



Determinación de la disponibilidad de biomasa y análisis de las características y composición química de la misma, a partir de los principales desechos agroindustriales generados en la provincia de Cotopaxi

Zambrano Hidalgo, Teddy Josué

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Petroquímica

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Petroquímico

MSc. Luna Ortíz, Eduardo David

13 de abril del 2021

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE PETROQUÍMICA

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de unidad de integración curricular, **“Determinación de la disponibilidad de biomasa y análisis de las características y composición química de la misma, a partir de los principales desechos agroindustriales generados en la provincia de Cotopaxi”** fue realizado en su totalidad por el señor **Zambrano Hidalgo Teddy Josué** el cual ha sido revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Latacunga, 13 de abril del 2021



Firmado electrónicamente por:
**EDUARDO
DAVID LUNA**

Ing. Luna Ortiz Eduardo David

C.C.: 1802724912

Certificación Urkund



Document Information

Analyzed document	SoL Defensa UIC - 202051 - ZAMBRANO HIDALGO TEDDY JOSUÉ.pdf (D101550697)
Submitted	4/14/2021 6:03:00 AM
Submitted by	Luna Ortiz Eduardo David
Submitter email	edluna@espe.edu.ec
Similarity	3%
Analysis address	edluna.espe@analysis.orkund.com

Sources included in the report

SA	Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE / TesisRoger.pdf Document TesisRoger.pdf (D101550693) Submitted by: edluna@espe.edu.ec Receiver: edluna.espe@analysis.orkund.com		6
W	URL: https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/98729/RedacciA%C2%B3n%20TFG_151852981... Fetched: 12/6/2020 7:46:34 PM		1
W	URL: https://core.ac.uk/download/pdf/29400068.pdf Fetched: 12/9/2019 1:23:08 AM		1
SA	Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE / Collantes_Jeslyn_Pretratamiento (1).pdf Document Collantes_Jeslyn_Pretratamiento (1).pdf (D101550677) Submitted by: edluna@espe.edu.ec Receiver: edluna.espe@analysis.orkund.com		1
W	URL: https://www.uniremington.edu.co/wp-content/uploads/libros-de-investigacion/aprovec... Fetched: 5/8/2020 2:11:54 AM		1
SA	CONVERSIÓN DE LA BIOMASA SÓLIDA MEDIANTE LA PIROLISIS_.pdf Document CONVERSIÓN DE LA BIOMASA SÓLIDA MEDIANTE LA PIROLISIS_.pdf (D92760344)		2
W	URL: https://doi.org/10.1115/1.4032729 Fetched: 4/14/2021 6:04:00 AM		1
W	URL: https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/9169/MoncadaCuetoOrlandoCast... Fetched: 1/15/2020 6:20:57 PM		1



firmado digitalmente por:
EDUARDO
DAVID LUNA



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE PETROQUÍMICA

RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Yo, **Zambrano Hidalgo Teddy Josué** con cédula de ciudadanía N.º 1312483595, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de Unidad de Integración Curricular: **“Determinación de la disponibilidad de biomasa y análisis de las características y composición química de la misma, a partir de los principales desechos agroindustriales generados en la provincia de Cotopaxi”** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Latacunga, 13 de abril del 2021

Zambrano Hidalgo Teddy Josué

C.C.: 1312483595

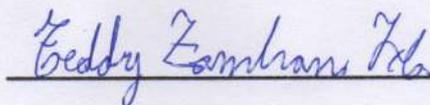
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE PETROQUÍMICA

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN

Yo, **Zambrano Hidalgo Teddy Josué**, con cédula de ciudadanía N.º 1312483595, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de Unidad de Integración Curricular: **"Determinación de la disponibilidad de biomasa y análisis de las características y composición química de la misma, a partir de los principales desechos agroindustriales generados en la provincia de Cotopaxi"**, en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Latacunga, 13 de abril del 2021



Zambrano Hidalgo Teddy Josué

C.C.: 1312483595

Dedicatoria

Con amor para mi abulietta Argentina y mi mami Mayra, gratitud infinita a las dos
mujeres más importantes en mi vida.

Agradecimiento

A mi mamá por el amor, la comprensión, la tolerancia y el apoyo que me brinda día a día,
por ser el rayo de luz en la penumbra de mis días más grises.

A mi hermana por su amor y su paciencia, por todas las veces que antepuso mis
prioridades sobre las suyas para darme una mano.

A mi familia en general por el aliento y la confianza.

A mis amigos por rescatarme del tedio cuando se podía y por ayudarme a sobrellevarlo
cuando no.

A Catherine Donoso por los conocimientos transmitidos y por la ayuda brindada en clases.

Y por último, pero no menos importante, a un par de docentes que con el tiempo fui
considerando mis maestros tanto en la academia como en la vida.

Tabla de contenidos

Carátula.....	1
Certificación	2
Certificación Urkund	3
Responsabilidad de Autoría.....	4
Autorización de Publicación	5
Dedicatoria	6
Agradecimiento	7
Tabla de contenidos	8
Índice de Figuras	13
Índice de Tablas	14
Resumen	15
Abstract.....	16
Generalidades.....	17
Antecedentes	17
Planteamiento del Problema.....	19
Justificación.....	20
Objetivos.....	22
<i>Objetivo General</i>	22

<i>Objetivos Específicos</i>	22
Hipótesis	23
Variables	23
<i>Variable Dependiente</i>	23
<i>Variables independientes</i>	23
Marco Teórico.....	24
Biomasa	24
Clasificación de la Biomasa.....	25
Propiedades de la Biomasa	26
<i>Contenido de Humedad</i>	26
<i>Poder Calorífico</i>	26
<i>Proporciones Carbono Fijo y Materia Volátil</i>	27
<i>Contenido de Cenizas/Residuos</i>	28
<i>Relación Celulosa/Lignina</i>	28
Caracterización Química de la Biomasa Lignocelulósica	29
<i>Celulosa</i>	29
<i>Hemicelulosa</i>	30
<i>Lignina</i>	31
Análisis Elemental.....	38
<i>Análisis Aproximado</i>	38

	10
<i>Análisis Final</i>	39
Principales Fuentes de Biomasa en la Provincia de Cotopaxi	50
Metodología	51
Modalidad de la Investigación	51
Tipo de Investigación	51
<i>Investigación Documental-Bibliográfica</i>	51
Diseño de la Investigación	51
<i>Diseño Documental-Bibliográfico</i>	51
Nivel de Investigación	51
<i>Nivel Exploratorio</i>	52
<i>Nivel Descriptivo</i>	52
Técnicas e Instrumentos de Recolección de Información	52
<i>Análisis Documental</i>	52
<i>Análisis de Contenido</i>	52
<i>Procesamiento de Información</i>	52
<i>Discusión de Resultados</i>	52
Análisis e Interpretación de los Resultados	53
Disponibilidad de Biomasa en la provincia de Cotopaxi	53
Desechos Agroindustriales de Banano	54
<i>Preparación de la Muestra</i>	54

	11
<i>Análisis Aproximado</i>	54
<i>Análisis Final</i>	55
<i>Análisis de poder calorífico</i>	55
<i>Fracciones lignocelulósicas</i>	55
Desechos Agroindustriales de Cacao	56
<i>Preparación de la muestra</i>	56
<i>Análisis aproximado</i>	56
<i>Análisis final</i>	56
<i>Análisis de poder calorífico</i>	56
<i>Fracciones lignocelulósicas</i>	57
Desechos Agroindustriales de Palma Africana	57
<i>Preparación de la muestra</i>	57
<i>Análisis aproximado</i>	57
<i>Análisis final</i>	58
<i>Análisis de poder calorífico</i>	58
<i>Fracciones lignocelulósicas</i>	58
Desechos Agroindustriales de Rosas	58
<i>Preparación de la muestra</i>	58
<i>Análisis aproximado</i>	59
<i>Análisis final</i>	59

	12
<i>Análisis de poder calorífico</i>	<i>59</i>
<i>Fracciones lignocelulósicas.....</i>	<i>60</i>
Desechos Agroindustriales de Caña de Azúcar	60
<i>Preparación de la muestra</i>	<i>59</i>
<i>Análisis aproximado</i>	<i>60</i>
<i>Análisis final.....</i>	<i>60</i>
<i>Análisis de poder calorífico</i>	<i>60</i>
<i>Fracciones lignocelulósicas.....</i>	<i>60</i>
Discusión de resultados	61
<i>Humedad</i>	<i>61</i>
<i>Materia Volátil.....</i>	<i>63</i>
<i>Cenizas.....</i>	<i>64</i>
<i>Carbono fijo.....</i>	<i>65</i>
<i>Poder calorífico.....</i>	<i>66</i>
<i>Análisis final.....</i>	<i>67</i>
<i>Fracción Lignocelulósica.....</i>	<i>68</i>
Conclusiones.....	70
Bibliografía	72

Índice de Figuras

Figura 1. <i>Enlaces de hidrógeno inter e intramoleculares en la celulosa</i>	30
Figura 2. <i>Estructura de la hemicelulosa</i>	31
Figura 3. <i>Estructura de tres monómeros de fenilpropano</i>	32

Índice de Tablas

Tabla 1. <i>Clasificación de la biomasa según su origen y propiedades</i>	25
Tabla 2. <i>Fracción lignocelulósica de distintos tipos de biomasa</i>	34
Tabla 3. <i>Análisis experimental de distintos tipos de biomasa</i>	40
Tabla 4. <i>Productos que generan biomasa en la provincia de Cotopaxi</i>	50
Tabla 5. <i>Disponibilidad de Biomasa en la provincia de Cotopaxi</i>	53
Tabla 6. <i>Humedad de la biomasa analizada</i>	62
Tabla 7. <i>Material volátil de la biomasa analizada</i>	63
Tabla 8. <i>Cenizas de la biomasa analizada</i>	64
Tabla 9. <i>Carbono fijo de la biomasa analizada</i>	65
Tabla 10. <i>Poder calorífico de la biomasa analizada</i>	66
Tabla 11. <i>Análisis final de la biomasa escogida</i>	67
Tabla 12. <i>Fracción lignocelulósica de la biomasa analizada</i>	69

Resumen

Se llevó a cabo una revisión bibliográfica sobre las características y composición química de los desechos originados por los productos agroindustriales de mayor producción en la provincia de Cotopaxi, con el fin de seleccionar los residuos más aptos que puedan servir como materia prima en un proceso de biorefinación. Cotopaxi es una provincia que destaca a nivel nacional por su producción agraria de acuerdo con las fuentes revisadas, produce banano, cacao, palma africana, rosas y caña de azúcar, entre otros productos agroindustriales a menor escala; estos cultivos producen desechos que por lo general no son aprovechados o se convierten en composta para las plantaciones, el fin de este proyecto es determinar si se le puede dar otra aplicación en base a la evaluación de sus características. Las pruebas documentales que fueron revisadas (análisis aproximado, análisis final y determinación de la fracción lignocelulósica) fijaron parámetros de: humedad, materia volátil, carbono fijo, contenido de cenizas, composición elemental y cantidad porcentual de celulosa, hemicelulosa y lignina en cada uno de los tipos de biomasa escogidos. Estos resultados recabados bibliográficamente determinaron la calidad de la biomasa seleccionada a partir de un análisis comparativo y sirvieron para escoger los residuos con las cualidades óptimas para la conversión en combustibles y químicos de importancia industrial y económica.

