, E., Escobar, C., García, J., y Barrera, J. (2016). Bioenergía y biorrefinerías para caña de azúcar y palma de aceite. Obtenido de: [https://www.researchgate.net/profile/Juan\\_Barrera\\_Hernandez/publication/312498278\\_Bioenergia\\_y\\_biorrefinerias\\_para\\_cana\\_de\\_azucar\\_y\\_palma\\_de\\_aceite\\_Bioenergy\\_and\\_Biorefineries\\_for\\_Sugar\\_Cane\\_and\\_Oil\\_Palm/links/587f863b08ae4445c072596c/Bioenergia-y-biorref](https://www.researchgate.net/profile/Juan_Barrera_Hernandez/publication/312498278_Bioenergia_y_biorrefinerias_para_cana_de_azucar_y_palma_de_aceite_Bioenergy_and_Biorefineries_for_Sugar_Cane_and_Oil_Palm/links/587f863b08ae4445c072596c/Bioenergia-y-biorref)
- Huang, C., Han, L., Liu, X. y Ma, L. (2011). The rapid estimation of cellulose, hemicellulose, and lignin contents in rice straw by near infrared spectroscopy. *Energy Sources, Part A*, (33), 114–120.

Ingenio Azucarero del Norte Compañía de Economía Mixta IANCEM. (2012). Auditoría ambiental inicial (estudio de impacto ambiental expost) y plan de manejo ambiental del “Ingenio azucarero del norte compañía de economía mixta (IANCEM)”. Obtenido de: <https://vdocuments.net/auditora-ambiental-inicial-ingenio-de-la-importancia-de-impactos-ambientales.html>

Ingenio Azucarero del Norte Compañía de Economía Mixta IANCEM. (2016). Datos estadísticos-Caña registrada. Obtenido de: [https://www.bolsadevaloresguayaquil.com/info\\_emisores.asp?emisor=INGENIO%20AZUCARERO%20DEL%20NORTE%20COMPA%D1%CD A%20DE%20ECONOM%CDA%20MIXTA%20IANCEM&logo=&emicodi=R.33](https://www.bolsadevaloresguayaquil.com/info_emisores.asp?emisor=INGENIO%20AZUCARERO%20DEL%20NORTE%20COMPA%D1%CD A%20DE%20ECONOM%CDA%20MIXTA%20IANCEM&logo=&emicodi=R.33)

Ingenio Azucarero del Norte Compañía de Economía Mixta IANCEM. (2019). Cogeneración. Obtenido de: [https://www.bolsadevaloresguayaquil.com/info\\_emisores.asp?emisor=INGENIO%20AZUCARERO%20DEL%20NORTE%20COMPA%D1%CD A%20DE%20ECONOM%CDA%20MIXTA%20IANCEM&logo=&emicodi=R.33](https://www.bolsadevaloresguayaquil.com/info_emisores.asp?emisor=INGENIO%20AZUCARERO%20DEL%20NORTE%20COMPA%D1%CD A%20DE%20ECONOM%CDA%20MIXTA%20IANCEM&logo=&emicodi=R.33)

Instituto Nacional de Estadística y Geografía de México INEGI. (2012). Análisis a nivel nacional de la producción de caña de azúcar. Obtenido de: [http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod\\_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/historicos/380/702825118518/702825118518\\_2.pdf](http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/historicos/380/702825118518/702825118518_2.pdf)

International Renewable Energy Agency IRENA. (2018). Renewable Capacity Statistics 2018. Obtenido de: [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2018/Mar/IRENA\\_RE\\_Capacity\\_Statistics\\_2018.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2018/Mar/IRENA_RE_Capacity_Statistics_2018.pdf)

