

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE CUENCA

CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

*Trabajo de titulación previo
a la obtención de título
de Ingeniero Ambiental*

TRABAJO EXPERIMENTAL:

**DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL ENERGÉTICO DE LA
BIOMASA RESIDUAL DE CULTIVOS DE BANANO EN EL
CANTÓN MACHALA, EL ORO, ECUADOR**

AUTOR:

DIEGO ANDRÉS AGUILAR ROMERO

TUTOR:

ING. EDGAR BARRAGÁN ESCANDÓN, PhD.

CUENCA – ECUADOR

2019

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, Diego Andrés Aguilar Romero con documento de identificación N° 0706584620, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales, en virtud de que soy autor del trabajo de titulación: **DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL ENERGÉTICO DE LA BIOMASA RESIDUAL DE CULTIVOS DE BANANO EN EL CANTÓN MACHALA, EL ORO, ECUADOR**, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: *Ingeniero Ambiental* en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad como facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos de la obra antes cedida. En concordancia, suscribo este documento en el momento que haga la entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, noviembre del 2019



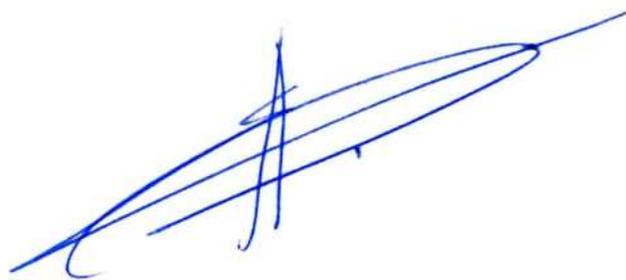
Diego Andrés Aguilar Romero

C.I. 0706584620

CERTIFICACIÓN

Yo, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: **DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL ENERGÉTICO DE LA BIOMASA RESIDUAL DE CULTIVOS DE BANANO EN EL CANTÓN MACHALA, EL ORO, ECUADOR**, realizado por Diego Andrés Aguilar Romero, obteniendo el *Trabajo Experimental* que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, noviembre de 2019

A handwritten signature in blue ink, consisting of several overlapping loops and a long horizontal stroke extending to the right.

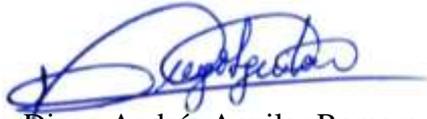
Ing. Edgar Antonio Barragán Escandón, PhD.

C.I. 0102516457

DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD

Yo, Diego Andrés Aguilar Romero con documento de identificación N° 0706584620, autor del trabajo de titulación: **DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL ENERGÉTICO DE LA BIOMASA RESIDUAL DE CULTIVOS DE BANANO EN EL CANTÓN MACHALA, EL ORO, ECUADOR**, certifico que el total del contenido del *Trabajo Experimental* es de mi exclusiva responsabilidad y autoría.

Cuenca, noviembre del 2019



Diego Andrés Aguilar Romero

C.I. 0706584620

DEDICATORIA

El presente trabajo de titulación es dedicado a mi familia, por haber invertido su confianza, tiempo y dinero en mi formación profesional, por ser ese apoyo incondicional que me ayudó a alcanzar este objetivo y su gran cariño en todo momento y lugar.

Una dedicatoria especial a mi perrita Sammy, que, si bien ya no se encuentra a mi lado, fue parte importante de mi vida y mi carrera universitaria, ya que siempre me recibía con felicidad y cariño.

AGRADECIMIENTO

A mi familia por brindarme su apoyo incondicional en todos los aspectos de mi vida y que ha sido mi mayor motivación para cumplir este objetivo. En especial a mi hermana María Fernanda por ser quien estuvo completamente involucrada en cada paso de mi carrera.

A los docentes que fueron parte de mi formación académica, en especial a mi tutor, el Ing. Edgar Barragán y la Ing. Miryan Loayza.

INDICE GENERAL

Capítulo 1	1
1.1. Introducción	1
1.2. Antecedentes	2
1.3. Justificación	3
1.4. Objetivos del proyecto	3
Objetivo General	3
Objetivos específicos	3
1.5. Marco teórico	4
1.5.1. Biomasa	4
1.5.2. Biomasa Lignocelulósica	4
1.5.2.1. Lignina	5
1.5.2.2. Celulosa	5
1.5.2.3. Hemicelulosa	5
1.5.3. Fuentes de biomasa	5
1.5.4. Descripción y morfología de la planta de banano	8
1.5.5. Biomasa residual de banano	10
1.5.6. Generación de energía a partir de biomasa seca	10
1.5.5. Procesos de aprovechamiento energético	11
Capítulo 2	13
2.1. Metodología	13
2.2. Recolección de muestras	14
2.3. Pretratamiento de las muestras	16
2.3.1. Secado de las muestras o eliminación de humedad	16
2.3.2. Molienda de las muestras	18
2.4. Caracterización física	19
2.4.1. Contenido de humedad	19
2.4.2. Contenido de cenizas	21
2.5. Caracterización química	21
2.5.1. Determinación de celulosa	22
2.5.2. Determinación de lignina	24
2.6. Caracterización energética	27

2.6.1. Determinación del poder calorífico	27
2.6.2. Determinación del potencial energético	28
2.6.2.1. Modelamiento matemático para la estimación del potencial energético de la biomasa residual de banano	28
2.6.2.2. Procesamiento de datos mediante Sistemas de Información Geográfico	29
Capítulo 3	31
3.1 Resultados y discusión	31
3.1.1. Caracterización físico-química de la biomasa residual agrícola	31
3.1.2. Caracterización energética	32
3.1.3. Potencial energético	32
3.2. Discusión	34
3.3. Conclusiones	36
4. Bibliografía y Referencias	37
Anexos	44
5.1. Anexo1: Resultado del análisis del poder calorífico de las hojas	44
5.2 Anexo 2: Resultado del análisis del poder calorífico del peciolo	45

ÍNDICE DE TABLAS Y FIGURAS

Tabla 1. Comparación de características calorimétricas entre distintos tipos de biomasa	7
Tabla 2. Descripción de diferentes residuos agrícolas en Ecuador.....	8
gIlustración 1. Partes de la planta de banano.....	9
Ilustración 2. Esquema de la metodología.....	13
Ilustración 3. Recolección de biomasa agrícola residual.....	15
Ilustración 4. Ubicación de la Finca "San Enrique".	16
Ilustración 5. Trituración de la biomasa recolectada.....	17
Ilustración 6. Eliminación de humedad de las muestras de biomasa.....	18
Ilustración 7. Determinación del contenido de humedad..	20
Ilustración 8. Determinación de celulosa	24
Ilustración 9. Determinación de lignina..	26
Ilustración 10. Catastro bananero del Cantón Machala.....	30
Tabla 3. Factores característicos del cultivo de banano.	30
Tabla 4. Características físico-químicas de la biomasa recolectada.....	31
Tabla 5. Resultados de los análisis de poder calorífico.....	32
Tabla 6. Potencial energético de residuos de banano de acuerdo a vario autores.	34
Tabla 7. Comparación de la densidad de residuos generados por diferentes tipos de cultivos en Ecuador.	36

RESUMEN

En el presente proyecto de titulación se muestra el cálculo del potencial energético de la biomasa residual de los cultivos de banano en el cantón Machala. La biomasa residual de banano se recolectó en la finca San Enrique ubicada en el cantón Machala, provincia de El Oro, se tomaron muestras de hojas, peciolo y pseudotallo. La caracterización química de la biomasa residual de banano se realizó en los laboratorios de ciencias de la vida de la Universidad Politécnica Salesiana, y consistió en la determinación del contenido de humedad, contenido de celulosa, contenido de lignina y cantidad de cenizas en cada parte muestreada. Las muestras de biomasa residual de banano presentaron un contenido inicial de humedad superior al 74%, y tras el procedimiento de eliminación de humedad, ésta se redujo hasta un 7.87%. La caracterización energética de la biomasa residual de banano se realizó en el laboratorio de físico química de la Universidad Estatal de Cuenca, y consistió en la determinación del poder calorífico de cada muestra con el uso de una bomba calorimétrica, siendo las hojas las que presentan un mayor poder calorífico. A partir de los análisis realizados a la biomasa residual de banano, se estima el potencial energético que podría obtenerse de 12849.57 toneladas de biomasa residual de banano generadas en el cantón Machala anualmente, lo que representaría la generación de 9.94 GWh/año de energía eléctrica para satisfacer la demanda energética promedio de 1560 familias en el cantón Machala.

Palabras clave: Biomasa, Energía Renovable, Poder Calorífico, Potencial Energético.

ABSTRACT

This degree project shows the calculation of the energy potential of the residual biomass of banana crops in the Machala canton. The residual banana biomass was collected at the San Enrique farm located in the Machala canton, province of El Oro, samples of leaves, petiole and pseudotallo were taken. The chemical characterization of the residual banana biomass was carried out in the life science laboratories of the Salesian Polytechnic University, and consisted of determining the moisture content, cellulose content, lignin content and amount of ashes in each sampled part . Banana residual biomass samples had an initial moisture content of more than 74%, and after the moisture removal procedure, it was reduced to 7.87%. The energy characterization of the residual banana biomass was carried out in the chemical physics laboratory of the State University of Cuenca, and consisted of determining the calorific value of each sample with the use of a calorimetric pump, the leaves being the ones that present a greater calorific value Based on the analyzes carried out on the residual banana biomass, the energy potential that could be obtained from 12849.57 tons of banana banana biomass generated annually in the Machala caón is estimated annually, which would represent the generation of 9.94 GWh / year of electrical energy for meet the average energy demand of 1560 families in the Machala canton.

Keywords: Biomass, Renewable Energy, Calorific Power, Energy Potential.

Capítulo 1

1.1.Introducción

Con la finalidad de combatir el calentamiento global se exploran diversas alternativas al uso de combustibles fósiles para la generación de energía, entre esas la biomasa. La biomasa presenta varias ventajas, como su disponibilidad (desechos, biomasa forestal y agrícola), su emisión neutra de carbono, su fácil combustión o su contenido de celulosa. Es por lo que su uso se ha incrementado a nivel mundial. Se han realizado estudios globales que proporcionan datos muchas veces falsos a la realidad de países más pequeños o ciudades agrícolas (Rojas Quiroga & Acevedo Torres, 2017). La potencialidad del aprovechamiento de la biomasa depende de sus características fisicoquímicas, y estas a su vez están en función del tipo y la región de procedencia (Giraldo Cano & Montoya Martínez, 2015).

La producción de la biomasa residual en los cultivos depende de varios factores como el tipo de cultivo, zona climática, tipo de suelo y las prácticas de manejo de cultivo. La estimación de la biomasa residual debe ser calculada a partir del área de cultivos que se encuentren en la zona de estudio, esto con apoyo de sistemas de información geográficos. Esta información geográfica se debe ajustar al área de estudio, su uso de suelo y red vial principalmente, es por ello que se recomienda trabajar con bases de datos actualizadas (Guerrero Hinojosa, 2014).

La valorización energética de la biomasa residual agrícola ha crecido en Sudamérica en las últimas décadas como una alternativa limpia y renovable a los combustibles fósiles (Avelino Gonçalves, Dos Santos, & De Macedo, 2015). La actividad agrícola de la región posibilita el desarrollo de tecnologías que permitirían su aprovechamiento con fines energéticos. Paralelamente se espera dar solución a los grandes volúmenes de residuos que se generan. Sin embargo, es necesario que se realicen estudios de acuerdo con los requerimientos específicos de cada país, cada región y cada ciudad en función de sus actividades y tipos de recurso.