Palabras clave:

- **BIOMASA**
- **ANÁLISIS APROXIMADO**
- **ANÁLISIS FINAL**
- **FRACCIÓN LIGNOCELULÓSICA**

Abstract

A literature review was carried out on the characteristics and chemical composition of the wastes originated by the most produced agroindustrial products in the province of Cotopaxi, to select the most suitable wastes that could serve as raw material in a biorefining process. Cotopaxi is a province that stands out nationally for its agricultural production according to the sources reviewed, it produces bananas, cocoa, African palm, roses, and sugar cane, among other agroindustrial products on a smaller scale; these crops produce wastes that are generally not used or are converted into compost for the plantations, the purpose of this project is to determine if they can be given another application based on the evaluation of their characteristics. The documentary tests that were reviewed (approximate analysis, final analysis, and determination of the lignocellulosic fraction) established parameters of: moisture, volatile matter, fixed carbon, ash content, elemental composition and percentage amount of cellulose, hemicellulose and lignin in each of the types of biomasses chosen. These bibliographically collected results determined the quality of the selected biomass from a comparative analysis and served to choose the residues with the optimum qualities for conversion into fuels and chemicals of industrial and economic importance.

Key words:

- **BIOMASS**
- **APPROXIMATE ANALYSIS**
- **FINAL ANALYSIS**
- **LIGNOCELLULOSIC FRACTION**

Capítulo I

1. Generalidades

1.1. Antecedentes

Para lograr una reactivación económica satisfactoria la agricultura representa un activo estratégico en muchos países latinoamericanos, las exportaciones de productos agrícolas figuran como uno de los pilares fundamentales de la economía. Para otros países del mismo sector el solo hecho de abastecer a su población de alimentos es uno de los retos que aún no pueden superar a pesar de los ingentes recursos de los que disponen (Trigo, 1995).

A finales del siglo XX se observó un creciente desarrollo del medio rural debido al impacto económico positivo que tenían los productos de origen agrícola, esto causó un incremento en la demanda de tierras en varios países de América Latina por parte de empresas transnacionales dispuestas a invertir en la producción de alimentos y biocombustibles (Zoomers, 2010). La vinculación con el mercado global, que ha permitido esta expansión de industria, provoca que regiones como la Sierra Ecuatoriana, antes considerada tradicional, cambie sus paisajes por viveros que se extienden a lo largo de todo el territorio destinado para la producción agrícola, estos indican la presencia de cultivos de flores y brócoli. Este cambio drástico en el paisaje agrario demuestra una importante modificación en la estructura productiva de esta zona (Martínez, 2017).

Según un estudio diseñado para el Plan SIGFLORES, el número de organizaciones florícolas de Cotopaxi llega a 82, lo cual representa el 21,8 % del total nacional; y el número de hectáreas que ocupa el sector florícola es de 647,5, es decir, el 18,5 % del área nacional dedicada a este cultivo. Realmente, se trata de un cultivo concentrado en 376 empresas, a

escala nacional, que no necesita cubrir mucha área terrestre, puesto que llega a representar sólo 3 504,5 hectáreas, de las cuales el 71 % corresponde al cultivo de rosas. La cantidad de invernaderos en Cotopaxi figura el 22,6 % del total nacional y alcanzaba el 23,3 % del total de metros cuadrados dedicados a flores a escala nacional (Martínez, 2017).

En 2012, según el Banco Central del Ecuador, el 43 % de la producción del brócoli se exportó a Estados Unidos, el 16 % a Japón, el 15 % a Alemania, el 11 % a Bélgica y el resto a otros países europeos. La calidad de este producto y sus virtudes alimenticias, nutritivas e incluso medicinales son factores que han ampliado la demanda proveniente de países desarrollados. (Martínez, 2017)

Se estimaba que Cotopaxi controlaba en el 2010 el 43,5 % de la producción nacional de brócoli, con un rendimiento de 20,8 toneladas por hectárea, desde el norte del cantón Latacunga hasta los cantones Saquisilí, Pujilí y Salcedo, en el sur de la provincia. (Martínez, 2017)

En la actualidad la caña de azúcar ocupa 104 558 hectáreas a grado nacional, representando el 6,62% del área total dedicada a la agricultura; de esta expansión, la provincia de Cotopaxi engloba el 13 %, 14 290 hectáreas se destinan para la producción de este cultivo (Tumipamba, 2020).

Según el MAG, el cantón Sigchos dedica el 6.89% de su territorio para el cultivo de caña de azúcar, no obstante, La Maná y Pujilí destinan a penas el 0.39% y 0.19% respectivamente de su extensión territorial (Tumipamba, 2020).

De la mano de esta producción agrícola masiva para abastecer la demanda nacional y extranjera, se generan cantidades considerables de desechos agroindustriales que no son aprovechados. A estos residuos de origen agroindustrial se los denomina biomasa. En la

actualidad se busca utilizar la biomasa para la producción de energía limpia, este tema de estudio es de vital importancia para países en vías de desarrollo como Ecuador, ya que promueve el cambio de la matriz energética.

1.2. Planteamiento del Problema

En un sentido amplio, la biomasa se define como toda la materia orgánica generada por procesos biológicos. En el campo de la energía, “biomasa” se refiere a la materia orgánica (viva o residual) que puede usarse como material combustible o fuente para la generación de energía, calor o biocombustibles (Fantini, 2017).

La leña, el carbón vegetal y los pellets de madera se consideran a menudo una fuente tradicional de bioenergía utilizada por el sector rural de los países en desarrollo para cocinar y calentar. El porcentaje de producción de carbón vegetal es alto en África, Asia y América del Sur debido a su consumo en las tareas domésticas, que tiene un potencial energético cuatro veces mayor en comparación con los pellets de madera (Dheeran & Reddy, 2018).

Según un informe realizado en el 2016 por la World Energy Resources, la participación porcentual de la biomasa generada en Sudamérica y el Caribe es del 5.1% para uso tradicional y un 12% para aplicaciones de nuevas tecnologías (Martínez, 2017).

Ecuador es un productor de biomasa debido a que dispone de ingentes recursos agrícolas, forestales y pecuarios de cuyos desechos se puede obtener suficiente materia orgánica para producir energía limpia y renovable. Se ha identificado tres sectores con potencial bioenergético en el país: en primer lugar, el agrícola, con productos como el arroz, banano, cacao, café, caña de azúcar, maíz duro, palma africana, palmito, piña y plátano; el segundo es el

sector pecuario, con las actividades avícola, porcina y vacuna; el tercero es el forestal (ESIN Consultora S.A., 2014).

La cantidad de biomasa producida por la provincia de Cotopaxi, tomando en cuenta únicamente los productos que más desechos generan a nivel provincial (banano, cacao, palma africana, plátano y desechos forestales) es de alrededor de doscientas mil toneladas por año (ESIN Consultora S.A., 2014).

Debido a la demanda generada por los productos de exportación la disponibilidad de biomasa en Ecuador es abundante, en la provincia de Cotopaxi el sector alimentario, forestal y florícola juega un papel importante en la generación de biomasa de origen vegetal, estos desechos tienen numerosas aplicaciones como la de ser composta para los sembríos o alimento para ganado, sin embargo, gran parte de esta potencial fuente energética es desechada o quemada. Estas prácticas provocan que materia prima valiosa se desperdicie o sea combustionada deliberadamente, los residuos de origen vegetal contienen una molécula compleja llamada lignocelulosa que está constituida por celulosa, hemicelulosa y lignina, las cuales con un tratamiento adecuado pueden ser los precursores para la producción de biocombustibles y otros químicos de importancia industrial y económica.

1.3. Justificación

La biomasa derivada de árboles, residuos agroforestales, pastos, plantas, plantas acuáticas y cultivos es una materia prima renovable versátil e importante para la industria química. A través del proceso de fotosíntesis, las plantas convierten el dióxido de carbono y el agua en bioquímicos de metabolitos primarios y secundarios. Ambos son productos químicos de importancia industrial, los metabolitos primarios son los carbohidratos (azúcar simple, celulosa,

hemicelulosa, almidón, etc.) y la lignocelulosa presente en gran volumen en la biomasa. Los metabolitos secundarios son bioquímicos de alto valor como gomas, resinas, cauchos, ceras terpenos, terpenoides, esteroides, triglicéridos, taninos, ácidos vegetales, alcaloides, etc. están presentes en bajo volumen en las plantas (Naik et al., 2010).

Se pueden aplicar diversas químicas y procesos para convertir materiales lignocelulósicos en combustibles y productos químicos valiosos. Por ejemplo, las reacciones térmicas se aprovechan en la pirólisis de biomasa a carbón vegetal, aceite y/o gases y su gasificación a gas de síntesis y/o hidrógeno. Todos estos productos se pueden utilizar sin más procesamiento para proporcionar calor o energía. Además, el gas de síntesis y, en algunos casos, el aceite de pirólisis también se puede convertir en combustibles líquidos de alta calidad. Alternativamente, la lignocelulosa también se puede hidrolizar para liberar la lignina y despolimerizar los polisacáridos en azúcares. Posteriormente, los azúcares se pueden convertir en una variedad de combustibles y componentes químicos a través de rutas químicas o biológicas. Todas estas conversiones implican reacciones complejas del carbohidrato, la lignina y, eventualmente, entre los carbohidratos y la lignina (Lange, 2007).

La disponibilidad de biomasa con la que se cuenta en la provincia de Cotopaxi puede ser bien aprovechada para la implementación de tecnologías referentes a la producción de energía sustentable, tales como biocombustibles. Este análisis se ve respaldado por la abundante producción que generan los desechos agroindustriales en la provincia de Cotopaxi. El factor que determinará el alcance del presente proyecto será la cantidad de lignocelulosa contenida en la biomasa a analizar.

1.4. Objetivos

1.4.1. *Objetivo General*

Determinar la disponibilidad de biomasa y analizar las características y composición química de la misma, a partir de los principales desechos agroindustriales generados en la provincia de Cotopaxi

1.4.2. *Objetivos Específicos*

Identificar los distintos tipos de desechos agroindustriales existentes en la provincia de Cotopaxi.

Detallar la producción de biomasa a partir de las distintas fuentes que generan residuos agroindustriales en la provincia de Cotopaxi.

Elaborar tablas detalladas a partir de la información obtenida, con criterios que permitan escoger la biomasa adecuada, que servirá como materia prima para la extracción de celulosa, hemicelulosa y lignina.

Realizar una investigación minuciosa sobre análisis hechos a la biomasa seleccionada, para determinar las características que establezcan la idoneidad de estos residuos para la biorefinación.

Sugerir el tipo de biomasa lignocelulósica óptima para la biorefinación en combustibles y químicos de valor agregado.

1.5. Hipótesis

Los desechos agroindustriales de la provincia de Cotopaxi cumplen con los parámetros requeridos que les permita ser la materia prima para una biorefinación en combustibles y químicos de importancia industrial y económica.