- Islas, J. y Martínez, A. (2junio, 2009). Bioenergía. Obtenido de: [https://www.revistaciencia.amc.edu.mx/images/revista/61\\_2/PDF/Bioenergía.pdf](https://www.revistaciencia.amc.edu.mx/images/revista/61_2/PDF/Bioenergía.pdf)
- Jiménez, E., Prieto, J., Acevedo, O. y Rodríguez, R. (2017). Obtención de pulpa de celulosa a partir de residuos de Agave salmiana B. Otto ex Salm. Optimización. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/pdf/496/49650910031.pdf>
- Jin, X., Chen, X., Shi, C., Li, M., Guan, Y., Yu, C., Yamada, T., Sacks, E. y Peng, J. (2017). Determination of hemicellulose, cellulose and lignin content using visible and near infrared spectroscopy in Miscanthus sinensis. Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2017.05.047>
- Karnataka J. (2007). Bioethanol Production from Enzyme Hydrolysed Agroresidues. *Sci. 20* (4). 871-872
- Li, X., Sun, C., Zhou, B. y He, Y. (2015). Determination of Hemicellulose, Cellulose and Lignin in Moso Bamboo by Near Infrared Spectroscopy. Doi: 10.1038/srep17210
- Llerena, O. (2018). Análisis energético, exergético y económico de un sistema de cogeneración. Caso para una planta azucarera de San Pablo. *INGENIUS*, (19), 29-39. Recuperado de: [https://www.researchgate.net/publication/322219488\\_Analisis\\_energetico\\_exergetico\\_y\\_economico\\_de\\_un\\_sistema\\_de\\_cogeneracion\\_Caso\\_para\\_una\\_planta\\_azucarera\\_de\\_San\\_Pablo](https://www.researchgate.net/publication/322219488_Analisis_energetico_exergetico_y_economico_de_un_sistema_de_cogeneracion_Caso_para_una_planta_azucarera_de_San_Pablo)
- López, C. (2002). Biomasa el recorrido de la energía. Recuperado de: <https://www.fenercom.com/pdf/aula/recorrido-de-la-energia-biomasa.pdf>
- Macías, R., Chejne, F., Montoya, J y Blanco, A. (2014). Gasificación de bagazo de caña y carbón en planta piloto. *MUTIS. Vol. 4* (1). 24-32

- Manals E., Penedo, M. y Salas, D. (2015). Caracterización del bagazo de caña como biomasa vegetal. Obtenido de: <http://scielo.sld.cu/pdf/rtq/v35n2/rtq10215.pdf>
- Manals, E., Penedo, M. y Giralt, G. (2011). Análisis termogravimétrico y térmico diferencial de diferentes biomasa vegetales. Obtenido de: <https://www.redalyc.org/pdf/4455/445543773005.pdf>
- Mejías, N., Orozco, E. y Galaan, N. (2016). Aprovechamiento de los residuos agroindustriales y su contribución al desarrollo sostenible de México. Obtenido de: [https://www.ecorfan.org/spain/researchjournals/Ciencias\\_Ambientales\\_y\\_Recursos\\_Naturales/vol2num6/Revista\\_de\\_Ciencias\\_Ambientales\\_y\\_Recursos\\_Naturales\\_V2\\_N6\\_4.pdf](https://www.ecorfan.org/spain/researchjournals/Ciencias_Ambientales_y_Recursos_Naturales/vol2num6/Revista_de_Ciencias_Ambientales_y_Recursos_Naturales_V2_N6_4.pdf)
- METTLER TOLEDO. (2020). Análisis termogravimétrico (TGA). Obtenido de: [https://www.mt.com/es/es/home/library/on-demand-webinars/lab-analytical-instruments/Thermogravimetric\\_Analysis.html](https://www.mt.com/es/es/home/library/on-demand-webinars/lab-analytical-instruments/Thermogravimetric_Analysis.html)
- METTLER TOLEDO. (2020). Análisis elemental CHNSO: preparación de muestras. Obtenido de: [https://www.mt.com/mx/es/home/applications/Laboratory\\_weighing/chnso\\_elemental\\_analysis.html#know-how](https://www.mt.com/mx/es/home/applications/Laboratory_weighing/chnso_elemental_analysis.html#know-how)
- Ministerio de Agricultura y Ganadería MAG. (2018). Cifras agro-productivas. Obtenido de: <http://sipa.agricultura.gob.ec/index.php/cifras-agroproductivas>
- Montoya, J., Chejne, F., Castillo, E., Acero, J., Gómez, C., Sarmiento, J., Valdés, C., Garzón, L., Osorio, J., Tirado, D., Blanco, A., Moreno, N., Marrugo, G. y Ospina, Y. (2014). Pirólisis rápido de biomasa. Recuperado de: <https://www.researchgate.net/publication/281976634>
- Muñoz, D., Cuatin, F. y Pantoja, A. (2014). Potencial energético de residuos agroindustriales del departamento del Cauca, a partir del poder calorífico