En este proyecto de investigación se caracteriza la biomasa agrícola residual proveniente de cultivos de banano, además se analiza, si es posible emplearla como fuente de energía en función de su poder calorífico y tasa de generación.

1.2. Antecedentes

Según datos de la Agencia Internacional de Energía (IEA, International Energy Agency, por sus siglas en inglés) las fuentes de energía primaria en 1973 a nivel mundial se basaban principalmente en combustibles fósiles. El petróleo, carbón o gas natural, representaban el 46.2%, el 24.5% y el 16.0% del total de las fuentes de energía primaria respectivamente (que corresponden 6101 millones de toneladas equivalentes de petróleo (Mtoe)). Cuatro décadas después (2016) no se han presentado cambios significativos en las fuentes de energía primaria, pues de un total de 13761 Mtoe requeridos, los combustibles fósiles siguen siendo los recursos más utilizados. Si bien los derivados del petróleo representan el 31.9% del total de fuentes de energía primaria en el mundo, el gas natural y el carbón han experimentado un incremento en su uso del 22.1% y 27.1% respectivamente (International Energy Agency, 2016).

En 2016 las emisiones de CO₂ a nivel mundial, procedentes de la combustión de fósiles, fueron de 33.31 GtCO₂. Estos valores se han duplicado notablemente desde inicios de 1970, y desde el 2000 han aumentado un 40%, debido principalmente con el incremento de la producción económica mundial (International Energy Agency, 2018).

De acuerdo al Balance Energético Nacional 2015 (BEN), en el Ecuador se consumieron 101 millones de barriles equivalentes de petróleo (Mbep) para satisfacer las necesidades energéticas. Las principales fuentes de energía fueron el diésel con el 31%, gasolinas y naftas representaron el 28%, gas licuado de petróleo (GLP) 8.5% y el *fuel oil* 8.1% del total de energía consumida (Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, 2017). El Ecuador, según la IEA, emitió 35 millones de toneladas de CO₂ a la atmósfera en el 2016 producto del uso de combustibles. Alrededor de 7.6 millones de toneladas de CO₂ (21.71%) se debieron a la producción de electricidad y calor, 4.28% provinieron del consumo de las industrias, mientras que el sector del transporte aportó con el 47.7% de CO₂ (International Energy Agency, 2018).

En cuanto a la energía eléctrica en el Ecuador, se ha priorizado cambiar la matriz energética del país. Según lo establece la Agencia de Regulación y Control de Electricidad (ARCONEL) en el año 2016 las centrales hidroeléctricas representaron el 58.08% de potencia efectiva de un total de 7606.88 MW. De esta manera se desplazó las centrales que utilizan motores de combustión interna con una presencia del 21.18% de la potencia efectiva total. La biomasa tiene su espacio en la generación de energía eléctrica con un 1.79% del total. De acuerdo a estos datos es notable una tendencia a

dejar de lado el uso de combustibles fósiles y apostar por las energías renovables o más limpias (Agencia de Regulación y Control de Electricidad, 2016).

1.3. Justificación

Considerando las fuentes no renovables de energía (combustibles fósiles), su gradual agotamiento y los problemas ambientales que estas acarrearán, a nivel mundial se pretende un cambio de las fuentes energéticas. El empleo de la biomasa es una alternativa, pues representa beneficios ambientales y posee una amplia diversidad de materia prima, que incluye desechos comunes, residuos de la agricultura y residuos forestales (Giraldo Cano & Montoya Martínez, 2015).

El cultivo de banano es la mayor actividad agrícola del Ecuador, teniendo una superficie cultivada de 180336 ha (CFN, 2017), de las cuales el 16.47% se encuentran en la provincia de El Oro. Así mismo, es la actividad que genera la mayor cantidad de residuos agrícolas en el país, con un registro de aproximadamente 4.9 millones de toneladas anuales en 2014 (Serrano, Mejía, & Ortiz, 2017).

No se tienen registros oficiales de la cantidad de residuos de banano en la ciudad de Machala. Sin embargo, con el presente proyecto se pretende valorar el potencial energético de los residuos de banano y determinar el porcentaje de la demanda de energía eléctrica que se podría cubrir en la ciudad de Machala, (García Paladines, 2016).

1.4. Objetivos del proyecto

Objetivo General

Determinar el contenido energético de los residuos de banano en laboratorio para establecer el potencial energético de la biomasa residual de cultivos de banano en la ciudad de Machala, El Oro, Ecuador.

Objetivos específicos

Establecer el estado del arte de la valoración energética de los residuos vegetales, focalizando en la biomasa proveniente de plantaciones de banano.

Determinar el potencial energético de la biomasa residual de cultivos de banano en función de su volumen, poder calorífico y características físico-químicas.

Determinar el potencial energético de los residuos energéticos en la ciudad de Machala para la definición de posibles alternativas de aprovechamiento.

1.5.Marco teórico

1.5.1. Biomasa

La biomasa es una materia prima limpia y sostenible que podría reemplazar el consumo de combustibles fósiles para la producción de electricidad (Burra & Gupta, 2019). Se caracteriza por ser un recurso de energía renovable, que puede ser utilizado como combustible en la generación de energía calorífica o eléctrica. Puesto que es materia orgánica, se puede obtener de residuos de animales o plantas (incluidos agrícolas y municipales) (Martínez-Guido, Ríos-Badrán, Gutiérrez-Antonio, & Ponce-Ortega, 2019).

La biomasa se distingue de los combustibles fósiles por ser considerada un combustible neutro en carbono, debido a que no existe una adición neta de dióxido de carbono (CO₂) a la atmósfera. De esta manera, el uso de residuos agrícolas en lugar de los combustibles fósiles reduciría las emisiones que se dan por quema a cielo abierto. Además, se ocuparía menos espacio en los vertederos, convirtiéndose en una potencial fuente de ingresos para todas las partes involucradas (Pradhan, Mahajani, & Arora, 2018).

En el marco energético se puede clasificar a la biomasa, de acuerdo a su composición, en: biomasa azucarada, biomasa oleaginosa, biomasa almidonada y biomasa lignocelulósica. Además, se puede clasificar a la biomasa, según su origen, como biomasa natural o biomasa residual. La biomasa residual es más apreciada como recurso renovable ya que no compite por el agua o el suelo con los cultivos alimentarios (Guerrero, Aguado, Sánchez, & Curt, 2016). La biomasa en sus diferentes tipos se encuentra formada por lignina, celulosa y hemicelulosa en diferentes proporciones (Serrano et al., 2017).

1.5.2. Biomasa Lignocelulósica

En términos generales la biomasa lignocelulósica es el material vegetal que se encuentra compuesto de lignina, hemicelulosa y celulosa, estos componentes están presentes en la pared celular de las plantas. Su importancia energética radica en que almacena energía proveniente del sol por medio de la fotosíntesis, para luego poder ser aprovechada por procesos térmicos de descomposición (Herrera, Tejada, & Nuñez, 2015).

1.5.2.1. Lignina

Se describe a la lignina como un heteropolímero amorfo, tridimensional, ramificado y con un peso molecular alto, que se encuentra formado por alcoholes aromáticos, lo que le da una resistencia muy alta a la degradación química o biológica. La lignina cumple con las funciones de brindar soporte estructural, impermeabilidad, rigidez y protección al resto de componentes como son la celulosa y hemicelulosa (Peñarrieta, Tejeda, Mollinedo, & Villa, 2014).

1.5.2.2. Celulosa

La celulosa es un polímero lineal, de alto grado de polimerización y de peso molecular elevado. Representa el principal constituyente de la pared celular en materiales vegetales, por lo que se le considera el polímero de mayor presencia en el planeta. Su estructura física es similar a la del cabello humano, sin embargo, sus dimensiones varían de acuerdo a la especie vegetal; es fibrosa, blanquecina, presenta gran estabilidad y resistencia ante la tracción mecánica (Morales De La Rosa, 2015).

1.5.2.3. Hemicelulosa

Se considera a la hemicelulosa como un conjunto de heteropolisacáridos que forman un polímero gracias a las cadenas ramificadas de pentosas y hexosas. A diferencia de la celulosa, la hemicelulosa es fácilmente soluble debido a su estructura ramificada y su bajo peso molecular. También representa el segundo componente de la pared celular en la biomasa vegetal después de la celulosa y su función es servir de interfase entre la celulosa y la lignina (Rivas Siota, 2014).

1.5.3. Fuentes de biomasa

La biomasa presenta diferentes características físicas y químicas que se encuentran en función de su fuente. Las fuentes pueden ser cultivos energéticos, residuos agrícolas, residuos forestales, residuos urbanos o residuos industriales. La biomasa en sus distintos tipos es aprovechable para la generación de energía. Por ello es importante conocer su origen para elegir el método de aprovechamiento más favorable (De Lucas Herguedas, Del Peso Taranco, & Rodríguez García, 2012).

Se detallan a continuación algunas de las características de cada uno de los tipos de biomasa citados previamente (Romanelli & Manuel, 2016):

Cultivos energéticos. - Se trata de extensas áreas de cultivos en donde existen árboles y/o plantas de distintos tamaños con el objetivo final de producir energía. En esta actividad agrícola se utilizan especies de crecimiento rápido y mínimo mantenimiento, cultivadas en tierras que tengan un valor productivo bajo para alojar cultivos alimentarios (Nava-García & Doldán-García, 2014).

Este tipo de cultivos también pueden ser utilizados en el control de erosión y degradación de suelos. Así mismo su valor económico permanecería constante en comparación con los cultivos tradicionales que se ven afectados por las fluctuaciones del mercado.

Residuos agrícolas. – Se conoce como residuo agrícola a una planta o porción de la misma que haya formado parte de un cultivo tradicional. Estos residuos son generados a partir de las prácticas de poda que son frecuentes en cultivos de importancia alimentaria, es por eso que se estima que por unidad de cultivo de genera un 60% de residuos (Chávez Porras & Rodríguez Gonzales, 2016).

En el mayor de los casos los residuos son dejados en el campo, para brindar protección y nutrientes al suelo, sin embargo, también se recolectan para ser desechados por lo que es primordial una planificación sobre los residuos generados durante las actividades de poda.

Residuos forestales. – Se denomina residuo forestal a aquellos residuos que se generan en los bosques o el tratamiento primario de la madera, por ejemplo, cortezas, ramas, raíces y aserrín. En la antigüedad los residuos forestales constituyeron la principal fuente energética de la civilización, sin embargo, actualmente este tipo de biomasa es muy poco aprovechado por la diferencia de costos con lo derivados del petróleo (Diez, 2017).

Residuos urbanos. – En las ciudades se generan grandes cantidades de residuos, que se pueden clasificar en sólidos, los cuales son resultantes de procesos de transformación consumo y limpieza, y aguas residuales, que no son otra cosa que residuos generados por actividades humanas y que se componen principalmente de agua.

Debido al crecimiento demográfico, el tratamiento de los residuos se torna más complejo con el pasar de los años, .Las características de los residuos difieren de un lugar a otro, esto debido a que se encuentran en función del poder adquisitivo y el nivel de desarrollo de la sociedad (Fazenda & Tavares-Russo, 2016).

Residuos industriales. – Son aquellos residuos que se generan durante la transformación de materia prima orgánica en diversos productos de consumo masivo. Para el aprovechamiento energético solo se consideran industrias que generan grandes cantidades de residuos orgánicos; entre ellas se encuentran la industria de vino, industria de aceite o la producción de frutos deshidratados o frutos secos.