1.6. Variables

1.6.1. Variable Dependiente

Biomasa apta para biorefinación.

1.6.2. Variables independientes

Contenido de humedad.

Poder calorífico.

Proporción de carbono fijo y material volátil.

Contenido de cenizas/residuos.

Relación Celulosa/Lignina.

Capítulo II

2. Marco Teórico

2.1. Biomasa

Se denomina biomasa a toda materia producida biológicamente. Biomasa es el término utilizado para referirse a toda la materia viva de la tierra, se usa generalmente cuando se habla de cultivos y estiércol. Se puede producir energía a partir de la biomasa derivada de plantas y animales tales como desechos forestales, desechos agrícolas y agroindustriales, desechos humanos y animales. Se estima que la producción de biomasa mundial es de aproximadamente 46 billones de toneladas métricas por año (Demirbaş, 2001).

Las plantas y los animales almacenan energía, al igual que los desechos que estos producen, la fotosíntesis hace esto posible dado que permite a las plantas captar la energía solar, asegurando su desarrollo y convirtiéndolas en una fuente de alimentos. Esta energía acumulada se conoce como energía de biomasa, el aprovechamiento de la biomasa como combustible no es más que el proceso inverso de la fotosíntesis (Demirbaş, 2001).

En la naturaleza, la biomasa se descompone en moléculas sencillas que liberan calor en el proceso. Por esta razón se considera que la biomasa es una fuente de energía sustentable y que, en un principio, no incorpora dióxido de carbono al medio ambiente como lo hacen los combustibles fósiles. La versatilidad ligada a la biomasa la convierte en la única fuente renovable de carbono y puede convertirse en combustibles sólidos, líquidos y gaseosos. La energía neta disponible a partir de la biomasa cuando se quema varía entre aproximadamente 8 MJ/kg para la madera verde, 20 MJ/kg para la materia vegetal seca y 55 MJ/kg para el metano, en comparación con aproximadamente 27 MJ/kg para el carbón (Demirbaş, 2001).

A nivel mundial se cuenta con una producción anual de biomasa lignocelulósica de aproximadamente 220 mil millones de toneladas secas al horno (ODT) por año (Rambo et al., 2015).

2.2. Clasificación de la Biomasa

Se propone dividir la biomasa de acuerdo con su origen y sus propiedades como se detalla en la Tabla 1 (Khan et al., 2009).

Tabla 1

Clasificación de la biomasa según su origen y propiedades

Basado en el Origen	Basado en las Propiedades
Desechos primarios: desechos de granos y desechos forestales	Madera y combustible leñoso (madera blanda y dura recién cosechada)
Desechos secundarios: Residuos de comida procesada y serrín	Biomasa agrícola (Tallo, pasto, rastrojo)
Desechos ternarios: Madera usada en construcción	Biomasa acuática (Algas)
Cultivos energéticos: Tubérculos de yuca	Desechos animales y humanos (huesos, estiércol, etc.)
	Biomasa municipal (residuos sólidos, residuos orgánicos, lodos, desperdicios)
	mezclas de biomasa

Nota. Esta tabla ha sido reproducida de “Biomass Combustion in Fluidized Bed Boilers: Potential Problems and Remedies” por Khan et al., 2009.

2.3. Propiedades de la Biomasa

2.3.1. Contenido de Humedad

La humedad contenida se presenta en dos formas que son de importancia al estudiar la biomasa: humedad intrínseca (humedad del material sin la incidencia de las condiciones climáticas) y humedad extrínseca (la incidencia de las condiciones climáticas predomina durante la recolección sobre el contenido de humedad total de la biomasa) (McKendry, 2002).

El contenido de humedad extrínseca es el factor más influyente durante la etapa de recolección de la biomasa. La contaminación del suelo y otros detritos provocada por condiciones climáticas desfavorables disminuye la calidad de la biomasa a la hora de la recolección, esto causa que el tratamiento posterior sea complejo y económicamente inviable dado que aumenta el contenido de cenizas del material (McKendry, 2002).

Para biomazas con bajo contenido de humedad el camino de bioconversión sugerido es la conversión térmica, ésta por lo general requiere materias primas con una humedad que no supere el 50%, cuando se utiliza materias primas con alto contenido de humedad en esta tecnología el balance energético general se ve afectado negativamente (McKendry, 2002).

Para la conversión térmica de biomasa a combustibles líquidos la mejor fuente de materia prima son las especies de plantas herbáceas y leñosas debido a su bajo contenido de humedad (McKendry, 2002).

2.3.2. Poder Calorífico

La energía contenida en la biomasa que se libera debido a la combustión en el aire se denomina poder calorífico o valor calorífico (CV). Se suele medir en términos del contenido de energía por unidad de masa o volumen; así, MJ/kg para sólidos, MJ/L para líquidos o MJ/m³ para

gases. El CV de un combustible se puede expresar de dos formas, el CV bruto (GCV), o valor calorífico superior (HHV) y el CV neto (NCV), o poder calorífico inferior (LHV) (McKendry, 2002).

El HHV es la cantidad máxima de energía potencialmente recuperable de una fuente de biomasa establecida, esto incluye el calor latente contenido en el vapor de agua, se podría decir que es el contenido energético total liberado cuando el combustible se quema en el aire. La cantidad real de energía aprovechada varía de acuerdo con la tecnología de conversión empleada y la forma de esa energía, es decir, gas combustible, aceite, vapor, etc. El HHV no muestra un dato real sobre la energía recuperada de la biomasa, debido a que el vapor de agua no se puede utilizar eficazmente, por este motivo el valor que se utiliza para determinar la energía generalmente es el LHV (McKendry, 2002).

El contenido de humedad reduce la energía aprovechable de la biomasa, es decir el poder calorífico es proporcional al contenido de humedad (McKendry, 2002).

2.3.3. *Proporciones Carbono Fijo y Materia Volátil*

El análisis parte del estudio de combustibles sólidos, como el carbón, la energía se almacena en dos formas: carbono fijo y volátiles. El material volátil (VM) de un combustible sólido es la materia que se pierde en forma de gas (incluida la humedad) cuando se expone la muestra a 950°C durante 7 minutos. El carbono fijo (FC), por otra parte, es la masa restante después de haber eliminado el material volátil, excluyendo el contenido de cenizas y humedad (McKendry, 2002).

El análisis próximo de un combustible es la prueba de laboratorio usada para determinar el contenido de VM y FC de la biomasa seleccionada. La facilidad con que la biomasa puede

encenderse y posteriormente gasificarse u oxidarse se determina a partir del contenido de material volátil y carbono libre (McKendry, 2002).

El análisis elemental de un combustible presenta la proporción de C, N, H, O y S junto con el contenido de cenizas, esta práctica se conoce como análisis final de un combustible y permite determinar la relación O/C y H/C, el aumento de las razones O/C, H/C disminuye el valor energético de un combustible debido a que hay menor energía contenida en los enlaces C-O, C-H, que en los enlaces C-C (McKendry, 2002).

2.3.4. Contenido de Cenizas/Residuos

La descomposición química de un combustible de biomasa sea esta por procesos termoquímicos o bioquímicos, produce residuos sólidos, cuando la combustión se da en el aire este residuo sólido se denomina ceniza y es una variable de medición estándar para combustibles sólidos y líquidos. El contenido de ceniza aumenta los costos de manipulación y transformación de la biomasa en combustible lo que provoca que el proceso sea inviable económicamente. Las cenizas pueden representar problemas operativos importantes, dado que puede reaccionar para formar una escoria (fase líquida formada a temperaturas elevadas que pueden reducir el rendimiento de la planta) (McKendry, 2002).

2.3.5. Relación Celulosa/Lignina

Esta relación es de especial importancia en los procesos de conversión bioquímica. La celulosa se degrada más rápido que la lignina esto causa que la conversión global del material vegetal que presenta carbono en su composición como celulosa sea mayor que para las plantas cuyo componente mayoritario es la lignina, este factor determina la selección del tipo de biomasa que se escogerá para una conversión de esta naturaleza (McKendry, 2002).

2.4. Caracterización Química de la Biomasa Lignocelulósica

Para entender el diseño de bioproceso es indispensable analizar la singular estructura física y química de la biomasa lignocelulósica. La lignocelulosa es una estructura compleja que se constituye principalmente de lignina (complejo de polímeros orgánicos fenilpropanoide), celulosa (homopolisacárido no ramificado compuesto por unidades D-glucopiranosilo) y hemicelulosas (heteropolímero compuesto por xilano, glucuronoxilano, arabinoxilano, glucomanano, y xiloglucano) (Narayanaswamy et al., 2013).

La biomasa agrícola (paja de trigo, paja de arroz, tallo de maíz, bagazo de caña de azúcar, etc.) y forestal (madera) está constituida por lignocelulosa en proporciones que varían de acuerdo con el tipo de materia disponible (Anwar et al., 2014).

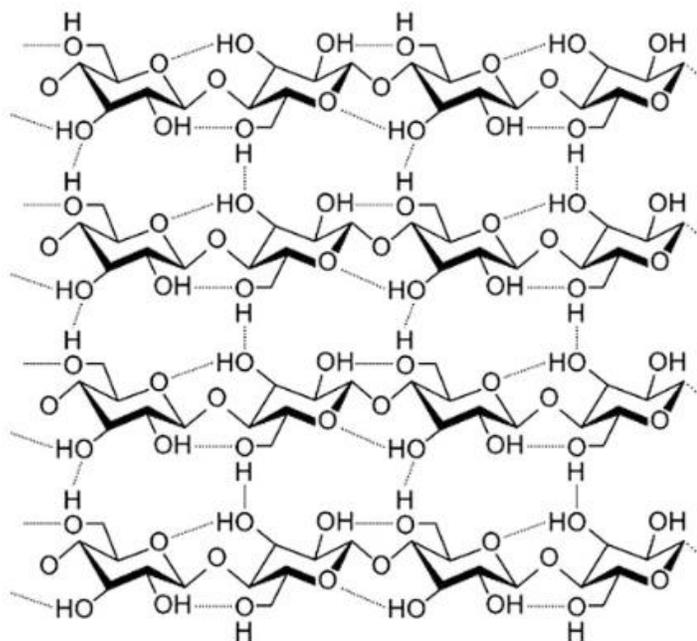
2.4.1. Celulosa

Es el biopolímero con mayor disponibilidad en la naturaleza, su fórmula es $(C_6H_{10}O_5)_n$ y se puede encontrar en forma cristalina o amorfa. Es un homopolímero lineal cuya estructura consiste en la sucesión de unidades de glucosa que se conectan por enlaces glicosídicos $\beta(1 \rightarrow 4)$ que presentan un alto grado de polimerización (aproximadamente grado nativo de polimerización de 10,000 -15,000). Las paredes de las células vegetales se constituyen de celulosa la cual le otorga resistencia mecánica a la planta (Yang et al., 2011).

Los enlaces de hidrogeno intermoleculares formados por la celulosa mantienen adherido el polímero a la pared celular. La rigidez y resistencia mecánica se debe a la disposición de la estructura a formar puentes de hidrógeno inter e intramoleculares, esto también la vuelve resistente a la celulólisis (descomposición de la celulosa en unidades básicas y celodextrinas) en disolventes orgánicos y agua como se muestra en la Figura 1 (Dheeran & Reddy, 2018).