inferior. Obtenido de:  
<http://www.scielo.org.co/pdf/bsaa/v11n2/v11n2a18.pdf>

Muñoz, F., Cancino, J., Rodríguez, R. y Olave, R. (2016). Evaluación de crecimiento, rendimiento y calorimetría de la biomasa de *Miscanthus x giganteus* (Poaceae) establecimiento en el centro-sur de Chile. Obtenido de:  
[https://www.researchgate.net/publication/325603955\\_Evaluacion\\_de\\_crecimiento\\_rendimiento\\_y\\_calorimetria\\_de\\_biomasa\\_de\\_Miscanthus\\_x\\_giganteus\\_Poaceae\\_establecido\\_en\\_el\\_centro-sur\\_de\\_Chile](https://www.researchgate.net/publication/325603955_Evaluacion_de_crecimiento_rendimiento_y_calorimetria_de_biomasa_de_Miscanthus_x_giganteus_Poaceae_establecido_en_el_centro-sur_de_Chile)

Neri, F. (2002). Caracterización y cinética de pirolisis del bagazo de caña de azúcar. Obtenido de:  
<https://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1004/2303/1/Tesis%20M.%20Francisco%20Neri.pdf>

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura FAO. (2013). La bioenergía y los biocombustibles. Obtenido de:  
<http://www.fao.org/3/a-ar589s.pdf>

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura FAO. (2011). Estado del arte y novedades de la bioenergía en el Ecuador. Pag, 58.

Prabakaran, R. (2017). Investigation in moisture characteristics of bagasse. Investigation in moisture characteristics of bagasse. Recuperado de:  
<http://textilelearner.blogspot.pe/2017/03/characteristics-sugarcane-bagasse.html>

Programa de Naciones Unidas PNUD. (2017). Panamá el futuro que queremos. Obtenido de:  
[http://www.pa.undp.org/content/dam/panama/docs/Documentos\\_2017/undp-pa-atlas-energia.pdf](http://www.pa.undp.org/content/dam/panama/docs/Documentos_2017/undp-pa-atlas-energia.pdf)

Queiroz, L. (1959). Novas Variedades de Cana-de-Açúcar. Recuperado de:  
<http://www.scielo.br/pdf/aesalq/v16/14.pdf>

- Ramírez, A. (2008). Cultivos para producción sostenible de biocombustibles: Una alternativa para generación de empleos e ingresos. Obtenido de: <http://www.bibalex.oreg/Search4Dev/files/289330/120295.pdf>
- Ramírez, E y García, J. (2019). Caracterización de la biomasa agro-residual del maíz suave (*Zea Mays*) en la provincia de Imbabura para producción de bioenergía (tesis de grado). Universidad Técnica. Ibarra, Ecuador.
- Ramírez, J., Insuasty, O. y Murcia, M. (2014). Variedades de caña de azúcar empleadas para la agroindustria panelera de Colombia. Recuperado de: [https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/12621/74247\\_65666.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/12621/74247_65666.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Rangel, H. (1976). Curso sobre producción de caña panelera. Recuperado de: [https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/.../79590\\_1359.pdf](https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/.../79590_1359.pdf)
- Renewable Energy Policy Network for the 21st century REN21. (2016). Energías renovables 2016. Obtenido de: [http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2016/06/GSR\\_2016\\_KeyFindings\\_SPANISH.pdf](http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2016/06/GSR_2016_KeyFindings_SPANISH.pdf)
- Romero, A. (2010). Aprovechamiento de la biomasa como fuente de energía alternativa a los combustibles fósiles. *Rev.R.Acad.Cienc.Exact.Fís.Nat. (Esp) Vol. 104*, (Núm. 2), pp 331-345
- Rueda, Y. y Tannous, K. (2017). Análisis cinético de la descomposición térmica de biomásas aplicando un esquema de reacciones paralelas independientes. *, UIS Ingenierías. vol. 16. (no. 2).* 119-128
- Sáenz, D. (2013). Industrialización de panela granulada orgánica en una planta de producción, ubicada en el cantón Salinas-Ibarra (tesis grado). Universidad de las Américas). Quito, Ecuador
- Salinas, E. y Gasca, V. (2009) Los biocombustibles. *El Cotidiano*. Núm. 157, pp. 75-82. Recuperado de: <http://www.redalyc.org/pdf/325/32512739009.pdf>