A continuación, se presenta en la Tabla 1 las características de distintos tipos de biomasa utilizados en la generación de energía.

Tabla 1. Comparación de características calorimétricas entre distintos tipos de biomasa.

Tipo de biomasa	Principales fuentes	Poder calorífico (kcal/kg)	Tasa de generación
Biomasa forestal	Madera sin tratar	5000	0.440 ton/m ³
	Residuos de aserradero	3587.8	0.595 ton/m ³
Biomasa agrícola	Bagazo de caña	4388.6	105.22 ton/km ²
	Tallo de soya	4069	26.9 ton/km ²
	Cascarilla de arroz	3616	11.8 ton/km ²
Residuos municipales	Residuos orgánicos	3844	-
	Residuos inorgánicos	6510	-
Desechos de ganado	Estiércol porcino	7372	649 m ³ /ton (seca)
	Estiércol bovino	4302.1	281 m ³ /ton (seca)
	Estiércol de gallina	3486.4	359 m ³ /ton (seca)

Fuente: (Boundy, Diegel, Wright, & Davis, 2011; Kook & Lee, 2015; Quesada, Salas, Arguedas, & Botero, 2007)

En la Tabla 2 se describe la composición y el poder calorífico de los cultivos más importantes en Ecuador. Esto permite tener una referencia en relación con la biomasa obtenida de los cultivos de banano.

Tabla 2. Descripción de diferentes residuos agrícolas en Ecuador.

Residuo agrícola	% de lignina	% de celulosa	Potencial energético
Cascarilla de arroz ^a	19.2	34.4	16720 MWh/año
Bagazo de caña ^b	18.26	41.3	784.06 MWh/año
Cáscara de cacao ^c	37.2	19.6	374.05 kWh/ton

Fuente: ^a (Tipanluisa, Moreno, & Guasumba, 2015), ^b (Penedo Medina & Sánchez del Campo Lafita, 2015), ^c (Lock Navarro, 2018)

En diferentes localidades se ha valorado el potencial energético de diferentes residuos. La investigación bibliográfica ejecutada muestra a la diversidad de opciones para producir energía, así como los distintos tipos de energía final aprovechada. De acuerdo a Quintero (2015), se registra la producción 19 millones de toneladas cada año de cascarilla de arroz en 6 países asiáticos (Indonesia, Filipinas, Malasia, Tailandia y Vietnam). Esto podría producir 16720 MWh/año en procesos térmicos de conversión.

Por su parte Marcelo Aldana (2016), presenta un análisis del potencial energético del bagazo de caña que se genera en los cultivos de caña de azúcar, en donde determina que de 1568.12 toneladas de residuos agrícolas generados al año en Perú, se podría obtener 784.06 MWh/año por medio de la gasificación. Según Carrillo Alvarado (2015), en el Ecuador se generan aproximadamente 2015352 t/año de residuos en los cultivos de cacao que cuentan con 507721 ha cultivadas en el territorio ecuatoriano. Lo que podría representar una generación de energía eléctrica de 40 MWh/año a razón de 374.05 kWh/T (Ministerio de Electricidad y Energías Renovables, 2015).

1.5.4. Descripción y morfología de la planta de banano

La planta de banano es de tipo herbácea, cuenta con un tallo no leñoso (pseudotallo) cónico de aproximadamente 3.5 metros de altura para dar paso en su extremo superior a una corona de hojas (Giraldo Cano & Montoya Martínez, 2015). Su sistema radicular se encuentra formado por un rizoma central del cual se desprenden numerosas raíces cilíndricas. Del sistema radicular se ramifican unas yemas que constituirán los denominados hijos, los mismos que si los dejan desarrollar se convertirán en nuevas plantas (Palacios Bau, 2016).

A continuación, se describe la morfología de la planta de banano, haciendo énfasis en las partes que representan interés energético para el presente proyecto de investigación. Se puede observar su forma y distribución en la Ilustración 1 (Giraldo Cano & Montoya Martínez, 2015).

Pseudotallo. - Semejante a un tronco, sirve de soporte incluso para las frutas y las hojas que llegan a pesar hasta 50 kg. Se compone de varias vainas foliares superpuestas y gran porcentaje de agua, lo que le da una consistencia bastante carnosa (Vézina & Baena, 2016).

Peciolo. – Su función es la de dividir las láminas foliares en 2 y dar soporte a las hojas al estar sujetas al pseudotallo (Vézina & Baena, 2016).

Hoja o limbo. – Es de forma ovalada y de color verde oscuro si se encuentra en condiciones nutricionales óptimas. Cada planta de banano es capaz de desarrollar hasta 38 hojas, conociendo que emiten una hoja periódicamente cada 7 días (Vézina & Baena,



2016).

Ilustración 1. Partes de la planta de banano. Fuente: Elaboración propia, basado en (Giraldo Cano & Montoya Martínez, 2015).

1.5.5. Biomasa residual de banano

El banano figuró como uno de los primeros cultivos dentro de la historia de la agricultura. Su producción y consumo en masa en las últimas décadas convierten al banano en la segunda fruta más cultivada del mundo con una producción estimada en 139 millones de toneladas (Padam, Tin, Chye, & Abdullah, 2014).

Los residuos de banano son: rechazos de fruta, hojas, tallos, pseudotallos y fibras. Estos desechos han sido utilizados para la elaboración de pellets de alto valor energético, que pueden ser utilizados para la calefacción industrial y doméstica. Es posible transformar la energía química de la biomasa vegetal sin importar su origen (Roberts, Marotta, & Prado, 2015). Una forma eficiente de obtener energía a partir de la biomasa, es transformar la biomasa en biocombustibles (sólidos, líquidos o gaseosos) que mediante técnicas bioquímicas o termoquímicas permiten la generación de energía térmica o eléctrica (Carhuanco León, 2015). Gumisiriza et al. (2017) estudió la aplicación con fines de combustión directa (pseudotallos y hojas) para generar energía térmica.

Para el año 2014, en el Ecuador se registraron 10 millones de toneladas de residuos agrícolas, de los cuales 4,9 millones de toneladas eran procedentes de cultivos de banano (Serrano et al., 2017). Estos residuos se encuentran compuestos por celulosa entre 23.7-87.5 %, hemicelulosa 12.3-54.5% y lignina 0.0-54.3% en peso. Cabe destacar que entre menor sea el porcentaje de lignina, mayor es la factibilidad de uso de la biomasa para generación de energía por medio de combustión ya que la presencia de lignina produce una mayor cantidad de residuos carbonosos (Giraldo Cano & Montoya Martínez, 2015).

1.5.6. Generación de energía a partir de biomasa seca

La biomasa puede ser transformada en formas sólida, líquida o gaseosa utilizando tecnologías modernas, y así convertirse en un suministro de energía limpio y eficiente para producir calor, energía eléctrica o combustible para el transporte.

El contenido de cenizas es crucial para identificar la eficiencia y la capacidad de combustión (biomasa seca). Además, es importante calcular el contenido de humedad ya que es un indicador del tiempo que puede mantener el combustible sus condiciones óptimas en ambientes desfavorables. Esta característica determina la calidad del combustible, por ejemplo, un alto contenido de humedad puede causar que la caldera se

apague, mientras que un contenido muy bajo de humedad causaría una combustión muy acelerada (Ku, Sazali, & Kamarolzaman, 2018).

La biomasa debido a su alto contenido de humedad presenta una baja densidad energética en comparación a los combustibles fósiles, por lo que se requiere secar la biomasa para utilizarla como materia prima para la generación de energía. Con la biomasa seca, el calor de la combustión se utiliza para calentar el aire de la reacción lo que resulta en una mayor temperatura de la llama. Con una temperatura más elevada de la llama aumentaría la transferencia de calor en la caldera y la producción de vapor. Así mismo, una temperatura alta de la llama permite una combustión más completa, lo que reduciría la emisión de CO₂ (Verma, Loha, Nath, & Kumar, 2017).

1.5.5. Procesos de aprovechamiento energético

Fundamentalmente la biomasa se constituye de oxígeno, carbono e hidrógeno, que al hacerla reaccionar de manera exotérmica permite aprovechar la energía almacenada en su estructura (Giraldo Cano & Montoya Martínez, 2015). Dentro de las tecnologías utilizadas para el aprovechamiento energético de los diferentes tipos de biomasa que poseen distintas características físicas y químicas, se encuentran:

- **Pirolisis.** - Consiste en la aplicación de calor en ausencia de oxígeno sobre la biomasa con el fin de descomponer sus estructuras físicas y químicas, y así desprender energía. Los subproductos relacionados a este proceso son gases con contenido variable de azufre y nitrógeno, también se generan residuos sólidos volátiles como cenizas (Murciano Criado, 2014).
- **Combustión.** – Se somete la biomasa a altas temperaturas, lo que genera su descomposición termoquímica. El proceso se lleva en presencia de oxígeno, es lo que lo diferencia de la pirolisis. Dada la naturaleza del proceso, se produce una oxidación completa de los elementos que constituyen la biomasa, esto resulta en cenizas, H₂O, CO₂ y gran energía calórica liberada como subproductos (Galan Riveros, 2016).
- **Gasificación.** – La gasificación de biomasa consiste en transformar de un estado sólido a gaseoso por medio de varias reacciones termodinámicas dadas en un ambiente escaso de oxígeno. Los gases obtenidos pueden ser utilizados para la generación de energía eléctrica por medio del uso de turbinas, motores o calderas (Díaz, 2018).

La principal tecnología para la transformación de la biomasa agrícola es la combustión directa para la generación de calor. Se aprovecha el vapor para mover turbinas y así transformar la energía mecánica en eléctrica. Para plantas de hasta 20MW se utiliza el lecho fluizado, que dependiendo del contenido de humedad de la biomasa puede aportar una eficiencia de entre 65 y 95%, sin embargo, en plantas de generación de menos de 1 MW la eficiencia desciende al 20 y 40% (Chong Obando, 2018).

Capítulo 2

2.1. Metodología

Para la ejecución de esta actividad se han propuesto dos etapas: caracterización fisicoquímica, caracterización energética en función del volumen de residuos generados y área cultivada en la ciudad de Machala. Los pasos a seguir en cada etapa se detallan en la Ilustración 2.