Figura 1

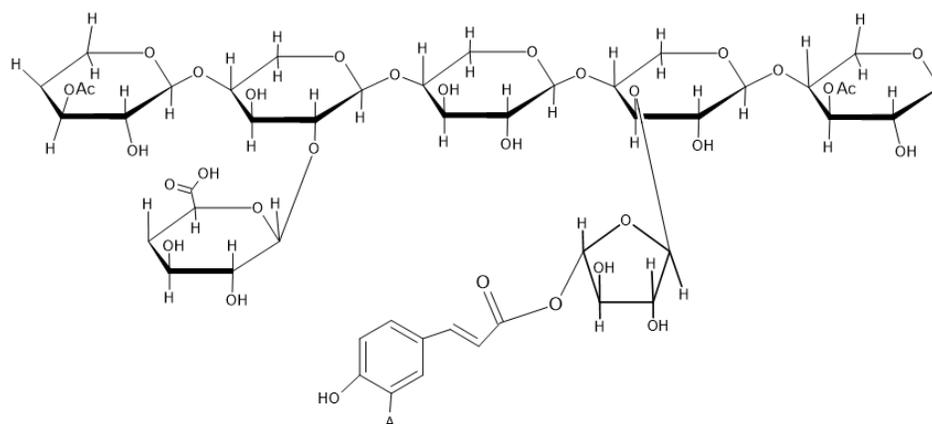
Enlaces de hidrógeno inter e intramoleculares en la celulosa



Nota. Imagen recuperada de “Biorefining of Lignocelluloses: An Opportunity for Sustainable Biofuel Production” por Dheeran y Reddy, 2018

2.4.2. Hemicelulosa

La hemicelulosa es un biopolímero renovable que presenta proporciones considerables en la biomasa de origen agroforestal, es el segundo polímero natural más abundante. Es un heteropolímero ramificado que se constituye de pentosa (D-xilosa, D- arabinosa) y hexosa (D- glucosa, D-manosa, y D-galactosa) azúcares y sus ácidos derivados como los ácidos glucurónico y galacturónico como se presenta en la Figura 2 (Narayanaswamy et al., 2013).

Figura 2*Estructura de la hemicelulosa*

El grado de polimerización de la hemicelulosa en comparación con la celulosa es moderado, se encuentra entre 500 - 3000 unidades de azúcar. La composición de la hemicelulosa en la biomasa cambia de árboles a pastos. El xilano y glucomanano son los componentes principales de la madera dura, al contrario, la madera blanda es rica en galactoglucomanano mientras que la fracción de xilano es muy pequeña (Narayanaswamy et al., 2013).

Entre los componentes hemicelulósicos, el xilano es un sustrato importante para la producción de bioenergía y bioquímicos. El xilano está compuesto por una cadena principal que consta de un número variable de β -1,4-D- residuos de xilopiranosilo (70 - 130 en xilano de madera blanda y 150 - 200 en xilano de madera dura). (Dheeran & Reddy, 2018)

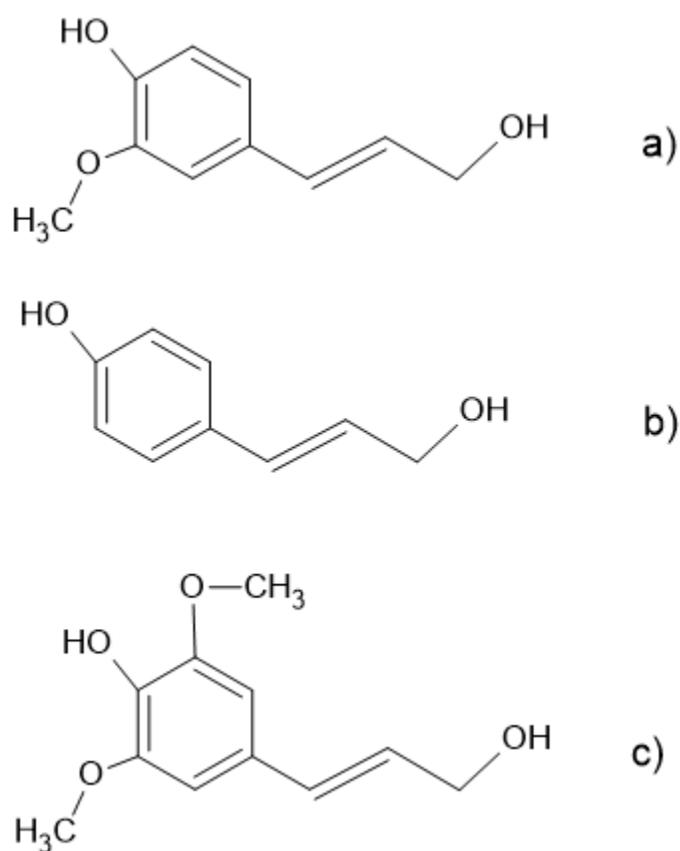
2.4.3. Lignina

Es un homopolímero presente en abundancia en las paredes celulares de las plantas de tierras secas, es el tercer biopolímero más copioso en la naturaleza, esta molécula es la

encargada de proporcionar resistencia mecánica a las plantas y las protege en la conducción del agua. Posee monómeros aromáticos y carece de monómeros de azúcares lo que la diferencia de la celulosa y la hemicelulosa. La lignina se constituye de tres monómeros de fenilpropano diferentes: a) alcohol de coniferilo, (b) alcohol de cumarilo y (c) alcohol siringílico (Figura 3). (Narayanaswamy et al., 2013)

Figura 3

Estructura de tres monómeros de fenilpropano



Nota. (a) Alcohol coniferílico, (b) alcohol cumarílico y (c) alcohol siringílico

El reparto de dichos monómeros difiere de una especie a otra, ejemplificando, los árboles de madera dura tienen dentro alcohol siringílico, en lo que el alcohol de coniferilo está predominantemente en las coníferas (árboles de madera blanda) (Narayanaswamy et al., 2013).

La lignina es un componente importante de la pared celular vegetal para proporcionar fuerza a las plantas, pero se ha convertido en un obstáculo para acceder a los azúcares atrapados en el complejo celulósico y hemicelulósico para los procesos de biocombustible (Narayanaswamy et al., 2013).

La Tabla 2 muestra la composición estructural de algunas biomásas lignocelulósicas. Para la mayoría de estas biomásas, la biodegradación de la celulosa es mayor que la de la lignina y la hemicelulosa. Cabe señalar que la conversión de celulosa es mayor que la de la lignina debido a su biodegradación (Olatunji et al., 2018).

Tabla 2*Fracción lignocelulósica de distintos tipos de biomasa*

Clase de Biomasa Lignocelulósica	Lignina	Hemicelulosa	Celulosa
Roble	35.4	21.9	43.2
Eucalipto	21.5	18.4	54.1
Pino	26.8	24.0	45.6
Abeto	27.5	21.2	50.8
Álamo	15.5-16.3	26.2-28.7	58.8-53.3
Abeto de Douglas	27.0	11.0	44.0
Madera de ailanthus	22.2	22.6	46.7
Albizia	33.8	6.7	59.5
Madera de abedul	15.7	40.0	25.7
Madera de haya	21.9	31.8	45.8
Aserrín para muebles	22.16	32.63	37.23
Madera subabul	24.7	24.0	39.8
Roble	35.4	21.9	43.2
Pino	26.8	24.0	45.6

Clase de Biomasa Lignocelulósica	Lignina	Hemicelulosa	Celulosa
Abeto	27.5	21.2	50.8
Astillas de madera	19.0	31.8	31.8
Certeza de madera	31.0	47	22
Elote	15.16.6	28.7-35	40.3-45
Tallo de maíz	15.59	43.01	22.82
Rastrojo de maíz	14.4	30.7	51.2
Bagazo	18.3	22.6	41.3
Cáscara de anacardo	40.1	18.6	41.3
Residuos de banano	14.0	14.8	13.2
Paja de cebada	27.7	29.7	48.6
Desperdicio de té	40.0	19.9	30.2
Cáscara de arroz	14.3	24.3	31.3
Paja de arroz	13.6	22.7	37.0
Cáscara de mijo	14.0	26.9	33.3
Bagazo de sorgo	10.0	24.0	41.0
Cáscara de avellana	51.5	15.7	22.9

Clase de Biomasa Lignocelulósica	Lignina	Hemicelulosa	Celulosa
Cubierta de semilla de avellanas	53.0	15.7	29.6
Cáscara de cacahuete	30.2	18.7	35.7
Cáscara de coco	28.7	25.1	36.3
Cáscara de nueces	30-40	25-30	25-30
Residuos de uva de paja de lino	28.9	34.40	36.70
Hoja de tabaco	12.1	34.40	36.30
Tallo de tabaco	27.0	28.2	42.4
Fibra de líber semilla de lino	23	25	47
Yute de fibra de líber	21.26	18-21	45-53
Fibra de líber kenaf	15-19	22-23	31-39
Pulpa de café	18.8	46.3	35
Fibra de hoja de abacá	8.8	17.3	60.8
Sisal de fibra de hoja	7-9	21-24	43-56
Caña gigante	19.0-17.6	30.0-29.5	37.0-36.1
Hierba Luisa	19.1-17.8	27.2-27.8	38.2-36.5
Peniseto	18.5-16.5	22.53-21.93	41.8-40.9

Clase de Biomasa Lignocelulósica	Lignina	Hemicelulosa	Celulosa
Pasto plateado	17.5-17.1	26.2-25.6	44.1-43.3
Hierba de gato	4.70	32	40
Alpiste cinta	7.6	42.6	29.70
Hierba alfa	17-19	27-32	33-38
Copias de sauce	20	49.3	14.1
Pasto de la huerta	4.7	40	32
Jacinto de agua	3.5-3.55	48.7-49.2	18.2-18.4
Bambú	21-31	15-26	26-43
Caña de azúcar	22.9	31.3	45.8
Tupinambo	5.70	25.99	4.50
Alcachofa de Jerusalén (octubre)	5.05	20.95	5.48
Alcachofa de Jerusalén (septiembre)	8.76	53.86	5.18
Cáñamo	9.02	39.27	25.96
Madera urbana	-	-	-
Enverdecimiento urbano	22.73	22.96	6.86
Biomasa municipal	-	-	-

Clase de Biomasa Lignocelulósica	Lignina	Hemicelulosa	Celulosa
Lodos de depuradora	-	-	-
Material de desecho	24.7	29.2	50.6
Periódico	18-30	25-40	40-55
Papel kraft	20.8	9.9	57.3
MSW generales	10-14	9-16	33-49
Derechos alimenticios	11.4	7.2	55.4
Basura clasificada	20	20	20

Nota. Tabla adaptada de “Experimental Investigation of Termal Properties of Lignocellulosic Biomass: A Review”, por Olatunji et al., 2018.