- Secalla, A. y Olivera, H. (1963). Variedades de cana-de-açúcar V - série de ensaios realizados no período 1957-1960 <sup>(1)</sup>. *BRAGANTIA*. Vol. (22). N.º 47. 584-612. Recuperado de: <http://www.scielo.br/pdf/brag/v22nunico/55.pdf>
- Secalla, A. y Olivera, H. (1967). Variedades de cana-de-açúcar VII — série de ensaios realizado no período de 1959 a 1962 <sup>(1)</sup>. *BRAGANTIA*. Vol. (26). N.º 15. 198-212. Recuperado de: <http://www.scielo.br/pdf/brag/v26nunico/15.pdf>
- Secretaria de Energía de México SENER. (2016). Prospectiva de energías renovables 2016-2030. Obtenido de: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/177622/prospectiva\\_de\\_Energ\\_as\\_Renovables\\_2016-2030.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/177622/prospectiva_de_Energ_as_Renovables_2016-2030.pdf)
- Secretaria Nacional de Planificación y Desarrollo – Senplades. (2017). Plan Nacional de Desarrollo 2017-2021-toda una Vida. Obtenido de: [http://www.planificacion.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2017/10/PNBV-26-OCT-FINAL\\_0K.compressed1.pdf](http://www.planificacion.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2017/10/PNBV-26-OCT-FINAL_0K.compressed1.pdf)
- Société Générale de Surveillance (SGS). (2020). Análisis aproximados y avanzados. Obtenido de: <https://www.sgs.co/es-es/mining/analytical-services/coal-and-coke/proximate-and-ultimate-analysis>
- Solorza, J., Rendón, R., Sánchez, J. y Flores, E. (2013). Composición del bagazo de caña por análisis termogravimétrico. Recuperado de: [https://www.researchgate.net/publication/258848531\\_Composicion\\_del\\_bagazo\\_de\\_cana\\_por\\_analisis\\_termogravimetrico](https://www.researchgate.net/publication/258848531_Composicion_del_bagazo_de_cana_por_analisis_termogravimetrico)
- Sousa, F., Martínez, C., Oliveira Monteiro, C., Aguilar, C. y Azevedo, R. (2010). Perspectivas biotecnológicas de hemicelulosas vegetales. Recuperado de: <http://www.posgradoeinvestigacion.uadec.mx/Documentos/AQM/AQM4/Hemicelulosas%20Vegetales%20Sousa.pdf>

- Subirós, F. (2000). El cultivo de la caña de azúcar. Recuperado de: <https://books.google.com.ec/books?id=2wpC1j2AmkAC&pg=PA19&dq=morfolog%C3%ADa++ca%C3%B1a+de+azucar&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwi2g9a3neXjAhXCwFkKHR47CO0Q6AEIKDAA#v=onepage&q=morfolog%C3%ADa%20%20ca%C3%B1a%20de%20azucar&f=false>
- Tique, W. (2015). Evaluación de características agronómicas en tres variedades de caña de azúcar *saccharum officinarum*, empleando dos distancias de siembra en un vertisol de la hacienda taula Zulemita, en el municipio de guachené (Cauca). Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD. Bogotá. Colombia.
- Vargas, J., Callejon, A., Pérez. J. y Velázquez, B. (2012). A review of the mathematical models for predicting the heating value of biomass materials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 16. 3065-3083
- Velázquez B. y Fernández, E., Callejon A. y Estonell J. (2011). Mechanized methods for harvesting residual biomass from Mediterranean fruit. *Scientia Agricola*. v 69. (n.3). 173-231
- Velázquez, B., Fernández, E., López, I. y Salazar, D. (2011). Quantification of the residual biomass obtained from pruning of trees in Mediterranean almond groves. *ELSEVIER Ltd. Renewable Energy* 36. 621-626
- Vignote, S. (2016). La biomasa, importancia, características y formas de preparación. Recuperado de: <https://www.researchgate.net/publication/311171316>
- Viñals, M., Bell A., Michelena, G. y Ramil, M. (2012). Obtención de etanol a partir de biomasa lignocelulósica ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar. 46, (1). 7-16
- Yang, B., Dai, Z., Ding, S. y Wyman, C. (2011). Enzymatic hydrolysis of cellulosic biomass. *Biofuels* (2011) 2(4). Doi: <https://doi.org/10.4155/bfs.11.116>