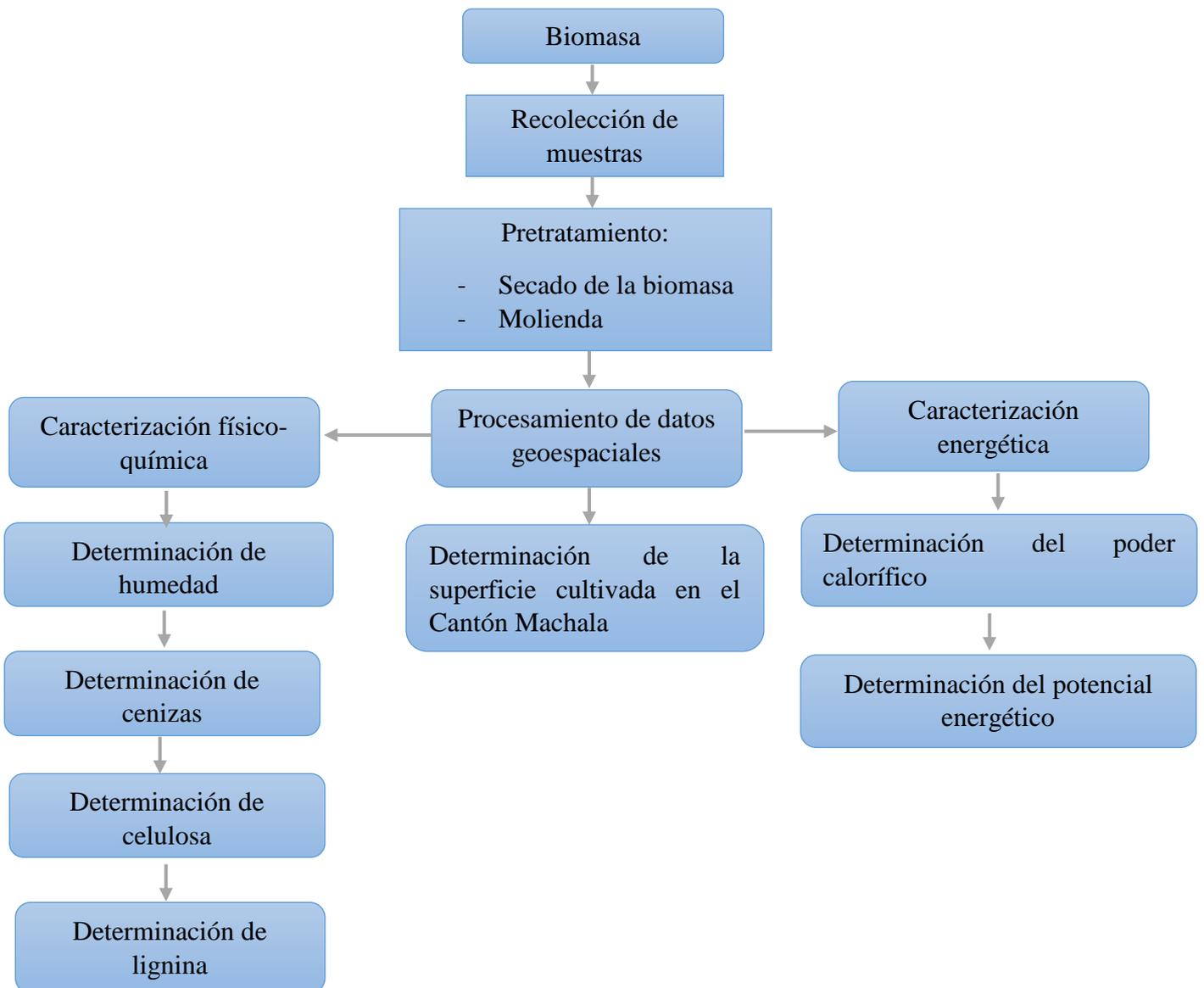


Ilustración 2. Esquema de la metodología. Fuente: (Autor)

La biomasa considerada para el proyecto es la resultante de las prácticas de deshoje y deshije en los cultivos de banano (pseudotallo, hojas y peciolo). Estos residuos serán analizados por separado.

2.2. Recolección de muestras

La recolección de las muestras de biomasa residual de banano se realizó en base a los pasos estipulados en el “Proyecto de producción de hidrógeno a partir de la biomasa procedente de los residuos de la planta de banano mediante gasificación catalítica en agua a temperatura supercrítica” (Abril, 2016):

- Se debe subdividir el terreno cultivado, en función de bloques con crecimiento uniforme de donde deben tomarse las muestras de la biomasa.
- Se toman entre 10 y 20 plantas, las cuales deben estar dispersas en todo el bloque.
- Las plantas se seleccionan de manera aleatoria en cada bloque.
- La recolección de la biomasa debe realizarse justo después de las prácticas de deshoje y deshije.
- Se recolectan por separado: hojas, peciolo y pseudotallo, debiendo rotularse su bloque de procedencia.
- No se deben recolectar hojas que presenten hongos o daños microbiológicos.
- Los componentes recolectados se pesan por separado.

Las partes de interés para el proyecto (hojas, peciolo y pseudotallo) fueron recolectadas y etiquetadas como corresponden en diferentes fundas (Ver Ilustración 3).



Ilustración 3. Recolección de biomasa agrícola residual. Fuente: Autor.

Las muestras de biomasa residual de cultivos de banano se recolectaron en la hacienda San Enrique ubicada en el Cantón Machala, Provincia de El Oro, el día 13 abril del 2019, para ser transportados a la Ciudad de Cuenca el día 14 de abril del 2019. La ubicación geográfica de la hacienda se puede observar en la Ilustración 4 que se encuentra a continuación.

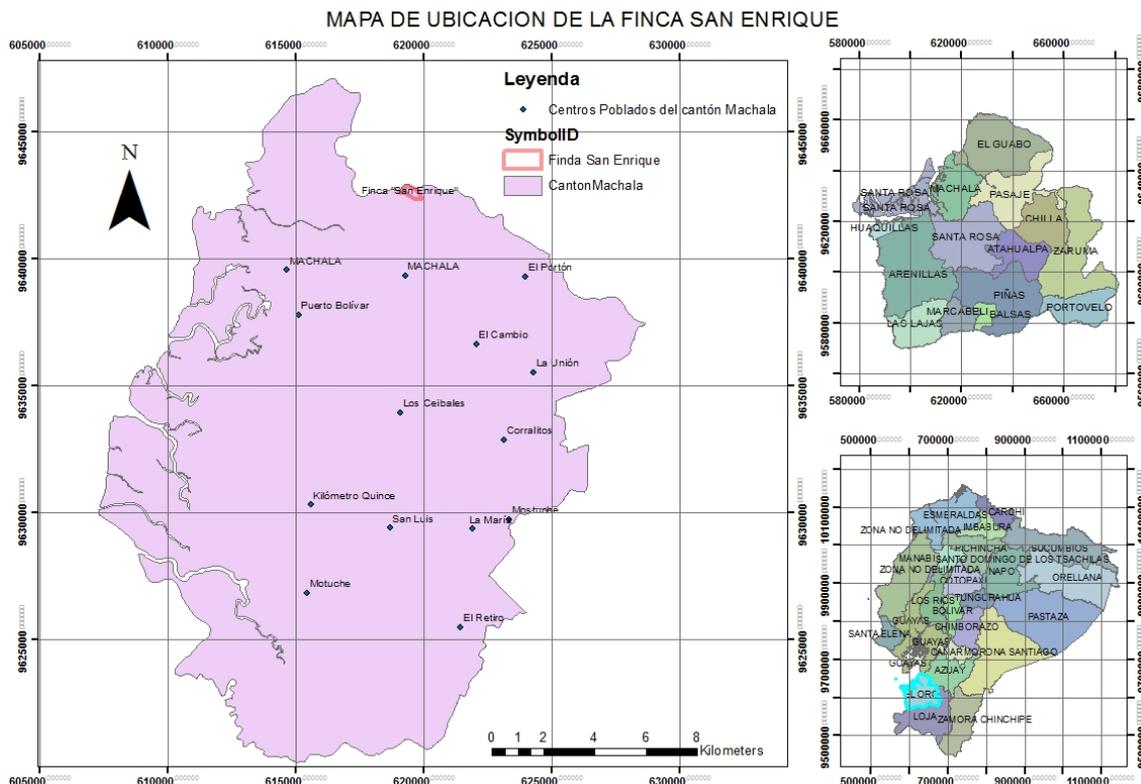


Ilustración 4. Ubicación de la Finca "San Enrique". Fuente: Autor

2.3. Pretratamiento de las muestras

Esta fase se compone principalmente de dos procesos: i) eliminar la humedad de las muestras recogidas, ii) molienda de las muestras. El pretratamiento se realizó utilizando equipos del Laboratorio de Ciencias de la Vida y el Laboratorio de Transformación de Polímeros de la Carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad Politécnica Salesiana. El fin del pretratamiento es facilitar el manejo de la biomasa durante los análisis físicos y químicos.

2.3.1 Secado de las muestras o eliminación de humedad

Para el análisis, la biomasa debe estar seca, por ello se extrae la humedad de las muestras. El secado de la biomasa aporta varias ventajas al proceso (Piñeros-Castro, 2014):

- Las muestras pueden contener porcentajes muy variables de humedad, por lo que se pretende normalizar las muestras para evitar errores y realizar los análisis en base seca.

- Un alto contenido de humedad podría alterar los valores resultantes del análisis del poder calorífico al degradarse la muestra por la presencia de hongos y bacterias.
- Se facilita el proceso de molienda en una muestra con bajo contenido de humedad, ya que se requiere menos energía y se evitan obstrucciones.

Materiales y equipos

Los materiales y equipos utilizados para la manipulación y tratamiento de las muestras de biomasa agrícola residual de banano son:

- Tijeras y cuchillo
- Guantes
- Fundas herméticas
- Bandejas de aluminio
- Cámara climática Blinder KBF 240

Procedimiento

Se seleccionan las muestras en mejor estado de cada parte de la planta que se recogieron para reducir su tamaño utilizando cuchillo y tijeras. Luego de obtener muestras de aproximadamente 2 cm², se colocan en fuentes de aluminio para poder eliminar su humedad en la estufa a 60°C durante 48 horas.

En las Ilustraciones 5 y 6 se aprecian los procesos de trituración y eliminación de



Ilustración 5. Trituración de la biomasa recolectada. Fuente: Autor.

humedad de las muestras que pertenecen al pretratamiento.



Ilustración 6. Eliminación de humedad de las muestras de biomasa. Fuente: Autor.

El procedimiento se llevó a cabo con muestras frescas y sin la presencia de hongos. De la misma manera, el tamaño y la temperatura de secado se establecieron en función de lo establecido por Palacios Bau (2016) que describe esta práctica como óptima para el tratamiento de eliminación de humedad.

2.3.2. Molienda de las muestras

La reducción de tamaño de las muestras permite su manipulación en los tratamientos físicos o químicos. Un menor tamaño de la muestra posibilita una mayor superficie de contacto con los reactivos a usarse, ya que al momento de mezclar los reactivos con las muestras se logra una mezcla homogénea, ya que partículas de gran tamaño son de difícil manipulación, así como el ajuste al tamaño de los equipos de laboratorio (Palomar et al., 2015).

Materiales:

Los materiales y equipos utilizados para la manipulación y tratamiento de las muestras de biomasa agrícola residual de banano son:

- Molino de plásticos, se utiliza para disminuir el tamaño de las partículas, es el equipo con el que se dispone en los laboratorios de la Universidad Politécnica Salesiana para la tarea requerida.
- Fundas resellables herméticas, utilizadas para guardar las muestras una vez molidas y preservar sus características.
- Mascarilla.
- Guantes.

Procedimiento:

Las muestras de cada parte de la planta se trataron por separado. La totalidad de las muestras recolectadas de hojas, peciolo y pseudotallo (5 kg por cada parte de la planta) se introdujeron al molino por medio de un conducto ubicado en su superior. Una vez que se molieron las muestras para reducir su tamaño, se almacenaron y etiquetaron en fundas herméticas.

2.4. Caracterización física

Se determina las características físicas de la biomasa (contenido de humedad y contenido de cenizas) con la finalidad de conocer su rendimiento y comportamiento al momento del aprovechamiento energético. Los análisis realizados fueron sobre base seca, lo que indica un contenido de humedad menor al 50% (Serrato Monroy & Lesmes Cepeda, 2016).

2.4.1. Contenido de humedad

El contenido de humedad es un factor determinante en la biomasa, ya que representa la cantidad de agua presente en cada muestra en relación con su peso (García et al., 2016). Puesto que la biomasa se considera un recurso para a generación de energía, su poder calorífico está directamente relacionado con la cantidad de humedad presente (Arroyo Vinuesa, 2016).