2.5. Análisis Elemental

2.5.1. Análisis Aproximado

El análisis aproximado puede dar una vasta gama de datos acerca de las propiedades de las muestras de biomasa. Cataloga la biomasa en términos de humedad, carbono fijo, materia volátil y contenido de cenizas. El contenido de humedad (M) es un indicador de la proporción de agua presente en una muestra de biomasa. El contenido de humedad establece el factor de conversión entre las diversas bases de estudio de datos de biomasa. Esto se puede manifestar como un porcentaje del peso de la biomasa que se obtiene, se seca al aire, se seca al horno y se seca sin cenizas. La base recibida se establece desde el peso bruto de la muestra de la misma

forma que llegó al laboratorio y previo a cualquier pretratamiento. La base de secado al aire se fundamenta en la condición de equilibrio entre la muestra y la humedad atmosférica con la exclusiva importancia de la humedad inherente de la biomasa. La base seca no estima el total de humedad de la biomasa, así sea externa o inherente. La base seca independiente de cenizas está condicionada a que no haya ni humedad ni ceniza (Olatunji et al., 2018).

El contenido de ceniza (A) son los restos de una combustión completa de biomasa con los compuestos primarios que integran óxidos de sílice, aluminio, hierro, calcio, titanio, sodio, potasio. El contenido de ceniza es una de las características más investigadas de la biomasa, no obstante, los estudios no han logrado una comprensión completa debido a su complejo comportamiento. El contenido de cenizas se puede usar para seleccionar la materia inorgánica a granel, la afinidad predominante de los recursos y compuestos de materia orgánica e inorgánica y la posibilidad de contaminación (Olatunji et al., 2018).

2.5.2. Análisis Final

El análisis final es la determinación de los componentes elementales de la biomasa. El resultado del análisis final es más descriptivo que el análisis aproximado, este estudio se puede usar para establecer el poder calorífico de la biomasa. La finalidad de este análisis es establecer los elementos orgánicos C, H, N, S y O (Olatunji et al., 2018).

La Tabla 3 muestra el poder calorífico y la composición elemental de varios tipos de biomasa, los resultados muestran que la mezcla de varios materiales de biomasa tiene un efecto positivo sobre el contenido de energía y el poder calorífico, pero no se informó nada sobre la composición elemental y los valores aproximados (Olatunji et al., 2018).

Tabla 3*Análisis experimental de distintos tipos de biomasa*

Grupo de Biomasa Lignocelulósica	Poder Calorífico (MJ/kg)	Análisis Aproximado				Composición Elemental				
		Humedad	Material Volátil	Carbono Fijo	Cenizas	C	H	N	S	O
Corteza de abedul	18.50-18.72	11.13	78.7	20.9	0.3	48.4	5.6	0.2	-	-
Cáscara de oliva	19.2	9.2	70.3	26.1	3.6	50.0	6.2	1.6	-	42.2
Cáscara de avellana	-	9.0	69.3	28.3	1.4	52.9	5.6	1.4	-	42.7
Cubierta de semillas de avellanas	19.4	6.8	71.2	27.0	1.8	51.0	5.4	1.3	-	40.9
Madera de abeto	19.7	7.6	70.2	28.3	1.5	51.9	6.1	0.3	-	40.9
Madera de haya	17.4-18.9	7.4-9.7	74.0	24.6	0.4	49.5	6.2	0.4	-	40.9
Madera de ailanthus	19.0	8.1	73.5	24.8	1.7	49.5	6.2	0.3	-	41.0
Albizia	17.4	9.7	72.7	25.5	1.8	46.4	5.8	0.6	1.7	45.5
Muebles de serrín	15.79	7.1	79.43	12.69	0.78	47.4 2	5.67	0.2	-	46.7 1
Roble	-	0.6	89.7	9.5	0.2	-	-	-	-	-
Pinar	19.6	5.8	82.4	10.3	1.5	49.0	6.4	0.1 4	0.0 1	44.4

Grupo de Biomasa Lignocelulósica	Poder Calorífico (MJ/kg)	Análisis Aproximado				Composición Elemental				
		Humedad	Material Volátil	Carbono Fijo	Cenizas	C	H	N	S	O
Sierra de pino	20.54	13.58	70.23	15.06	1.12	50.5 4	7.08	0.1 5	0.5 7	41.1 1
Corteza de eucalipto	15.7	10.7	76.1	19.7	10.7	38.7	4.5	0.3	<1. 8	54.9
Madera de eucalipto	18.6	7.7	82.6	16.4	1.0	48.7	6.2	0.3	-	44.8
Madera de subabul	19.78	-	85.6	-	0.9	48.2	5.9	0	-	45.1
Residuos de plátanos	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Pajita de paja	-	7.3	56.4	15.4	20.9	48.75	5.98	1.99	-	43.28
Bagazo	14.67-16.29	13.2	71.0-84.2	13.8	2.1-2.9	43.8- 51.71	5.32- 5.8	0.33 -0.4	-	42.64 -47.1
Hojas de caña de azúcar	18.4	6.7	79.0	8.6	5.7	48.9	6.5	0.2	-	44.4
Timas de caña de azúcar	18.3	6.6	74.9	12.5	6.0	49.0	6.6	0.6	-	43.8
Casta de mandioca	18.1	8.5	69.7	14.7	7.1	48.8	6.7	1.1	-	43.4
Rizoma de mandioca	21.7	8.8	65.0	15.0	11.2	49.5	6.5	1.1	-	42.9
Mazorca de maíz	16.6	12.1	86.5	12.5	1.0	49.0	5.4	0.3	-	44.6

Grupo de Biomasa Lignocelulósica	Poder Calorífico (MJ/kg)	Análisis Aproximado				Composición Elemental				
		Humedad	Material Volátil	Carbono Fijo	Cenizas	C	H	N	S	O
Residuos de té	16.8	6.5	85.0	13.6	1.4	48.6	5.5	0.5	<0.1	40.9
Rastrojo de maíz	17.6	10.6	78.7	17.6	3.7	42.6	5.06	0.83	0.09	36.52
Tallo de maíz	16.54	-	80.1	-	6.8	41.9	5.3	0	-	46.0
Hoja de tabaco	16.3	8.4	72.6	11.2	17.2	-	-	-	-	-
Tallo de tabaco	17.6	8.9	79.6	18.0	2.4	-	-	-	-	-
Paja de trigo	18.7-20.3	6.0-8.5	63.0-78.3	14.4-23.5	1.3-13.5	41.6-45.5	5.1-6.1	0.14	0.06	34.1-52.12
Paja de cebada	15.7	6.9	78.5	4.8	9.8	41.4	6.2	0.63	0.01	51.7
Paja de lino	17.0	7.9	80.3	8.8	3.0	43.1	6.2	0.68	0.09	49.9
Fibra de coco	14.67	-	82.8	-	0.9	47.6	5.7	0.2	-	45.6
Cáscara de coco	20.50	-	80.2	-	0.7	50.2	5.7	0.2	-	45.6
Cáscara de mijo	17.48	-	80.7	-	18.1	42.7	6.0	0.1	-	33.0

Grupo de Biomasa	Poder Calorífico (MJ/kg)	Análisis Aproximado				Composición Elemental				
		Humedad	Material Volátil	Carbono Fijo	Cenizas	C	H	N	S	O
Cáscara de arroz	15.29	-	81.6	-	23.5	38.9	5.1	0.6	-	32.0
Paja de arroz	16.78	-	80.2	-	19.8	36.9	5.0	0.4	-	37.9
Cáscara de cacahuate	18.65	-	83.0	-	5.9	48.3	5.7	0.8	-	39.4
Paja de avena.	-	8.2	73.9	12.5	5.4	48.8	6.0	0.08	0.5	44.6
Desperdicio de algodón	16.65	4.8	72.05	20.05	3.1	40.6	6.0	0.19	0.9	53.2
Residuos de soja	18.77	5.8	70.5	19.0	4.7	43.8	6.3	1.4	0.8	48.5
Aceite de oliva	20.54	-	-	-	-	47.63	6.41	0.97	0.08	44.92
Aserrín de eucalipto	16.30	-	-	-	-	44.80	6.03	0.84	0.03	48.30
Monte bajo de sauce	20	2.8	87.6	17.3	6.3	49.9	6.5	0.2	-	39.9
Hierba luisa	16.3	9.84	69.14	12.90	8.09	42	5.24	0.60	0.17	33.97
Pasto elefante	15.61	10.04	65.0	14.66	6.0	44.50	5.4	1.4	-	31.8

Grupo de Biomasa Lignocelulósica	Poder Calorífico (MJ/kg)	Análisis Aproximado				Composición Elemental				
		Humedad	Material Volátil	Carbono Fijo	Cenizas	C	H	N	S	O
Pasto de la huerta	-	-	-	-	-	56.1	5.9	0.4	0.03	37.6
Pasto esparto	19.1	5.2	80.5	16.8	2.2-8	46.94	6.44	0.86	0.0	43.56
Caña salvaje	24.98	4.34	78.57	12.5	4.54	48.7	9.96	0.36	-	42.96
Hierba Timothy	16.7	5.0	77.9	16.0	1.1	42.4	6.0	1.03	0.15	50.4
Cáñamo	15.54	8.75	-	-	-	2.97	-	-	-	-
Paja	16.02	8.4	-	-	-	2.10	-	-	-	-
Junco	15.94	9.16	-	-	-	2.76	-	-	-	-
Caña canaria	15.12	15.68	-	-	-	5.13	-	-	-	-
Imperata cilíndrico	-	8.55	84.14	0.36	6.95	50.04	5.92	1.15	-	42.9
Eragrostis airoides	-	8.275	86.84	1.23	3.6	41.02	6.72	1.14	-	51.12
Torora	-	13.95	80.06	2.18	3.81	52.90	5.84	1.22	-	40.04
Arundinella khasiana	-	10.37	80.06	2.18	8.12	41.26	5.40	1.25	-	52.10

Grupo de Biomasa	Poder Calorífico (MJ/kg)	Análisis Aproximado				Composición Elemental				
		Humedad	Material Volátil	Carbono Fijo	Cenizas	C	H	N	S	O
Echinochloa stagnina		10.27	83.19	0.41	6.13	44.98	5.66	1.86	-	45/50
Periódico		-	-	-	-	-	-	-	-	-
Lodos de depuradora	6.56	-	29.01	3.49	67.50	12.79	1.74	1.20	0.55	16.22
Lodos fisicoquímicos	19.10	-	69.1	0.5	30.4	32.78	5.81	0.04	0.91	60.09
Lodos bioquímicos	17.60	-	65.53	6.6-1	27.86	31.75	5.76	1.54	1.88	59.08
Cartulina	13.81	-	-	-	-	38.49	5.68	0.82	0.09	54.92
Plástico	44.81	-	-	-	-	82.61	14.01	0.74	0.00	2.64
Caucho sintético	37.82	-	-	-	-	83.96	7.93	0.97	1.14	6.00

Grupo de Biomasa Lignocelulósica	Poder Calorífico (MJ/kg)	Análisis Aproximado				Composición Elemental				
		Humedad	Material Volátil	Carbono Fijo	Cenizas	C	H	N	S	O
Biocarbón activado y caña de azúcar. (25%75%50%50%75%25%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Biocarbón activado y aserrín de madera. (25%75%50%50%75%25%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Biocarbón activado y esparto (25%75%50%50%75%25%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Moneda triturada	-	4.7	79.0	11.1	5.2	45.4	6.3	1.9	0.32	46.1
Papel usado mezclado	-	8.8	76.8	6.8	7.6	52.3	7.2	0.2	0.08	40.2
Madera de demolición	-	16.3	63.4	14.5	5.8	51.7	6.4	1.1	0.09	40.7
Residuos plásticos de invernaderos	-	2.5	61.0	5.5	31.0	70.9	11.2	1.5	0.01	16.4

Grupo de Biomasa	Poder Calorífico (MJ/kg)	Análisis Aproximado				Composición Elemental				
		Humedad	Material Volátil	Carbono Fijo	Cenizas	C	H	N	S	O
Combustible derivado de residuos	-	4.2	70.3	0.5	25.0	53.8	7.8	1.1	0.47	36.8

Nota. Tabla adaptada de “Experimental Investigation of Termal Properties of Lignocellulosic Biomass: A Review”, por Olatunji et al., 2018

2.6. Principales Fuentes de Biomasa en la Provincia de Cotopaxi

En la Tabla 4 se puede observar las principales fuentes de biomasa de la provincia de Cotopaxi junto con su producción anual, la cantidad de residuos generados y la energía bruta que contienen.