Zumalacárregui, L., Pérez, O., Rodríguez, P., Zumalacárregui, C. y Lombardi, G. (2015). Potencialidades del bagazo para la obtención de etanol frente a la generación de electricidad. *Ingeniería Investigación y Tecnología, volumen (XVI)*. número 3. 407-418. Recuperado de: <http://www.scielo.org.mx/pdf/iit/v16n3/v16n3a8.pdf>

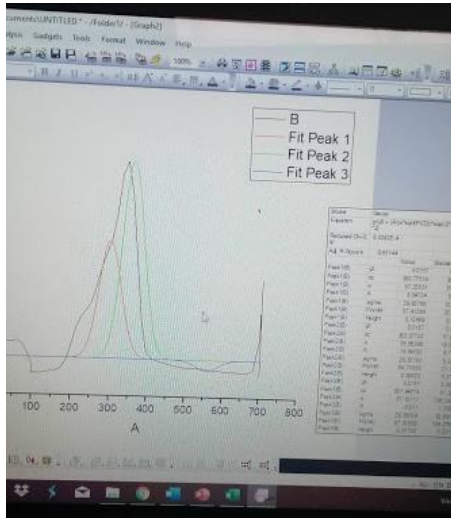
# ANEXOS

dendrometria"Costa Rica" Bloque A													TALLO					
HOJAS													Diametro					
Planta	Hoja Base				Hoja Media				Hoja Punta				N° hojas	Planta	Base (mm)	Media (mm)	Punta (mm)	Largo (m)
	Base (cm)	Media (cm)	Punta (cm)	Largo (m)	Base (cm)	Media (cm)	Punta (cm)	Largo (m)	Base (cm)	Media (cm)	Punta (cm)	Largo (m)			Base (mm)	Media (mm)	Punta (mm)	Largo (m)
Planta 1	4	6	8	1,3	5	6	8	1,34	3,8	7,2	5,5	1,32	21	Planta 1	33,55	37,51	35,45	3
Planta 2	4,4	6,5	6,8	1,25	5	8	6,8	1,2	5,5	7,7	5,4	1,18	26	Planta 2	32,76	36,4	31,75	3,02
Planta 3	4,2	7,3	6	1,3	4	7,2	6	1,28	5	7,4	5,8	1,27	23	Planta 3	31,82	33,8	28,75	2,8
Planta 4	6	7,2	5	1,18	4	7	4	1,41	4	7,4	4,8	1,4	26	Planta 4	31,87	34,03	28,15	2,33
Planta 5	5	7,8	5,7	1,13	4	7	5,2	1,25	4,4	8	6,8	1,24	34	Planta 5	30,59	31,93	31,25	2,7
Planta 6	3,8	7,4	4,2	1,38	3,8	6,8	4,4	1,29	3,8	6,1	4,8	1,24	30	Planta 6	26,76	28,14	26,91	2,5
Planta 7	4,8	7	4,8	1,63	4	6,8	5	1,33	4,2	6,8	4,2	1,34	33	Planta 7	30,29	30,31	26,98	1,85
Planta 8	3,4	6	3,4	1,1	3	5,5	3	1,14	3	5,4	3	1,07	28	Planta 8	24,88	25,48	23,17	1,85
Planta 9	3,7	4,4	1,45	4,2	7	4	1,43	3,2	6	4	1,23	27	Planta 9	25,34	29,22	27,21	2,3	
Planta 10	3,5	7	5	1,4	5	7	4	1,35	4	6,8	4,6	1,24	23	Planta 10	27,27	28,12	26,18	2
	4,24	6,92	5,33	1,29	4,2	6,83	5,04	1,30	4,09	6,88	4,89	1,253	28,3		29,513	31,495	28,384	2,435