Materiales y equipos:

A continuación, se detallan los materiales y equipos utilizados para la manipulación y tratamiento de las muestras de biomasa agrícola residual de banano:

- Luna de reloj, separa las sustancias de la base de la balanza.
- Espátula, necesaria para la manipulación de sustancias y muestras en la balanza.

- Balanza analítica Mettler Toledo ML204
- Halógeno de humedad Mettler Toledo HB-43 S

Procedimiento:

- Se establecen los parámetros de temperatura y la masa que se ingresará en el halógeno de humedad en función del tipo de biomasa que se va a analizar. Para el presente proyecto es biomasa residual vegetal (partes de una planta de banano). De acuerdo con Tirado, Montero, & Acevedo (2015) se establece una temperatura de 105°C y se ingresan 2 gramos de muestra para la determinación de la humedad en el equipo halógeno de humedad Mettler Toledo HB-43 S.

En la Ilustración 7 se observa el procedimiento de incursión de 3.2 gramos de



Ilustración 7. Determinación del contenido de humedad. Fuente: Autor.

muestra previo a la realización del análisis en el halogeno de humedad Mettler Toledo HB-43 S.

2.4.2. Contenido de cenizas

Las cenizas son residuos sólidos derivados de la materia inorgánica presente en las distintas partes de una planta como hojas, peciolo y pseudotallo. La cantidad de cenizas depende de la parte de la planta que se esté analizando (López González, 2013).

Materiales y equipos:

- Luna de reloj, separa las sustancias de la base de la balanza.
- Crisoles de 20 ml, se utilizan para colocar las muestras dentro de la mufla
- Pinzas
- Balanza analítica Mettler Toledo ML204
- Mufla Brasimet

Procedimiento:

- Se coloca 1 gr de muestra en un crisol de 20 ml, luego se introduce el crisol en la mufla precalentada a 600°C y se deja por 1 hora. Posteriormente se retira el crisol con los residuos, se deja enfriar durante 2 horas y se pesan las cenizas resultantes.

De acuerdo a Fernández-Puratich (2014), el contenido de cenizas se calcula por diferencia de pesos. Se resta el peso crisol y las cenizas de la muestras del peso del crisol con la muestra antes de ser calcinada, dividido entre la diferencia del peso del crisol y el peso del crisol y la muestra calcinada. La ecuación propuesta por Fernández-Puratich (2014) es la siguiente (ecuación 1).

$$\% \text{ Ceniza} = \frac{P_1 - P_2}{P - P_2} \times 100 \quad (1)$$

P= Peso del crisol (gr)

P1= Peso del crisol con la muestra sin calcinar (gr)

P2= Peso del crisol con la muestra calcinada (gr)

2.5. Caracterización química

Todos los análisis comprendidos dentro de la caracterización química (determinación de celulosa y lignina) se realizaron por duplicado, con el objetivo de minimizar el margen de error. Los análisis se llevaron a cabo en los laboratorios de ciencias de la vida de la Universidad Politécnica Salesiana.

2.5.1. Determinación de celulosa

La celulosa se encuentra formada por una larga cadena de glucosa sin ramificaciones, lo que hace que su estructura sea fuerte y muy estable, es posible degradarla a temperaturas de entre 300 y 400°C (de Oliveira Maia et al., 2018). La separación de la celulosa se logra con la añadidura de una solución de hidróxido de sodio (NaOH) al 17.5 %. Esto es posible por las propiedades de la celulosa de absorber agua y la susceptibilidad a la hidrólisis (Paladines Condoy & Tinoco Loayza, 2019).

Materiales y equipos:

A continuación, se detallan los materiales y equipos utilizados en la determinación de celulosa en las muestras de biomasa agrícola residual de banano. Dada la naturaleza del análisis, se requirió el uso de materiales y equipos de precisión.

- Luna de reloj
- Varilla de agitación
- Matraz de 100 ml
- Espátula
- Vaso de precipitación de 500 ml
- Pipeta de 10 ml
- Crisol de fondo poroso
- Papel filtro
- Hornilla
- Balanza analítica Mettler Toledo HL204
- Bomba de vacío
- Cámara Climática Blinder KBF 240

Reactivos:

- Hidróxido de sodio (NaOH) al 17,5 %, que es la concentración necesaria para separar la celulosa del resto de componentes según lo descrito por Palacios Bau (2016).
- Ácido acético al 10 %, es la concentración necesaria para eliminar el resto de componentes de acuerdo a Palacios Bau (2016).

Procedimiento:

De acuerdo a Palacios Bau (2016), siguiendo los pasos dados por la norma TAPPI T203 cm-99 se puede determinar el porcentaje de celulosa presente en cada muestra (hojas, peciolo y pseudotallo):

- Se pesa 1 gr de la muestra y se coloca en un matraz de 100 ml y se lleva a baño maría a 25°C.
- Se añade 10 ml de la solución de hidróxido de sodio a 17,5 % en el matraz que contiene la muestra, se agita y se deja reposar por 5 minutos.
- Se añaden 5 ml de la solución de hidróxido de sodio al 17,5 %, se agita y se deja reposar por 30 minutos.
- Se añaden 30 ml de agua al matraz, se agita y deja reposar por 1 hora.
- Se procede a filtrar la muestra al vacío con ayuda de un crisol de fondo poroso, papel filtro y una bomba de vacío.
- Durante el proceso de filtrado se realizan lavados con una disolución compuesta por 30 ml de agua destilada y 25 ml de hidróxido de sodio al 17,5%.
- Se realiza un lavado con 30 ml de agua destilada durante el filtrado.
- Sin aplicar vacío se agrega 5 ml de ácido acético al 10 % y se deja reposar por 3 minutos.
- Se realiza el lavado de la muestra que se está filtrando con 50 ml de agua destilada.
- Finalmente se lleva la muestra tratada a una estufa para realizar el secado a 70°C durante 3 horas.

En la ilustración 8 se observa las muestras siendo calentadas a baño maría, como parte del proceso de determinación de celulosa.



Ilustración 8. Determinación de celulosa. Fuente: Autor

Para obtener el porcentaje de celulosa que presenta las muestras, se utiliza la Ecuación 2, que relaciona los pesos iniciales y finales de las muestras de cada una de las partes de la planta (hojas, peciolo y pseudotallo) (Loja Sánchez, 2017).

$$\% \text{ Celulosa} = \frac{P_f}{P_o} \times 100 \quad (2)$$

Po= Peso de la muestra sin tratar (gr).

Pf= Peso de la muestra tratada y secada (gr).

2.5.2. Determinación de lignina

Dentro de las propiedades que tiene la lignina están que es fácilmente oxidable, resistente a la hidrólisis ácida y se condensa con facilidad en presencia de fenoles. Es por eso que para su determinación se le realiza un tratamiento ácido para finalmente cuantificar el residuo. Un alto porcentaje de lignina determinará también altos valores

de poder calorífico, ya que es el constituyente de mayor valor energético (Torres, Montero, Beleno, Toscano, & Pérez, 2015).

Materiales y equipos:

A continuación, se detallan los materiales y equipos utilizados en la determinación de celulosa en las muestras de biomasa agrícola residual de banano:

- Espátula, permite la manipulación de reactivos y biomasa
- Luna de reloj, separa las sustancias de la base de la balanza.
- Varilla de agitación, permite la mezcla de los reactivos con las muestras sin afectar las características.
- Pipeta de 10 ml, permite medir y controlar las cantidades de reactivos que se utilizan.
- Vasos de precipitación de 100 ml y 500 ml.
- Crisol, utilizado para el filtrado.
- Papel filtro
- Balanza analítica Mettler Toledo ML204
- Cocineta
- Cámara Climática Blinder KBF240

Reactivos:

- Ácido sulfúrico al 72 %, se utiliza con la finalidad de degradar cualquier otro componente distinto a la lignina (Palomar et al., 2015).

Procedimiento:

Para la determinación de lignina se consideró el procedimiento descrito en la norma TAPPI T222 om-02 (Palomar et al., 2015):

- Se pesa 1 gr de la muestra y se coloca en un vaso de precipitación de 100 ml.
- Se añaden 15 ml de ácido sulfúrico (H_2SO_4) al 72 % y se mantiene en agitación constante por 2 horas.
- Se transfiere la muestra a un vaso de precipitación de 1000 ml en donde se disuelve la mezcla hasta alcanzar 4 % de concentración de ácido sulfúrico.
- Se lleva la muestra a ebullición suave por 4 horas.

- Se realiza un filtrado al vacío de la muestra.
- Se secan los residuos de la filtración en una estufa a 70°C por 2 horas.

En la ilustración 9 se puede observar la separación de la lignina, aquella que se



Ilustración 9. Determinación de lignina. Fuente: Autor.

encuentra sedimentada en el fondo del vaso de precipitación.

Para obtener el porcentaje de lignina que presenta las muestras, se utiliza la Ecuación 3 (Loja Sánchez, 2017).

$$\% \text{ Lignina} = \frac{P_f}{P_o} \times 100 \quad (3)$$

Po= Peso de la muestra sin tratar (gr).

Pf= Peso de la muestra tratada y secada (gr).

2.6. Caracterización energética

La caracterización energética se encuentra en función del poder calorífico presente en la biomasa residual de los cultivos de banano y la cantidad de residuos que se generan por unidad de área cultivada (Avelino Gonçalves et al., 2015). Los análisis se realizan con la ayuda de una bomba calorimétrica, la cual arroja los resultados de manera directa y se lo hace por duplicado para una mayor exactitud. La determinación del poder calorífico se realizó en el laboratorio de Físico-Química de la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad de Cuenca.

2.6.1. Determinación del poder calorífico

Los análisis de poder calorífico se realizaron a las muestras correspondientes a hojas, peciolo y pseudotallo, luego de ser eliminada la humedad con el uso de una cámara climática. Para la determinación del poder calorífico se requirió de una bomba calorimétrica IKA C200 que se encuentra en el Laboratorio de Físicoquímica de la Facultad de Ciencias Químicas en la Universidad Estatal de Cuenca. El análisis consiste en someter 1 gramo de muestra de la biomasa obtenida de hojas, peciolo y pseudotallo a una reacción de combustión y el valor del poder calorífico será la cantidad de calor que se desprenda por unidad másica de biomasa, que será medida en función de su capacidad de ebullir 10 ml de agua (Fernandez, 2015).

Materiales y equipos:

- Espátula
- 10 ml de Agua destilada
- Bomba calorimétrica ika c200

Procedimiento:

- Se enciende la bomba calorimétrica y se pesa entre 0.30 y 0.55 gr de la muestra que se quiere analizar en un crisol que se encuentra incorporado en la bomba calorimétrica.
- Se coloca la muestra en la cámara de combustión, haciendo contacto con la mecha que está sujeta al cable de ignición.
- Una vez sellada la cámara de combustión se la presuriza a 20 atmósferas.

- Se introduce la cámara de combustión dentro de la camisa adiabática y se cierra la bomba calorimétrica.
- Se agregan 2 litros de agua destilada en el reservorio de la bomba calorimétrica, que irá agregando el volumen requerido de agua destilada (10 ml).
- La bomba calorimétrica emitirá los resultados del poder calorífico expresados en J/gr.

2.6.2. Determinación del potencial energético

El potencial energético de la biomasa determina la capacidad de generar energía y se encuentra en función de dos factores principalmente: i) el poder calorífico que contiene la biomasa residual agrícola, en este caso de banano, que dependerá de su composición química (contenido de lignina y celulosa), ii) la cantidad de residuos que se generan por unidad de producción dentro de las bananeras (Roberts et al., 2015).