Tabla 4

Productos que generan biomasa en la provincia de Cotopaxi

Superficie (km ²)	Producto	Producción Absoluta (t/año)	Residuos (t/año)	Energía Bruta (TJ/año)
8 325,67	Banano	113 400,3	74 844,20	944,94
	Forestal	16 932,21	36 404,25	701,12
	Cacao	5 053,69	62 570,80	423,22
	Palma Africana	9 388,23	24 055,46	307,45
	Plátano	11 845,01	7 817,71	98,70
	Total	156 845,01	205 692,42	2 475,43

Nota. Tabla adaptada de “Atlas Bioenergético de Ecuador”, por ESIN Consultora S.A., 2014.

Capítulo III

3. Metodología

En el presente capítulo se mostrará la sucesión de los pasos a seguir para cumplir con los objetivos de la investigación propuesta.

3.1. Modalidad de la Investigación

La investigación propuesta es de carácter cualitativo, puesto que en base a descripción, análisis e interpretación de datos y estudios de varios autores permitirá elegir la mejor biomasa disponible para una posterior biorefinación.

3.2. Tipo de Investigación

3.2.1. Investigación Documental-Bibliográfica

Este estudio se presenta como una investigación documental-bibliográfica, debido a que ayudará a tomar una decisión en base a investigaciones realizadas por otros autores, la información recabada en los estudios a considerar debe ser organizada y valorada previamente, para que puedan dar una solución a la problemática planteada.

3.3. Diseño de la Investigación

3.3.1. Diseño Documental-Bibliográfico

Se emplearán datos recabados de fuentes bibliográficas, tales como: libros, revistas científicas, artículos científicos, atlas bioenergéticos, etc. La información revisada establecerá los criterios a tomar en cuenta para seleccionar el tipo de biomasa idónea para este estudio.

3.4. Nivel de Investigación

La profundidad del estudio se determina en función del nivel de investigación.

3.4.1. Nivel Exploratorio

Se escoge este nivel de investigación en vista de que no se encontró un estudio previo que determine la calidad de los desechos agroindustriales de la provincia de Cotopaxi para su potencial biorefinación.

3.4.2. Nivel Descriptivo

Se selecciona este nivel de investigación dado que se describirán los métodos utilizados para el análisis próximo, análisis final y análisis de la composición lignocelulósica para escoger el tipo de biomasa adecuado para la investigación.

3.5. Técnicas e Instrumentos de Recolección de Información

3.5.1. Análisis Documental

Se emplea esta técnica debido a que la información recolectada a través de estudios encontrados en la web será ordenada y archivada conforme al aporte que presenten para estimar las variables de interés, el instrumento a utilizar es una laptop.

3.5.2. Análisis de Contenido

La creación de citas y referencias bibliográficas aplica este método para identificar las características bibliográficas de las fuentes escogidas, para este fin se utilizará el software Mendeley.

3.5.3. Procesamiento de Información

Se hará una revisión detallada y crítica de la información compilada con el propósito de descartar estudios que presentan datos contradictorios, de difícil interpretación, incomprensibles, etc.

3.5.4. *Discusión de Resultados*

La discusión de resultados se realizará teniendo en cuenta la elección de la biomasa de origen agroindustrial de la provincia de Cotopaxi con mejores características para la biorefinación.

Capítulo IV

4. Análisis e Interpretación de los Resultados

El presente estudio muestra los resultados de los análisis a tomar en cuenta para determinar las propiedades de los desechos agroindustriales: análisis aproximado, análisis final y proporción lignocelulósica, los datos referentes a estos ensayos aplicados a los tipos de biomasa con mayor disponibilidad en la provincia de Cotopaxi se establecen bibliográficamente.

4.1. Disponibilidad de Biomasa en la provincia de Cotopaxi

En la Tabla 5 se denotan los productos que generan desechos agroindustriales significativos en la provincia de Cotopaxi y la cantidad de estos.

Tabla 5

Disponibilidad de biomasa en la provincia de Cotopaxi

Disponibilidad	
Productos	Residuos (ton/año)
Banano	74 844.20
Cacao	62 570.80
Palma africana	24 055.46
Rosas	Sin datos
Caña de azúcar	Sin datos

Nota. Tabla adaptada de “Atlas Bioenergético de Ecuador”, por ESIN Consultora S.A., 2014.

4.2. Desechos Agroindustriales de Banano

Únicamente se tomará en cuenta los datos extraídos bibliográficamente de las muestras semisecas de banano.

4.2.1. Preparación de la Muestra

De acuerdo con la información recabada los residuos de banano para el estudio realizado se clasificaron en dos, muestras de hojas húmedas que fueron cortadas directamente del banano y muestras semisecas que eran las hojas caídas y en descomposición. Siguiendo la norma ASTM E828-1 ambas muestras fueron trituradas y tamizadas hasta llegar a un tamaño de partícula menor a 2,5 mm (Fernandes et al., 2013).

4.2.2. Análisis Aproximado

Según la investigación que sirvió de referencia para este apartado la norma ASTM E871-82 estableció el contenido de humedad como la pérdida de peso de la biomasa cuando se expone a condiciones de 103 °C en una estufa, el material volátil se determinó con el uso de un horno mufla a 950 °C basado en la norma ASTM E872-82, la norma ASTM E1755-01 sirvió para conocer el contenido de cenizas sometiendo a la muestra a 575 °C (Fernandes et al., 2013). La cantidad de carbono fijo se obtuvo por diferencia utilizando la fórmula:

$$FC = 100 - (\%Ash - \%VM)$$

Donde:

FC: Carbono fijo

Ash: Cenizas

VM: Material volátil

4.2.3. *Análisis Final*

La fuente bibliográfica revisada señala que, la composición elemental se determinó en una atmósfera de oxígeno puro con un analizador Perkin-Elmer CHN 2400, los gases de combustión fueron medidos automáticamente, el contenido de azufre se obtuvo con el equipo Spectro Ciros CCD (espectrometría de emisión atómica con plasma acoplado inductivamente, ICP-AES), mientras que el contenido de oxígeno se alcanzó por diferencia (Fernandes et al., 2013).

4.2.4. *Análisis de poder calorífico*

Tomando en cuenta la referencia citada se estipula que, las muestras se trituraron hasta producir un polvo fino y homogéneo, los polvos se recombinaron y secaron a 110 °C y 110 mmHg de presión durante un periodo de 6 horas y se colocaron en un desecador por 12 horas. Los polvos se presentaron en forma de gránulos de 1 cm de diámetro y de aproximadamente 0,5 g. La combustión de las muestras se realizó en presencia de O₂ a una presión de 20-30 atm. Se utilizó ácido benzoico como estándar para determinar la capacidad calorífica del calorímetro. Este análisis se realizó según NBR 8633 y NBR 11956 basado en la ASTM D2015 para la determinación del valor calorífico bruto de carbón y coque (Fernandes et al., 2013).

4.2.5. *Fracciones lignocelulósicas*

El estudio referencial indica que, se utilizó el método de Van Soest y Wine para obtener las fracciones de celulosa, hemicelulosa y lignina (Fernandes et al., 2013).

4.3. Desechos Agroindustriales de Cacao

4.3.1. Preparación de la muestra

Tomando en cuenta el trabajo citado se afirma que, las muestras estudiadas fueron cáscaras de las mazorcas de cacao, la biomasa se secó al sol durante 1 a 2 semanas, se redujo la muestra a un tamaño de partícula de 1 mm, por triturado mecánico y tamizado (malla BS). (Adjin-Tetteh et al., 2018)

4.3.2. Análisis aproximado

La investigación revisada expresa que, la humedad se determinó por pérdida de peso constante en un horno de secado a 105 °C y 110 °C, el contenido de cenizas se obtuvo como residuo luego de quemar a un peso constante durante 4 horas a 600 °C, el material volátil se midió como la pérdida progresiva de peso de la muestra durante 10 minutos a 900 °C. El contenido de carbono fijo se obtuvo por diferencia de las propiedades mencionadas. (Adjin-Tetteh et al., 2018)

4.3.3. Análisis final

Según la información obtenida de la fuente mencionada, el contenido de carbono, hidrógeno, nitrógeno y azufre fueron establecidos mediante varios métodos analíticos y la cantidad de oxígeno se obtuvo por diferencia. (Adjin-Tetteh et al., 2018)

4.3.4. Análisis de poder calorífico

El mayor poder calorífico (HHV) se calculó sobre una correlación desarrollada por Channiwala y Parikh (2002) que se muestra a continuación:

$$\text{HHV}_{\text{dry}} (\text{MJ/kg}) = 0.3491\text{C} + 1.1738\text{H} + 0.1005\text{S} - 0.1034\text{O} - 0.151\text{N} - 0.0211\text{A}$$

4.3.5. Fracciones lignocelulósicas

No se encontraron datos sobre la preparación de las muestras, condiciones de operación de los análisis y normas a utilizar, sin embargo, el estudio expone los resultados del contenido lignocelulósico presente en las cáscaras de las mazorcas de cacao basando la información en estudios preliminares de otros autores (Vásquez et al., 2019).

4.4. Desechos Agroindustriales de Palma Africana

Únicamente se tomará en cuenta los datos extraídos bibliográficamente de las muestras del racimo de frutas vacío (EFB).