dendrometria"Costa Rica" Bloque B													TALLO					
HOJAS													Diametro					
Planta	Hoja Base				Hoja Media				Hoja Punta				N° hojas	Planta	Base (mm)	Media (mm)	Punta (mm)	Largo (m)
	Base (cm)	Media (cm)	Punta (cm)	Largo (m)	Base (cm)	Media (cm)	Punta (cm)	Largo (m)	Base (cm)	Media (cm)	Punta (cm)	Largo (m)			Base (mm)	Media (mm)	Punta (mm)	Largo (m)
Planta 1	3,8	7	2,8	1,39	3,7	7,2	2,9	1,32	3,5	7	2,9	1,34	26	Planta 1	31,5	30,41	27,9	2,8
Planta 2	2,9	7,6	2,7	1,22	3,2	7,25	2,7	1,3	2,9	7	1,5	1,18	33	Planta 2	30,8	30,74	27,42	2,85
Planta 3	4,9	7,6	3	1,4	3,4	6,3	3,2	1,36	3,3	6,4	3	1,21	31	Planta 3	28,6	28,1	27,86	2,85

# ANEXO 1



ANEXO 2



ANEXO 3



ANEXO 4



ANEXO 5



ANEXO 6



ANEXO 7



UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR  
**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA**  
**ÁREA DE INVESTIGACIÓN**



		%N	%C	%H	%S
PR A	%	0,22	44,95	9,72	0,33
	SD	0,01	0,73	1,60	0,18
PR B	%	0,25	44,85	8,95	0,19
	SD	0,03	1,37	0,71	0,00
PR C	%	0,22	43,36	7,89	0,17
	SD	0,01	0,65	0,91	0,01
CC A	%	0,21	45,31	10,42	0,18
	SD	0,04	0,96	0,87	0,01
CC B	%	0,16	44,92	10,10	0,16
	SD	0,00	0,25	0,73	0,00
CC C	%	0,27	44,14	7,67	0,18
	SD	0,01	0,19	1,60	0,01
CBA	%	0,42	44,59	8,20	0,22
	SD	0,23	0,54	2,15	0,02
CB B	%	3,27	45,20	10,11	0,25
	SD	0,29	0,68	0,82	0,01
CB C	%	0,90	44,48	5,99	0,35
	SD	0,47	0,40	0,62	0,05

#: Porcentaje en masa / SD: Desviación estándar de la medición

**Ing. Pablo Londoño, M.Sc.**  
**Analista técnico universitario 3**

## ANEXO 8

	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG	AH
1	peso bruto tallo						Peso Bruto Hojas					
2	Bloque A (lb)	Bloque B (lb)	Bloque C (lb)				Bloque A (lb)	Bloque B (lb)	Bloque C (lb)			
3	50,85	17,6	28,55				26,85	38,5	40,3			
4	51,5	50,7	43,15				38,35	37,8	38,9			
5	57,1	69,2	18,85				39,05	37,3	37,9			
6	63,95	74,4	28,7				50,1	40,5	40,7			
7	51,9	49,2	61,85					43,9	40,5			
8	51	37,3	61,05									
9	37,7	40,56	40,6				154,35	198	198,3	183,55		
10	53,85	37,74	53,3									
11	50	35,45	54,7									
12	46,3	37,21	46,6									
13	30,25	40,18	42,23									
14	40,69	40,5	47,21									
15	39,19	48,90	48,17									
16	41,11	30,70	49									
17	34,2	35,65	61,6									
18	19,1	13,35	49,03									