2.6.2.1. Modelamiento matemático para la estimación del potencial energético de la biomasa residual de banano

Para estimar el potencial energético de la biomasa residual de banano se requiere información del área cultivada, producción de banano por unidad de área cultivada, producción de residuos por unidad de producto (banano) y la equivalencia del residuo húmedo en residuo seco (Serrato Monroy & Lesmes Cepeda, 2016). Se emplea la Ecuación 4 para el cálculo del potencial energético de la biomasa:

$$PE = (M_{rs}) * (E) \quad (4)$$

PE: Potencial energético (J/año)

M_{rs} : Masa de residuo seco (T/año)

E: Energía por unidad de masa (J)

La Ecuación 5 permite estimar la masa de residuo seco (M_{rs}). Como se advirtió previamente se requiere un contenido de humedad muy bajo (Serrano et al., 2017).

$$M_{rs} = A * R_c * \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m F_{rki} * Y_{rski} \quad (5)$$

M_{rs} : Masa residual seca (T/año)

A: Área cultivada (ha/año)

R_c : Producción de banano por unidad de área cultivada (T/ha)

F_r : Residuos por unidad producida (T residuo/T producto)

Y_{rs} : Fracción de residuo seco (T residuo seco/T residuo húmedo)

PC: Poder calorífico de la biomasa residual (TJ/T)

El subíndice k se reemplaza en función del tipo de biomasa residual agrícola con el que se trabaje, es decir, podrían ser residuos agrícolas de cosecha (RAC) o residuos agroindustriales (RAI).

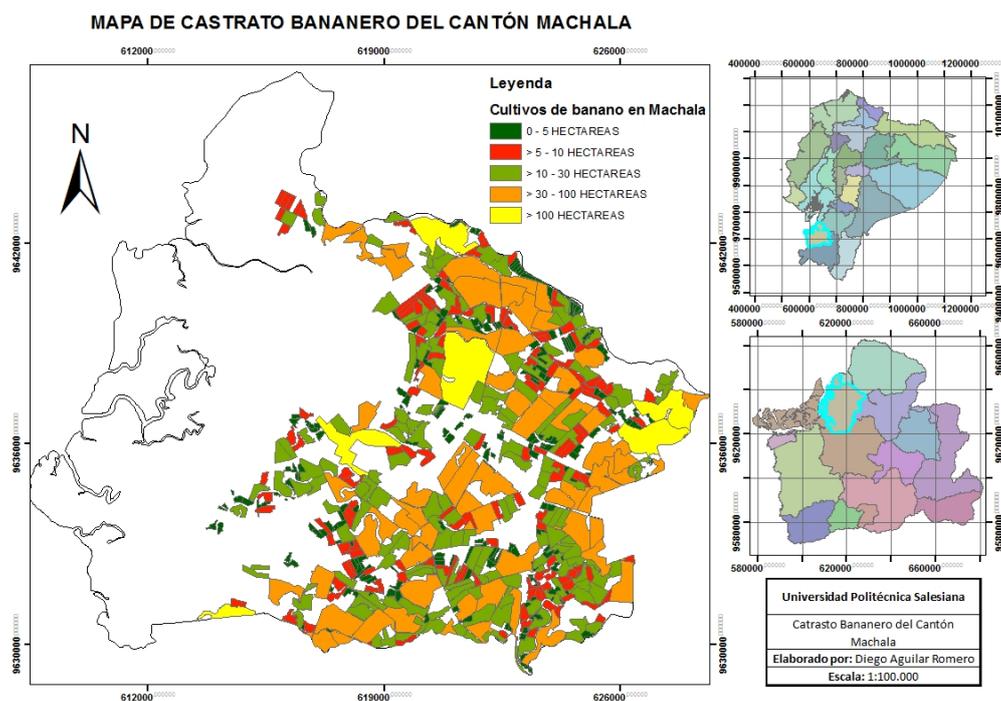
En el caso de estudio definido por el proyecto, los tipos de biomasa residual asociadas a los cultivos de banano son:

- Residuos agrícolas de cosecha:
 - Hojas
 - Pseudotallo
 - Peciolo

2.6.2.2. Procesamiento de datos mediante Sistemas de Información Geográfico

El procesamiento de información se realiza con ayuda del software ArcGIS versión 10.3. Se empleó las capas de división cantonal y el catastro bananero realizado para la provincia de El Oro en 2014. Con ello se desglosa, en lotes, la actividad bananera en el cantón Machala. El software facilitó la determinación del área total cultivada en el Cantón Machala y la ubicación de las áreas en donde se cultiva la planta.

En la ilustración 10 se observa la distribución de las haciendas bananeras y su área, información que se recopiló mediante un catastro bananero realizado por el MAGAP (2013).



En el mapa de catastro bananero se observa la extensión que tiene la práctica del cultivo de banano en el cantón Machala, que es de 7664.98 hectáreas, lo que representan el 37,99 % de la superficie total del Cantón, por lo que es motivo de estudio como importante fuente de biomasa para generación de energía.

De acuerdo al procesamiento de la información geoespacial y las características sobre los cultivos de banano en el cantón Machala, se determinaron los factores necesarios para estimar el potencial energético de los residuos agrícolas procedentes de los cultivos de banano. Los valores a utilizar en el cálculo del potencial energético se pueden observar en la siguiente tabla (ver tabla 3):

Residuos/Factores	Área cultivada (Ha)	Rendimiento de cultivo (T/Ha)	Factor de residuo (Tr/Tp)	Fracción de residuo seco (Trs/Tsh)
Residuos agrícolas de banano	7664.98	25.40	1	0.066

Tabla 3. Factores característicos del cultivo de banano.

Capítulo 3

3.1 Resultados y discusión

3.1.1. Caracterización físico-química de la biomasa residual agrícola

Las características físicas y químicas que presentan las muestras recolectadas de biomasa de banano de acuerdo a la parte de la planta se muestran en la tabla 4:

Tabla 4. Características físico-químicas de la biomasa recolectada. Fuente: Autor.

Muestra	Contenido de humedad	Contenido de cenizas	% de lignina	% de celulosa
Hojas	74% ^a	8.33%	21.98%	39.41%
	8.26% ^b			
Peciolo	79.3% ^a	7.32%	17.84%	41.30%
	7.87% ^b			
Pseudotallo	86.42% ^a	8.33%	15.08%	40.69%
	8.59% ^b			

^a Valores obtenidos antes del secado. ^b Valores obtenidos después del secado

El contenido de humedad es un factor representativo sobre el poder calorífico, ya que, a mayor contenido de humedad, menor será el poder calorífico. El presente proyecto se trabajó en biomasa de base seca, eso requería tener una humedad inferior al 50%. Para el aprovechamiento de biomasa en combustión directa es recomendable que la humedad esté entre 7 y 15%. Para obtener el contenido de humedad requerido se debió someter a la biomasa a procesos de secado (Quintero González & Quintero González, 2015).

Las muestras analizadas de la biomasa residual de cultivos de banano reflejan un bajo contenido de cenizas, que podrían ser utilizadas como fertilizantes dentro de los mismos cultivos de banano por su contenido de nitrógeno y potasio. Las hojas y el pseudotallo son las partes que mayor contenido de cenizas presentan con 8.33% cada una.

El análisis para determinar el porcentaje de lignina da como resultado que las hojas contienen un mayor porcentaje de lignina que el resto de partes analizadas con un 21.98% de su peso. El peciolo, constituyente central de las hojas de banano y que les brinda soporte, contiene 17.84% de lignina. La lignina es el constituyente que presenta mayor valor calorífico, por lo que las hojas presentarían el mayor poder calorífico de las muestras analizadas.

La celulosa es el constituyente más abundante en todas las partes de la planta de banano según los análisis realizados, se presenta con los valores más elevados en el peciolo, seguido del pseudotallo y las hojas. Energéticamente es importante por su estructura molecular, ya que se encuentra unida por enlaces de hidrógeno que al aplicarles calor son capaces de desprender grandes cantidades de energía.

3.1.2. Caracterización energética

El valor del poder calorífico obtenido en cada una de las muestras analizadas se realizó por duplicado en la bomba calorimétrica ika c2000 dentro del laboratorio de físico-química de la Universidad de Cuenca, los valores medios se presentan en la tabla 5:

Tabla 5. Resultados de los análisis de poder calorífico.

Muestra	Poder calorífico (kcal/kg)
Hojas	3999.52
Peciolo	3482.07
Pseudotallo	2960.08

Fuente: Autor.

Los valores obtenidos tras los análisis del poder calorífico (Ver Anexos 1 y 2), reflejan la capacidad energética por unidad de masa de cada una de las partes de la planta analizadas. Es así, que el valor más alto obtenido es el de las hojas, seguido del peciolo y por último el pseudotallo. La diferencia se da principalmente por la constitución estructural de cada una de las partes de la planta, en donde las partes con mayor cantidad de lignina (hojas y peciolo) son aquellas que presentan mayor poder calorífico.

3.1.3. Potencial energético

Para la determinación del potencial energético de la biomasa residual agrícola de banano se ha utilizado el modelo matemático planteado por Serrato Monroy (2016), que se encuentra en función de varios factores como el área cultivada (ha), el rendimiento de

producto por unidad de área de cultivo (T de producto/ha cultivada), masa de residuo por unidad de producto (T de residuo/T de producto) y su equivalencia en base seca (T de residuo seco/ T de residuo húmedo). El cálculo se lo realiza con el uso de las ecuaciones 3 y 5 expuestas en el Capítulo 2.

Según Serrano (2017), la combustión directa es la tecnología de mayor uso en la transformación energética a partir de biomasa, sin embargo, establece que la eficiencia global de una planta de combustión directa es del 19.9%. Por lo tanto, se considera este valor para la estimación del potencial energético.

Para realizar el cálculo del potencial energético en función de las características que presenta el cultivo de banano en el cantón Machala, se utilizan las ecuaciones 4 y 5 expuestas en la sección 2.6.2.1. En las cuales se reemplazarán los valores detallados en las Tablas 3 y 5 que son aquellos que reflejan la realidad del cultivo de banano en el cantón Machala. Los valores del poder calorífico de hojas, peciolo y pseudotallo (Tabla 5) se expresan en TJ/ton para ser utilizados en el cálculo del potencial energético (Ecuación 5), 0.016 TJ/ton, 0.014 TJ/ton y 0.012 TJ/ton respectivamente.

- Potencial energético combinado

Como resultado teórico del posible uso combinado de las tres partes analizadas (hojas, peciolo y pseudotallo), en el cual se considera el promedio resultante de los valores del poder calorífico de cada parte de la planta de banano, considerando su uso en proporciones iguales, y utilizando las ecuaciones 4 y 5 expuestas en la sección 2.6.2.1, se obtiene el siguiente valor de potencial energético:

$$M_{rs} = 7664.98 * 25.40 * 1 * 0.066$$

$$M_{rs} = 12849.57 \frac{T}{\text{año}}$$

$$PE = 12849.57 * 0.014$$

$$PE = 179.89 \frac{TJ}{\text{año}}$$

$$PE = 49.97 \frac{GWh}{\text{año}} * (0.199)$$

$$PE = 9.94 \frac{GWh}{\text{año}}$$

3.2. Discusión

A nivel internacional, los residuos provenientes del cultivo de banano se han estudiado como una opción de energía alternativa, en la Tabla 6 se muestra el potencial energético obtenido en distintas localidades y bajo diferentes procesos de aprovechamiento energético.

Tabla 6. Potencial energético de residuos de banano de acuerdo a vario autores.