4.4.1. Preparación de la muestra

La investigación referida sostiene que, se prepararon tres tipos de residuos de palma africana, la palma de aceite (OPF), la cáscara de palmiste (PKS) y el racimo de frutas vacío (EFB). Las muestras de OPF y EFB se cortaron en trozos más pequeños y se secaron hasta un contenido de humedad por debajo del 15%. El tamaño de PKS es ideal, por lo tanto, no necesitó ningún proceso de cambio de tamaño adicional. El PKS también se secó hasta un rango de contenido de humedad similar. El OPF astillado tenía un tamaño de 3 cm de longitud mientras que el EFB se briquetó en forma cúbica con un tamaño de 3x3x3 cm³. (Mahmood et al., 2015)

4.4.2. Análisis aproximado

Conforme con el trabajo validado se indica que, el análisis próximo se realizó para determinar la humedad, materia volátil, cenizas y contenido de carbono fijo de las muestras con base en ASTM D3172 - ASTM D3175. (Mahmood et al., 2015)

4.4.3. *Análisis final*

La fuente referencial explica que, se llevó a cabo el análisis final para determinar el contenido de carbono, hidrógeno, nitrógeno y oxígeno mediante el uso del analizador CHNS-O. La mayoría de los elementos de la muestra se conocían mediante la detección del pico del gráfico resultante, pero el contenido de oxígeno se determinó mediante la diferencia del porcentaje total de elementos. (Mahmood et al., 2015)

4.4.4. *Análisis de poder calorífico*

Según el trabajo revisado, el poder calorífico se determinó utilizando calorímetro de bomba IKA-WERKE. (Mahmood et al., 2015)

4.4.5. *Fracciones lignocelulósicas*

De acuerdo con la información acuñada se indica que, los contenidos de celulosa, hemicelulosa y lignina de EFB se establecieron mediante análisis de métodos de fibra de detergente ácido (ADF), fibra de detergente neutro (NDF) y lignina de detergente ácido (ADL). (Omar et al., 2011)

4.5. *Desechos Agroindustriales de Rosas*

4.5.1. *Preparación de la muestra*

En el estudio revisado no se toma en cuenta las hojas para el análisis, solo el material leñoso, por lo que estos dos deben separarse. La parte leñosa de la flor se pesa húmeda y seca para poder aproximar el promedio diario de flores secas. No se reporta la forma de secado. (Bogale, 2017)

4.5.2. *Análisis aproximado*

De acuerdo con la fuente referencial se señala que, el comportamiento termoquímico de la biomasa de desechos florales, como el contenido de humedad, el contenido de cenizas, la materia volátil y el carbono fijo, se determinaron mediante procedimientos estándar. El contenido de humedad se estableció por la pérdida de peso que se produce cuando una muestra se seca en un horno de laboratorio a 105 °C durante 1 hora. La materia volátil se obtuvo mediante la medición de la pérdida de peso después de la combustión de aproximadamente 1 g de biomasa en un horno a 950 °C durante 6 min. Para determinar el contenido de cenizas, las muestras se calentaron en un horno de cenizas de laboratorio a 750 °C durante al menos 3 horas. (Bogale, 2017)

4.5.3. *Análisis final*

La información recabada estipula que, para la determinación de carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno y azufre, que constituyen la biomasa no se reporta un procedimiento en la publicación revisada, se menciona que se utiliza un analizador final, pero no se especifica el tipo, ni la norma a seguir. (Bogale, 2017)

4.5.4. *Análisis de poder calorífico*

La fuente bibliográfica examinada señala que, se pesó una muestra de biomasa de desechos de flores secas y se colocó en un calorímetro de bomba digital para determinar el poder calorífico. Luego, se selló el calorímetro digital de la bomba y se encendió eléctricamente la muestra de biomasa. La combustión completa de la biomasa libera calor que se midió a través del cambio de temperatura, del baño de agua que rodea al calorímetro de la bomba. El calor de combustión se pudo calcular a partir del aumento de temperatura resultante. (Bogale, 2017)

4.5.5. Fracciones lignocelulósicas

En el trabajo referenciado se explica que, la composición lignocelulósica del tallo de las rosas se determinó mediante el método analítico que se describe en la investigación “Caracterización de Biomasa Lignocelulósica Usando Cinco Pasos Sencillos” realizado por Ventura, Sagnite y colaboradores en el año 2020. (Ventura et al., 2020)

4.6. Desechos Agroindustriales de Caña de Azúcar

4.6.1. Preparación de la muestra

Tomando en cuenta la referencia citada se denota que, el bagazo de caña de azúcar recogido se secó al sol durante 2 días y se almacenó en bolsas de polietileno. Aproximadamente 1 kg de bagazo se secó adicionalmente en un horno de aire caliente a 105 °C durante 2 horas. Después del secado, el residuo se molió utilizando un molinillo Wiley y se preparó un tamaño de partícula de 250-500 um utilizando tamices Indian Standard (IS). (Varma & Mondal, 2017)

4.6.2. Análisis aproximado

Según la investigación que sirvió de referencia para este apartado se utilizó la norma ASTM 871-82 para determinar las propiedades del bagazo de la caña de azúcar, el contenido de humedad se determinó introduciendo la mezcla en un horno a 105 °C hasta que alcanzó un peso constante, para establecer el contenido de cenizas se utilizó un horno de mufla según el procedimiento ASTM-D 3174-04, se tomó un 1 g de muestra que se colocó en un crisol, posteriormente se calentó en el horno mufla durante 4 horas a 600 °C con una tolerancia de 10 °C, luego se deja enfriar la muestra y se lleva a los desecadores. El material volátil se obtuvo siguiendo la norma ASTM-D 3175-07, las muestras tenían una masa de 1 g cada una, se llevó a un horno de mufla durante 7 minutos a una temperatura de 950 ± 10 °C, luego se colocó la

muestra en los desecadores, la pérdida de peso se expresó como materia volátil en las muestras. El porcentaje de carbono fijo se determinó por diferencia. (Varma & Mondal, 2017)

4.6.3. *Análisis final*

De acuerdo con el trabajo usado de referencia, para determinar la proporción de carbono (C), hidrógeno (H), nitrógeno (N) y azufre (S) se utilizó un analizador elemental (Vario EL III, alemán) con un inyector automático. La cantidad de oxígeno (O) se estableció por diferencia. (Varma & Mondal, 2017)

4.6.4. *Análisis de poder calorífico*

La investigación referencial indica que, el valor calorífico superior (HHV) del bagazo de caña de azúcar se determinó en el calorímetro Parr 6300 Bomb. (Varma & Mondal, 2017)

4.6.5. *Fracciones lignocelulósicas*

Según las referencias, la composición lignocelulósica del bagazo de la caña de azúcar se determinó mediante el método analítico que se describe en la investigación “Pirólisis rápida de biomasa en reactor de caída libre para gas rico en hidrógeno” realizado por Li, Shiguang y colaboradores en el año 2004. (Varma & Mondal, 2017)

4.7. *Discusión de resultados*

En esta sección se elegirán los tipos de desechos agroindustriales cuyas características señalan una potencial materia prima para la biorefinación, esta decisión se tomará en base a las propiedades de estos residuos.

4.7.1. *Humedad*

Considerando que la humedad es un factor que reduce el poder calorífico de la biomasa, el alto contenido en los residuos de cacao determina que en el análisis de este parámetro es el

desecho agroindustrial menos viable para una biorefinación, sin embargo, no representa un problema, ya que los tratamientos de conversión térmica, que suelen ser los más baratos, pueden trabajar con una alimentación de biomasa cuya humedad sea cercana al 50% o menos. Los valores de humedad para los desechos restantes son próximos entre sí y señalan a los residuos de palma africana y caña de azúcar como los más idóneos para la biorefinación. La Tabla 6 muestra los datos de humedad para los tipos de biomasa analizados.

Tabla 6

Humedad de la biomasa analizada

Humedad	
Productos	(wt %)
Banano	8,3 ± 0,3
Cacao	11,07
Palma africana	5,18
Rosas	8,335
Caña de azúcar	5,4

Nota. Tabla adaptada de “Thermochemical characterization of banana leaves as a potential energy source”, por Fernandes et al., 2013; “Industrial Crops & Products Thermochemical conversion and characterization of cocoa pod husks a potential agricultural waste from Ghana”, por Adjin-Tetteh et al., 2018; “Characterisation and Potential Use of Biochar from Gasified Oil Palm Wastes”, por Mahmood et al., 2015; “Preparation of Charcoal Using Flower Waste”, por Bogale, 2017; “Physicochemical Characterization and Pyrolysis Kinetic Study of Sugarcane Bagasse Using Thermogravimetric Analysis”, por Varma & Mondal, 2017.

4.7.2. *Materia Volátil*

En relación con la materia volátil, cuyo porcentaje se detalla en la Tabla 7, se espera que sus valores en el análisis aproximado sean altos, dado que esta propiedad determina la facilidad con la que se encienden los tipos de biomasa estudiados lo cual está ligado estrechamente a la energía contenida en la materia. Así, se observa que los desechos de palma africana y caña de azúcar producen altos porcentajes de materia volátil, seguidos de los residuos de banano y rosas, la biomasa procedente del cacao denota una dispersión considerable al ser comparada con las otras, lo que descarta la posibilidad de ser seleccionada como una materia prima apta para la bioconversión.

Tabla 7

Material volátil de la biomasa analizada

Materia Volátil	
Productos	(wt %)
Banano	78,8 ± 0,4
Cacao	61,73
Palma africana	82,58
Rosas	71,310
Caña de azúcar	80,2

Nota. Tabla adaptada de “Thermochemical characterization of banana leaves as a potential energy source”, por Fernandes et al., 2013; “Industrial Crops & Products Thermochemical conversion and characterization of cocoa pod husks a potential agricultural waste from Ghana”, por Adjin-Tetteh et al., 2018; “Characterisation and Potential Use of Biochar from Gasified Oil

Palm Wastes”, por Mahmood et al., 2015; “Preparation of Charcoal Using Flower Waste”, por Bogale, 2017; “Physicochemical Characterization and Pyrolysis Kinetic Study of Sugarcane Bagasse Using Thermogravimetric Analysis”, por Varma & Mondal, 2017.

4.7.3. Cenizas

Las cenizas son residuos indeseables dado que pueden llegar a formas escorias que impiden el buen funcionamiento de los procesos a los que la biomasa podría servir como fuente energética, en la Tabla 8 se puede observar que la caña de azúcar presenta ventaja sobre los demás tipos de desechos agroindustriales tomados en cuenta debido a que presenta un bajo porcentaje de cenizas, residuos como los de las rosas, el banano y la palma africana muestran un porcentaje moderado de cenizas, mientras que el cacao es de por sí inviable para una biorefinación, por su alto contenido de cenizas.

Tabla 8

Cenizas de la biomasa analizada

Cenizas	
Productos	(wt %)
Banano	8,7 ± 0,3
Cacao	16,24
Palma africana	8,79
Rosas	5,960
Caña de azúcar	3,1

Nota. Tabla adaptada de “Thermochemical characterization of banana leaves as a potential energy source”, por Fernandes et al., 2013; “Industrial Crops & Products Thermochemical

conversion and characterization of cocoa pod husks a potential agricultural waste from Ghana”, por Adjin-Tetteh et al., 2018; “Characterisation and Potential Use of Biochar from Gasified Oil Palm Wastes”, por Mahmood et al., 2015; “Preparation of Charcoal Using Flower Waste”, por Bogale, 2017; “Physicochemical Characterization and Pyrolysis Kinetic Study of Sugarcane Bagasse Using Thermogravimetric Analysis”, por Varma & Mondal, 2017.