## ANEXO 9

CURVA SECADO CB		CURVA SECADO CC 95-92		CURVA SECADO HOJAS CB40-69																					
A	B	A	B	A	B																				
0	100	100	100	100	100																				
2	60.94	77.93	65.78	82.14	82.97	79.33	84.5	81.04	80.44	75.99	82.51	76.55	81.06	79.3	86.86	83.92	86.83	84.9							
4	68.36	84.81	72.19	88.55	71.22	67.59	83.24	85.78	89.63	82.98	79.86	68.9	88.73	85.77	79.29	71.95	78.85	72.22	4	70.33	67.69	73.95	71.07	76.33	73.94
6	80.79	87.04	61.61	97.97	61.96	58.32	58.32	54.86	58.72	54.27	61.67	57.71	53.82	56.86	84.5	61.44	68.85	64.92	6	57.99	55.75	60.76	57.98	65.15	61.96
8	87.86	84.1	56.21	92.97	57.3	53.66	52.28	48.62	56.62	52.17	56.27	52.31	53.97	51.01	58.36	55.1	61.05	57.92	8	48.94	45.7	52.92	49.94	56.64	53.45
10	87.28	83.63	53.33	83.69	56.29	52.85	49.72	46.28	58.94	52.09	53.17	49.23	50.82	47.86	54.24	51.16	57.72	53.79	10	44.82	41.9	47.74	44.98	52.11	48.92
12	87.48	83.73	52.87	49.23	55.15	51.51	49.65	46.19	56.46	52.01	52.62	48.68	50.78	47.82	54.12	51.06	57.9	53.97	12	43.4	40.66	47.88	45.1	50.76	47.57
14	87.38	83.63	52.47	48.63	54.2	50.58	48.5	45.04	55.35	50.3	52.24	48.38	50.19	47.17	53.48	50.98	58.45	52.32	14	43.43	40.59	47.3	44.52	50.47	47.28
16	87.24	83.43	52.36	48.72	54.31	50.67	48.55	45.09	55.67	51.22	52.37	48.41	50.2	47.24	53.47	50.41	58.5	52.67	16	43.44	40.6	47.4	44.62	50.49	47.3
18	87.3	83.55	52.4	48.76	54.37	50.73	48.57	45.11	55.71	51.26	52.4	48.44	50.23	47.27	53.46	50.4	58.56	52.63	18	43.44	40.6	47.4	44.62	50.49	47.3
20																			20						
CURVA SECADO CC 95-92		CURVA SECADO HOJAS CB40-69		CURVA SECADO HOJAS CB40-69																					
A	B	A	B	A	B																				
0	100	100	100	100	100																				
2	87.97	85.59	86.75	84.43	88.18	85.52	90.92	88.41	88.07	85.92	87.59	85	85.41	83.34	87.11	84.8	88.54	86.33	2	88.82	87.6	90.83	88.52	88.94	86.32
4	78.14	75.76	75.77	73.45	74.97	72.31	80.87	78.16	76.07	73.82	76.62	74.03	70.91	68.84	76.54	74.23	75.79	73.52	4	74.89	72.67	75.13	72.82	77.79	75.77
6	89.03	86.85	85	82.68	84.46	83.9	71.75	68.64	67.11	64.96	68.25	69.78	62.01	59.94	67.24	64.88	67.11	64.9	6	62.38	60.14	62.95	60.64	64.77	62.75
8	81.32	83.54	58.42	56.1	57.77	55.11	62.46	59.95	59.43	57.28	61.91	59.32	54.3	52.83	59.72	57.41	60.22	58.01	8	50.09	47.87	51.85	49.54	53.17	51.16
10	65.08	62.7	63.31	60.99	62.3	49.84	55.49	52.98	53.16	51.01	56.61	54.02	50.36	48.29	53.12	50.81	54.61	52.4	10	42.8	40.38	44.82	42.31	45.69	43.67
12	62.07	49.69	49.92	47.5	50.87	49.21	53.81	51.3	51.96	49.81	54.93	52	49.87	47.8	62.25	60.04	53.95	51.74	12	41.68	39.44	43.83	41.58	44.98	42.94
14	51.3	48.92	49.24	48.92	50.19	47.52	62.59	60.08	60.57	48.42	53.79	51.2	48.7	46.63	51.99	49.27	53.47	51.26	14	40.98	38.76	43.12	40.81	44.23	42.21
16	51.32	48.94	49.27	48.95	50.2	47.54	52.4	49.89	50.33	48.18	53.33	50.74	48.34	46.27	61.91	49.3	53.55	51.34	16	40.58	38.34	42.95	40.84	43.87	41.85
18	51.35	48.97	49.25	48.93	50.19	47.53	52.43	49.92	50.4	48.25	53.35	50.76	48.41	46.34	51.61	48.3	53.56	51.35	18	40.58	38.36	42.97	40.86	43.89	41.87
20																			20						
CURVA SECADO CC 95-92		CURVA SECADO HOJAS CB40-69		CURVA SECADO HOJAS CB40-69																					
A	B	A	B	A	B																				
0	100	100	100	100	100																				
2	88.87	84.39	86.85	82.97	87.38	84.62	89.82	87.19	87.87	84.92	86.99	84.4	84.61	81.84	86.11	84.7	87.45	85.33	2	89.28	86.55	90.77	88.1	91.12	88.24
4	77.24	74.76	74.37	71.69	73.67	71.11	79.87	77.24	75.17	72.42	75.67	73.08	69.19	66.42	75.63	73.32	74.55	72.34	4	76.77	74.04	74.33	71.68	76.39	73.51
6	65.13	62.65	62.67	59.99	65.56	62.9	66.16	63.61	67.27	64.68	61.12	58.35	65.59	63.28	63.31	61.1	63.5	60.77	6	63.5	60.77	61.57	58.3	63.65	60.87
8	58.72	56.4	57.22	54.54	56.47	53.71	61.47	58.84	58.42	55.67	57.71	55.12	53.91	51.14	58.27	55.96	59.43	57.22	8	47.12	44.39	50.75	49.09	55.28	52.38
10	54.08	51.6	52.13	49.45	51.32	48.56	54.41	51.78	52.88	49.93	55.53	52.94	49.35	46.58	52.37	50	53.49	51.28	10	43.99	41.26	45.93	42.7	45.98	43.08
12	51.17	48.69	48.12	45.44	50.87	48.11	52.71	50.08	50.99	47.84	53.53	50.94	48.89	45.92	61.69	49.97	52.97	50.78	12	40.43	37.7	42.76	40.09	43.71	40.83
14	50.67	48.19	47.27	44.59	50.33	47.57	52.43	49.8	50.12	47.37	52.79	50.2	48.28	45.51	51.45	48.14	52.37	50.96	14	39.69	37.6	42.24	39.57	42.88	40
16	60.89	48.21	47.31	44.83	50.34	47.58	52.43	49.8	50.14	47.39	52.78	50.19	48.31	45.54	51.47	48.16	57.38	55.17	16	38.3	37.17	42.27	38.8	42.89	40.01
18	60.89	48.21	47.31	44.83	50.34	47.58	52.43	49.8	50.14	47.39	52.78	50.19	48.31	45.54	51.41	48.16	57.38	55.17	18	38.3	37.17	42.27	38.8	42.89	40.01
20																			20						