Autor	Localidad	Proceso de aprovechamiento	Cantidad de residuos (hojas, peciolo y pseudotallo)	Potencial energético
Carhuanco León (2015)	Piura-Perú	Conversión a bioetanol	819913.04 Ton/año	789.16 GWh/año
Wobiwo (2016)	Camerún	Conversión a biometano	131712 Ton/año	99 GWh/año
Guerrero (2016)	El Oro-Ecuador	Conversión a bioetanol	198602 Ton/año	141.18 GWh/año
Quintero Osorno (2017)	Cundinamarca-Colombia	Combustión directa	730848 Ton/año	337.19 GWh/año
Autor (2019)	Machala-Ecuador	Combustión directa	12849.57 Ton/año	9 GWh/año

Fuente: Autor

De acuerdo a Carhuanco León (2015), en la localidad de Piura, Perú, se registran anualmente 819913.04 toneladas de residuos de banano de los cuales es posible generar hasta 789.16 GWh/año mediante la obtención de bioetanol a razón de 87.9 litros por tonelada de residuo de banano, lo que equivale a 0.95 MWh/Ton. En comparación con

los resultados del presente proyecto de titulación, los residuos de banano producidos en el cantón Machala permiten la generación de 9 GWh/h con un ratio de 0.70 MWh/ton. La diferencia se debe a la cantidad de biomasa y al proceso de conversión empleado. Esto indica que el aprovechamiento como bioetanol puede ser más adecuado que la combustión directa..

Wobiwo (2016), propone como método de aprovechamiento de la biomasa residual del banano, la transformación de la materia prima en biometano. Para esto se un proceso de descomposición en el que se libera gas metano, el cual que se utiliza como combustible en la generación de energía eléctrica. Se observa una diferencia significativa en el proceso de pretratamiento de las muestras. Wobiwo (2016), practicó 2 métodos distintos que fueron; conservar la biomasa a -20 °C hasta el instante de su uso y secarla al aire a 55 °C para su posterior almacenamiento en fundas de propileno hasta ser usada. Mientras que en el actual proyecto se secaron las muestras a 70 °C por 24, apenas 6 horas después de ser recolectadas.

Mediante el método de aprovechamiento energético de combustión directa, Quintero Osorno (2017), calcula que con 730848 toneladas de residuos agrícolas de banano cada año, es posible generar 337.19 GWh/año, sin embargo, no se realizaron análisis químicos, es decir se tomaron valores referenciales para el cálculo. Mientras que para el presente proyecto de titulación se hizo la caracterización química, física y energética de las muestras de biomasa agrícola residual de banano (hojas, peciolo y pseudotallo). Es decir se obtuvo información de cada parte de la planta que fue muestreada, con el fin de determinar el aporte energético de cada residuo que se produce en la actividad agrícola bananera.

En la Tabla 7, se indican los distintos tipos de biomasa que se generan en Ecuador a partir de las actividades agrícolas que se desarrollan en el país. Se muestra las densidades de residuos en función de la superficie sembrada por año, lo que ubica al cultivo de banano como el cultivo que mayor cantidad de residuos genera en campo y subproductos al año. La producción de residuos es regular cada año, por tanto podría tenerse un aporte de combustible (biomasa residual agrícola) regular. Es decir puede ser considerado como fuente energética viable (Ministerio de Electricidad y Energías Renovables, 2015).

Tabla 7. Comparación de la densidad de residuos generados por diferentes tipos de cultivos en Ecuador.

Tipos de biomasa	Superficie sembrada (Ha)	Residuos generados por año (T/año)	Densidad de residuos (T/año-Ha)
Banano ^a	221775	4926095.60	22.21
Arroz ^b	411459	2106695.86	5.12
Caña de azúcar ^c	106926	793283.38	7.42
Cacao ^d	507721	2015352.60	3.96

Fuente: Elaboración propia, basado en ^a(Ministerio de Electricidad y Energías Renovables, 2015), ^b(Tipanluisa et al., 2015), ^c(Marcelo Aldana et al., 2016), ^d(Sánchez, 2013).

Según lo expuesto por Tipanluisa (2015), los cultivos de arroz en el Ecuador producen alrededor de 331329 toneladas de residuos (cascarilla de arroz) aprovechable. La cascarilla de arroz presenta en su composición 34.4% de celulosa, 19.2% de lignina y un poder calorífico de 3080.78 Kcal/kg, en comparación al cultivo de banano que a nivel nacional genera una cantidad de residuos aprovechables de 591131.47 Ton/año entre hojas, peciolo, pseudotallo y raquis. En promedio estos residuos tienen un poder calorífico de 3480.56 Kcal/kg, y su composición es de 40.6% de celulosa y 18.3% de lignina.

El potencial energético del bagazo de caña es de 5.12 MWh/T según lo expuesto por Adana, Bizzo & Alamo (2016). Si se compara con el potencial del banano (0.77 MWh/T), el bagazo de caña posee 5 veces más potencial energético que los residuos de banano. La diferencia se debe presumiblemente al alto contenido de lignina de la caña de azúcar que de acuerdo a Mathier (2014) es de aproximadamente 25% en contraste con el 18.3% de lignina presente en los residuos de banano, en ambos trabajos la determinación de lignina se realizó siguiendo el procedimiento detallado en la norma TAPPI T222 om-02.

De acuerdo con Sánchez Quezada (2013), el potencial energético de las cáscaras de cacao es de 1.73 MWh/T, , mientras que los residuos de banano demuestran una capacidad de generación de 0.77 MWh/T, que equivale al 44.50 % del potencial energético que posee cada tonelada de cáscara de cacao, el método de aprovechamiento para ambos residuos es la combustión directa, por lo que se considera una humedad menor al 20%.

3.3. Conclusiones

Es importante mencionar que las muestras fueron recolectadas en una extensión de 20 hectáreas, pertenecientes a una sola finca, en el que se realizan controles y labores de deshoje y deshije característicos de la finca San Enrique, que no representan las técnicas de cultivo que se llevan a cabo en la totalidad de la superficie cultivada en el cantón Machala.

De acuerdo a los resultados obtenidos en la caracterización química de las muestras correspondientes a las hojas, peciolo y pseudotallo de las plantas de banano, se determinó que la celulosa es el componente mayoritario con porcentajes de 39.41%, 41.30%, y 40.69% respectivamente. Sin embargo, el poder calorífico se encuentra estrechamente relacionado con el contenido de lignina que es de 21.98% en hojas, 17.84% en peciolo y 15.08% en pseudotallo. Es por su alto contenido de lignina (ver Tabla 4) que las hojas presentan un mayor poder calorífico en comparación al peciolo y pseudotallo

Considerando que el cantón Machala tiene un total de 7664.98 hectáreas cultivadas de banano y 12849.57 toneladas de residuo, el resultado obtenido es un potencial energético bruto de 49.97 GWh/año utilizando en conjunto como fuente las hojas, peciolo y pseudotallo generadas a diario en las prácticas de poda y limpieza. Sin embargo, la eficiencia de las tecnologías para la generación de energía eléctrica, como lo es la combustión directa para la generación de vapor, permite que solo se aproveche 9.94 GWh/año que representa el 20% del total.

Según García Paladines (2016), el consumo promedio de energía eléctrica de un hogar ubicado en el sector centro-sur del cantón Machala es de 531.33 kWh/mes, lo que supone un consumo anual de 6375.96 kWh/año por hogar. Por lo tanto es posible satisfacer la demanda anual de 1560 hogares en el cantón Machala a partir de la biomasa residual de banano que se genera en el cantón Machala.

4. Bibliografía y Referencias

- Abril, M. F. (2016). Optimización De La Reacción De Hidrólisis Ácida De Los Residuos De La Planta De Banano , Para Mayor Rendimiento a Glucosa., 1–82.
- Agencia de Regulación y Control de Electricidad. (2016). Estadística Anual y Multianual del Sector Eléctrico Ecuatoriano. *Animal Genetics*, 1–208.
- Arroyo Vinuesa, J. S. (2016). Aprovechamiento del recurso biomasa a partir de los desechos de madera para una caldera de vapor.
- Avelino Gonçalves, F., Dos Santos, E. S., & De Macedo, G. R. (2015). Use of cultivars of low cost, agroindustrial and urban waste in the production of cellulosic ethanol in Brazil: A proposal to utilization of microdistillery. *Renewable and Sustainable*

- Energy Reviews*, 50, 1287–1303. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.05.047>
- Boundy, R. G., Diegel, S. W., Wright, L. L., & Davis, S. C. (2011). Biomass Energy Data Book: Edition 4. <https://doi.org/10.2172/1050890>
- Burra, K. R. G., & Gupta, A. K. (2019). Modeling of biomass pyrolysis kinetics using sequential multi-step reaction model. *Fuel*, 237(May 2018), 1057–1067. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.09.097>
- Carhuanco León, F. M. (2015). “ Valorización energética de la Biomasa Residual Agrícola de banano y mango en la región de Piura – Perú .”
- Carrillo Alvarado, V. B., & Valenzuela Macías, J. A. (2015). Estudio de las posibilidades de peletización de la cáscara de cacao y su utilización como biocombustible.
- CFN. (2017). Ficha Sectorial: Banano Y Plátanos, 1–21. Retrieved from - <content/uploads/2017/09/Ficha-Sectorial-Banano.pdf>
- Chávez Porras, A., & Rodríguez Gonzales, A. (2016). Aprovechamiento de residuos orgánicos agrícolas y forestales en Iberoamérica, 9(2), 90–107.
- Chong Obando, H. W. (2018). Análisis para la obtención de energía eléctrica utilizando un Gasificador de Biomasa.
- De Lucas Herguedas, A. I., Del Peso Taranco, C., & Rodríguez García, E. (2012). Biomasa, biocombustibles y sostenibilidad.
- de Oliveira Maia, B. G., de Oliveira, A. P. N., de Oliveira, T. M. N., Marangoni, C., Souza, O., & Sellin, N. (2018). Characterization and production of banana crop and rice processing waste briquettes. *Environmental Progress and Sustainable Energy*, 37(4), 1266–1273. <https://doi.org/10.1002/ep.12798>
- Díaz, G. F. (2018). biomasa residual del cultivo del limón para el abastecimiento energético de una cítrica de Tucumán . Parte II, 95(1), 1–12.
- Diez, J. P. (2017). Aprovechando residuos forestales : una alternativa de manejo integral de plantaciones de pino ponderosa en la cuenca de Arroyo del Medio, 9–14.
- Fazenda, A. J., & Tavares-Russo, M. A. (2016). Redalyc.Caracterización de residuos sólidos urbanos en Sumbe: herramienta para gestión de residuos.