### ANEXO 10

CAMPO-BRASIL-1-A		CAMPO-BRASIL-1-A		CAMPO-BRASIL-1-A	
A	B	C	D	E	F
5	1	PUERTO RICO	16,1724	CENI CAÑA	15,1116
7	2	cc85-92B	16,3617	CB40-69-B	15,0044
8	3	cc85-92C	16,6366	CB40-69-C	15,3998
9	4	TORNA-2A	17,841	CC85-92-A-FEB01	15,7587
10	5	TORNA-2B	15,1473	CC85-92-B-FEB01	16,2508
11	6	TORNA-2C	15,1143	CC85-92-C-FEB01	16,5674
12	7	VELASTEUI-1A	15,2121	CASA-3-A	16,4331
13	8	VELASTEUI-1B	15,2069	CASA-3-B	17,0065
14	9	VELASTEUI-1C	15,4962	CASA-3-C	17,0853
15			15,91		16,07
16					

### ANEXO 11



### ANEXO 12

Autoguardado MORFOLOGIA

Archivo Inicio Insertar Disposición de página Fórmulas Datos Revisar Vista Ayuda

Callibri 11 A A<sup>+</sup> Ajustar texto General

Formato condicional Dar formato como tabla Estilos de celdas Insertar Eliminar Formato

Portapapeles Fuente Alineación Número Estilos Celdas

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1		Puerto rico			Cenicaña					Campo brasil			
2		peso caña bruta	peso bagazo										
3		muestra	kg			peso caña brut	peso bagazo			peso caña brut	peso bagazo		
4		parcela 1	5	1,8	muestra	kg				muestra	kg		
5		parcela 2	5	1,75	parcela 1	5	1,74			parcela 1	5	1,75	
6		parcela 3	5	1,75	parcela 2	5	1,785			parcela 2	5	1,815	
7		Promedio		1,77	parcela 3	5	1,73			parcela 3	5	1,785	
8		porcentage		35,33	Promedio		1,75			Promedio		1,78	
9					porcentage		35,03			porcentage		35,67	
10													
11													
12													
13													
14													

ANEXO 13