- Fernández-Puratich, H., Oliver-Villanueva, J. V., Valiente, M., Verdú, S., & Albert, N. (2014). Desarrollo de pellets a partir de tres especies leñosas bajo condiciones mediterráneas. *Madera Bosques*, 20(3), 97–111. <https://doi.org/10.21829/myb.2014.203155>
- Fernandez, J. (2015). Poder calorífico, 1–22.
- Galan Riveros, X. F. (2016). Potencial energético de la biomasa residual agrícola en Colombia.
- García, B., Parra, C., Ruíz, P., Ángel, J., Javier, J., Díaz, H., & Ciro, J. (2016). Química de la biomasa vegetal y su efecto en el rendimiento durante la torrefacción: revisión Chemistry of plant biomass upon yield during torrefaction : a review.
- García Paladines, J. M. (2016). Estimación de la curva de demanda de servicio eléctrico de los hogares del sector centro sur en el Cantón Machala, año 2013: Un análisis econométrico.
- Giraldo Cano, N., & Montoya Martínez, N. (2015). Caracterización de residuos de banano (pseudotallo y hojas) mediante análisis termogravimétrico para uso potencial como biocombustible sólido, 94.
- Guerrero, A. B., Aguado, P. L., Sánchez, J., & Curt, M. D. (2016). GIS-Based Assessment of Banana Residual Biomass Potential for Ethanol Production and Power Generation: A Case Study. *Waste and Biomass Valorization*, 7(2), 405–415. <https://doi.org/10.1007/s12649-015-9455-3>
- Guerrero Hinojosa, A. B. (2014). *Valorización de Biomasa Residual Agrícola para Aprovechamiento Energético*.
- Herrera, A., Tejada, C., & Nuñez, J. (2015). Adsorción competitiva de Ni (II) y Pb (II) sobre materiales residuales lignocelulósicos. *Investigaciones Andina*, 17(31), 1355–1367.
- International Energy Agency. (2016). *Key World Energy Statistics 2016*. <https://doi.org/10.1002/art.1780270204>
- International Energy Agency. (2018a). CO2 Emissions from Fuel Combustion 2018 Highlights.

- International Energy Agency. (2018b). *Co2 Emissions From Fuel Combustion 2018 Overview*.
- Kook, J. W., & Lee, S. H. (2015). Analysis of biomass energy potential around major cities in South Korea. *Applied Chemistry for Engineering*, 26(2), 178–183. <https://doi.org/10.14478/ace.2015.1005>
- Ku, K. Z., Sazali, K., & Kamarolzaman, A. A. (2018). Characterization of fuel briquettes from banana tree waste. *Materials Today: Proceedings*, 5(10), 21744–21752. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.07.027>
- Lock Navarro, D. H. (2018). Potencial energético de los residuos de la cadena de valor del cacao (Theobroma Cacao) en la Región Madre de Dios. *Universidad Nacional Agraria La Molina*. Retrieved from <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/UNALM/3660>
- Loja Sánchez, C. P. (2017). Optimización de los residuos de cascarilla de arroz mediante pretratamiento por hidrólisis ácida para la obtención de azúcares reductores.
- López González, D. (2013). Valorización de biomasa de origen vegetal mediante procesos térmicos y termoquímicos. Retrieved from [https://ruidera.uclm.es/xmlui/bitstream/handle/10578/3393/TESIS López González.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://ruidera.uclm.es/xmlui/bitstream/handle/10578/3393/TESIS_López_González.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Marcelo Aldana, M. D., Bizzo, W. A., & Alamo Viera, M. A. (2016). Evaluación del potencial energético de los residuos de la caña de azúcar en el Perú, 2014, 14–19.
- Martínez-Guido, S. I., Ríos-Badrán, I. M., Gutiérrez-Antonio, C., & Ponce-Ortega, J. M. (2019). Strategic planning for the use of waste biomass pellets in Mexican power plants. *Renewable Energy*, 130, 622–632. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.06.084>
- Mathier, D., Saleme, P., Bragachini, M., Sánchez, F., Bragachini, M., & Méndez, J. (2014). La caña de azúcar como cultivo energético, 1–18.
- Ministeri de Agricultura, Ganaderia, A. y P. (2013). Catastro bananero del Ecuador.
- Ministerio de Electricidad y Energía Renovable. (2017). *Plan Nacional de Eficiencia Energética. Ministerio de Electricidad y Energía Renovable*.

- Ministerio de Electricidad y Energías Renovables. (2015). *Atlas Bioenergético del Ecuador*.
- Morales De La Rosa, S. (2015). HIDRÓLISIS ÁCIDA DE CELULOSA Y BIOMASA LIGNOCELULÓSICA ASISTIDA CON LÍQUIDOS IÓNICOS e. Retrieved from http://digital.csic.es/bitstream/10261/132717/1/morales_de_la_rosa_silvia.pdf
- Murciano Criado, V. (2014). Proyecto básico de una planta de biomasa.
- Nava-García, F., & Doldán-García, X. (2014). Cultivos energéticos.
- Padam, B. S., Tin, H. S., Chye, F. Y., & Abdullah, M. I. (2014). Banana by-products: an under-utilized renewable food biomass with great potential. *Journal of Food Science and Technology*, 51(12), 3527–3545. <https://doi.org/10.1007/s13197-012-0861-2>
- Palacios Bau, M. G. (2016). Caracterización química de la biomasa procedente de las hojas, pseudotallo, raquis y pseudopeciolo de la planta de banano y su relación con el poder calorífico, 98. <https://doi.org/10.1002/adma.201704028>
- Paladines Condoy, D., & Tinoco Loayza, B. (2019). Obtención de celulosa a partir de raquis de banano aplicado a la remoción de plomo y cadmio en solución acuosa.
- Palomar, L. T., Gabriel, A., Bautista, A., Montero, G., Díaz, L. C., Ramos, R. T., & Romero, E. (2015). Determinación simplificada del contenido de lignina en paja de trigo por método volumétrico y su caracterización química, 113–124.
- Peñarrieta, M., Tejeda, L., Mollinedo, P., & Villa, J. (2014). Phenolic compounds in foods. *Handbook of Food Analysis Second Edition: Physical Characterization and Nutrient Analysis*, 1, 657–715.
- Penedo Medina, M., & Sánchez del Campo Lafita, A. (2015). Pirólisis de bagazo de caña a escala de laboratorio, Parte 1: Influencia de condiciones de operación en el rendimiento de productos, XXVIII(2), 61–70.
- Piñeros-Castro, Y. (2014). *Aprovechamiento de biomasa lignocelulósica, algunas experiencias de investigación en colombia*.
- Pradhan, P., Mahajani, S. M., & Arora, A. (2018). Production and utilization of fuel pellets from biomass: A review. *Fuel Processing Technology*, 181(September),

215–232. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2018.09.021>

- Quesada, R., Salas, N., Arguedas, M., & Botero, R. (2007). Generación de energía eléctrica a partir de biogás, *3*, 227–235.
- Quintero González, J., & Quintero González, L. (2015). Perspectivas del potencial energético de la biomasa en el marco global y latinoamericano. *Gestión y Ambiente*, *18*(1), 179–188.
- Quintero Osorno, C. A., & Quiroga Velasco, L. F. (2017). Estimación del Potencial Energético a partir de la Biomasa Primaria Agrícola en el Departamento de Cundinamarca. Retrieved from <http://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/5703>
- Rivas Siota, S. (2014). Valorización de hemicelulosas de biomasa vegetal internacional doctoral thesis biomass hemicellulose valorization.
- Roberts, J., Marotta, A., & Prado, P. (2015). Assessment of dry residual biomass potential for use as alternative energy source in the party of General Pueyrredón , Argentina. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *41*, 568–583. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.08.066>
- Rojas Quiroga, H. D., & Acevedo Torres, C. E. (2017). Cuantificación del Potencial Energético de los Residuos Agrícolas de la Caña de Azúcar en el Departamento de Cundinamarca. Retrieved from <http://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/6390>
- Romanelli, G. P., & Manuel, D. (2016). Química de la biomasa y los biocombustibles.
- Sánchez, J. (2013). Evaluación energética de cáscaras de Cacao Nacional y CCN-51. *El Escorial*, *34*,56.
- Serrano, J., Mejía, W., & Ortiz, J. (2017). Determinación del Potencial de Generación Eléctrica a Partir de Biomasa en el Ecuador | Revista de la Facultad de Ciencias Químicas. *Revista de La Facultad de Ciencias Químicas*, *17*, 41–61. Retrieved from <https://publicaciones.ucuenca.edu.ec/ojs/index.php/quimica/article/view/1592>
- Serrato Monroy, C. C., & Lesmes Cepeda, V. (2016). Metodología para el cálculo de energía extraída a partir de la biomasa en el departamento de Cundinamarca.

- Tipanluisa, L., Moreno, G., & Guasumba, J. (2015). Estudio experimental de la combustión de la cascarilla de arroz en una cámara de lecho fijo. *Revista de La Facultad de Ciencias Químicas*, 0(11), 37–43.
- Tirado, D. F., Montero, P. M., & Acevedo, D. (2015). Estudio Comparativo de Métodos Empleados para la Determinación de Humedad de Varias Matrices Alimentarias Comparative Study of Methods for Moisture Determination of Several Food Matrices, 26(2), 3–10. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642015000200002>
- Torres, R., Montero, G., Beleno, M. T., Toscano, L., & Pérez, L. (2015). *Lignina obtenida de residuos agrícolas como biocombustible de tercera generación. Ciencia y Tecnología ISSN 1850-0870 (Vol. 15)*. <https://doi.org/10.18682/cyt.v1i15.290>
- Verma, M., Loha, C., Nath, A., & Kumar, P. (2017). Drying of biomass for utilising in co- fi ring with coal and its impact on environment – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, (February 2015), 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.101>
- Vézina, A., & Baena, M. (2016). Morfología de la planta del banano | The banana knowledge platform of the ProMusa network. Retrieved May 25, 2019, from <http://www.promusa.org/Morfología+de+la+planta+del+banano>
- Wobiwo, F. A., Emaga, T. H., Fokou, E., Boda, M., Gillet, S., Deleu, M., ... Gerin, P. A. (2016). Comparative biochemical methane potential of some varieties of residual banana biomass and renewable energy potential. *Biomass Conversion and Biorefinery*. <https://doi.org/10.1007/s13399-016-0222-x>

5. Anexos

5.1. Anexo1: Resultado del análisis del poder calorífico de las hojas



UNIVERSIDAD DE CUENCA
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS
LABORATORIO DE FÍSICO QUÍMICA

INFORME DE RESULTADOS

Cliente: DIEGO ANDRES AGUILAR ROMERO
Atención: DIEGO ANDRES AGUILAR ROMERO
Teléfono: 0988953008
email: ardiego96@gmail.com

RESULTADOS

Muestra 2 : Hojas
Fecha de recibido: 12 junio del 2019
Fecha de análisis: 17 junio del 2019

Parámetro	Método	Resultado	Unidades
Poder Calorífico	Bomba Calorimétrica IKA C 200	16.734	J/g

Condiciones del análisis: Peso muestra= 0,3347 g.
Temperatura inicial del sistema: 20.2839 °C

RESULTADO: Dieciséis mil setecientos treinta y cuatro joules/gramo.

Ing. Alexandra Criollo A.
Analista Laboratorio Físicoquímica

Cuenca, 17 de junio del 2019

5.2 Anexo 2: Resultado del análisis del poder calorífico del peciolo



UNIVERSIDAD DE CUENCA
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS
LABORATORIO DE FÍSICO QUÍMICA

INFORME DE RESULTADOS

Cliente: DIEGO ANDRES AGUILAR ROMERO
Atención: DIEGO ANDRES AGUILAR ROMERO
Teléfono: 0988933008
email: andiego96@gmail.com

RESULTADOS

Muestra 1 : Peciolo

Fecha de recibido: 12 junio del 2019

Fecha de análisis: 17 junio del 2019

Parámetro	Método	Resultado	Unidades
Poder Calorífico	Bomba Calorimétrica IKA C 200	14.569	J/g

Condiciones del análisis: Peso muestra= 0,2406 g.

Temperatura inicial del sistema: 20.3984 °C

RESULTADO: Catorce mil quinientos sesenta y nueve joules/gramo.

Ing. Alexandra Criollo A.
Analista Laboratorio Físicoquímica

Cuenca, 17 de junio del 2019