4.7.4. Carbono fijo

En la Tabla 9 se muestran los porcentajes de carbono fijo en la biomasa escogida, la palma africana tiene un porcentaje pequeño en comparación con los demás desechos, seguido de la caña de azúcar, los desechos restantes presentan valores cercanos entre sí.

Tabla 9

Carbono fijo de la biomasa analizada

Carbono Fijo	
Productos	(wt %)
Banano	12,5
Cacao	10,96
Palma africana	3,45
Rosas	14,395
Caña de azúcar	11,3

Nota. Tabla adaptada de “Thermochemical characterization of banana leaves as a potential energy source”, por Fernandes et al., 2013; “Industrial Crops & Products Thermochemical conversion and characterization of cocoa pod husks a potential agricultural waste from Ghana”, por Adjin-Tetteh et al., 2018; “Characterisation and Potential Use of Biochar from Gasified Oil

Palm Wastes”, por Mahmood et al., 2015; “Preparation of Charcoal Using Flower Waste”, por Bogale, 2017; “Physicochemical Characterization and Pyrolysis Kinetic Study of Sugarcane Bagasse Using Thermogravimetric Analysis”, por Varma & Mondal, 2017.

4.7.5. Poder calorífico

La energía que pueden ceder los desechos lignocelulósicos por unidad de masa se denomina poder calorífico, entre más alto es el poder calorífico de los residuos agroindustriales más viable se vuelve la bioreferenciación, en la Tabla 10 se muestra que el cacao cuenta con el poder calorífico más bajo, en tanto que la energía de la que disponen los demás residuos es bastante cercana, se puede observar en orden decreciente de poder calorífico de los desechos: banano, palma africana, caña de azúcar y rosas.

Tabla 10

Poder calorífico de la biomasa analizada

Poder calorífico HHV	
Productos	(MJ/kg)
Banano	19,8 ± 0,6
Cacao	12,48
Palma africana	19
Rosas	17,9
Caña de azúcar	18,0

Nota. Tabla adaptada de “Thermochemical characterization of banana leaves as a potential energy source”, por Fernandes et al., 2013; “Industrial Crops & Products Thermochemical conversion and characterization of cocoa pod husks a potential agricultural waste from Ghana”,

por Adjin-Tetteh et al., 2018; “Characterisation and Potential Use of Biochar from Gasified Oil Palm Wastes”, por Mahmood et al., 2015; “Preparation of Charcoal Using Flower Waste”, por Bogale, 2017; “Physicochemical Characterization and Pyrolysis Kinetic Study of Sugarcane Bagasse Using Thermogravimetric Analysis”, por Varma & Mondal, 2017.

4.7.6. *Análisis final*

En la Tabla 11 se muestran los resultados del análisis final, el aumento de la relación O/C disminuye el valor del poder calorífico, lo que resulta desfavorable para los fines establecidos, el menor valor de O/C en el análisis final pertenece a las rosas con 0,87, los desechos restantes de caña de azúcar, cacao, banano y palma africana mantienen una relación O/C que oscila entre 1,10 y 1,20.

Tabla 11

Análisis final de la biomasa escogida

Análisis final (wt %)					
Elementos	Banano	Cacao	Palma africana	Rosas	Caña de azúcar
C	43,5 ± 0,04	48,70	42,08	48,5	44,86
H	6,3 ± 0,03	0,75	7	5,8	5,87
N	1,3 ± 0,09	1,19	0,99	3,62	0,24
S	0,2 ± 0,05	0,97	-	0,08	0,06
O	48,7	48,39	49,93	42	48,97

Nota. Tabla adaptada de “Thermochemical characterization of banana leaves as a potential energy source”, por Fernandes et al., 2013; “Industrial Crops & Products Thermochemical conversion and characterization of cocoa pod husks a potential agricultural waste from Ghana”,

por Adjin-Tetteh et al., 2018; “Characterisation and Potential Use of Biochar from Gasified Oil Palm Wastes”, por Mahmood et al., 2015; “Preparation of Charcoal Using Flower Waste”, por Bogale, 2017; “Physicochemical Characterization and Pyrolysis Kinetic Study of Sugarcane Bagasse Using Thermogravimetric Analysis”, por Varma & Mondal, 2017.

4.7.7. Fracción Lignocelulósica

Los datos de la fracción lignocelulósica de los desechos agroindustriales más abundantes en la provincia de Cotopaxi se muestran en la Tabla 12, la celulosa se digiere mucho más rápido que la lignina por lo que se espera un mayor porcentaje de celulosa para abaratar costos de producción en procesos industriales a base de lignocelulosa, los desechos de caña de azúcar presentan un bajo porcentaje de lignina y a su vez el mayor porcentaje de celulosa en relación a los demás residuos, la biomasa de banano y cacao cuentan con relaciones de celulosa/lignina similares que van desde 1,3 hasta 1,7 aproximadamente, los desechos de las rosas tienen una relación celulosa/lignina cercana al 1,15, mientras que los residuos de palma africana contienen más lignina que celulosa.

Tabla 12*Fracción lignocelulósica de la biomasa analizada*

	Fracción Lignocelulósica				
	Banano	Cacao	Palma africana	Rosas	Caña de azúcar
Celulosa	26,7 ± 0,9	24,24 – 35,0	23,7	28,6	47,6
Hemicelulosa	25,8 ± 0,9	8,72 – 11,0	21,6	29,0	39
Lignina	17 ± 0.3	14,6 – 26,38	29,2	24,9	11,2

Nota. Tabla adaptada de “Thermochemical characterization of banana leaves as a potential energy source”, por Fernandes et al., 2013; “Biotechnological approaches for cocoa waste management: A review.”, por Vásquez et al., 2019; “Characterization of empty fruit bunch for microwave-assisted pyrolysis”, por Omar et al., 2011; “International Journal of Biological Macromolecules Preparation of microcrystalline cellulose from residual Rose stems (Rosa spp .)”, por Ventura et al., 2020; “Physicochemical Characterization and Pyrolysis Kinetic Study of Sugarcane Bagasse Using Thermogravimetric Analysis”, por Varma & Mondal, 2017.

Capítulo V

5. Conclusiones

De acuerdo con los resultados obtenidos de manera bibliográfica sobre los desechos agroindustriales disponibles en la provincia de Cotopaxi, el bagazo de la caña de azúcar demostró ser el más apto para la biorefinación, aunque cuenta con un poder calorífico menor al de los residuos de palma africana y banano, posee una ventaja sobre estos desechos debido a que tiene la fracción más alta de celulosa y la más baja en lignina, sumado a esto cuenta con un pequeño porcentaje de cenizas que evita la formación de escoria y una baja humedad que contribuye a mantener un poder calorífico considerable. Vale mencionar que no se tienen datos sobre la cantidad de bagazo producido por ton/año en la provincia de Cotopaxi.

La información revisada demuestra que, los residuos de banano también pueden ser considerados como una biomasa apta para una posterior bioconversión, si bien es cierto, no tiene una fracción de celulosa tan grande como el del bagazo de caña, cuenta con un poder calorífico mayor y una humedad moderada, características que califican los desechos de banano para ser la materia prima en un proceso de biorefinación.

Los desechos agroindustriales de la palma africana, cuyos datos fueron obtenidos gracias a estudios previos, son descartados, a pesar de que el análisis aproximado revele características aceptables para su conversión, es el único residuo que muestra una fracción de lignina mayor que la de celulosa lo que sugiere un aumento en el costo de producción al momento de considerar aplicar un proceso de biorefinación a este tipo de biomasa.

Para los residuos lignocelulósicos generados por las rosas la información compilada indica que cuenta con propiedades muy cercanas a la media en gran parte de los parámetros

analizados, sin embargo, tiene una razón celulosa/lignina cercana a uno, lo que aumenta el costo de los procesos para digerir en su totalidad la lignocelulosa contenida en la biomasa, adicional a esto posee un poder calorífico bajo en contraste con los demás desechos.

Según los estudios referenciales escogidos la biomasa generada por el cacao señala que, esta cuenta con propiedades poco aptas para la refinación en comparación a las otras muestras revisadas, los desechos de cacao poseen el poder calorífico más bajo, mientras que la humedad y las cenizas denotan altos porcentajes en el análisis aproximado.

Aunque se conoce que las rosas y la caña de azúcar ocupan un vasto territorio para su cultivo en la provincia de Cotopaxi, no se pudo hallar información sobre la producción anual en toneladas de los desechos que estos productos generan.

6. Bibliografía

- Adjin-Tetteh, M., Asiedu, N., Dodoo-Arhin, D., Karam, A., & Nana, P. (2018). Industrial Crops & Products Thermochemical conversion and characterization of cocoa pod husks a potential agricultural waste from Ghana. *Industrial Crops & Products*, October 2017, 0–1.
<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.02.060>
- Anwar, Z., Gulfraz, M., & Irshad, M. (2014). Agro-industrial lignocellulosic biomass a key to unlock the future bio-energy: A brief review. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 7(2), 163–173. <https://doi.org/10.1016/j.jrras.2014.02.003>
- Bogale, W. (2017). *Preparation of Charcoal Using Flower Waste*. 1–10.
<https://doi.org/10.4236/jpee.2017.52001>
- Demirbaş, A. (2001). Biomass resource facilities and biomass conversion processing for fuels and chemicals. *Energy Conversion and Management*, 42(11), 1357–1378.
[https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(00\)00137-0](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(00)00137-0)
- Dheeran, P., & Reddy, L. (2018). *Biorefining of Lignocelluloses: An Opportunity for Sustainable Biofuel Production*. 1–23. https://doi.org/10.1007/978-3-319-67678-4_1
- ESIN Consultora S.A. (2014). ATLAS Bioenergético del Ecuador. In *Atlas bioenergético del Ecuador: Vol. Primera Ed.*
- Fantini, M. (2017). Biomass availability, potential and characteristics. In *Lecture Notes in Energy* (Vol. 57). https://doi.org/10.1007/978-3-319-48288-0_2
- Fernandes, E. R. K., Marangoni, C., Souza, O., & Sellin, N. (2013). Thermochemical characterization of banana leaves as a potential energy source. *Energy Conversion and*

Management, 75, 603–608. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.08.008>

Khan, A. A., de Jong, W., Jansens, P. J., & Spliethoff, H. (2009). Biomass combustion in fluidized bed boilers: Potential problems and remedies. *Fuel Processing Technology*, 90(1), 21–50. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2008.07.012>

Lange, J.-P. (2007). Lignocellulose conversion: an introduction to chemistry, process and economics. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 6(3), 246–256. <https://doi.org/10.1002/bbb>

Mahmood, W. M. F. W., Ariffin, M. A., Harun, Z., & Ghani, J. A. (2015). CHARACTERISATION AND POTENTIAL USE OF BIOCHAR FROM GASIFIED OIL PALM WASTES. *Journal of Engineering Science and Technology*, 45–54.

Martínez, L. (2017). Asalariados rurales en territorios del agronegocio: flores y brócoli en Cotopaxi. In *Eutopía - Revista de Desarrollo Económico Territorial* (Issue 11). <https://doi.org/10.17141/eutopia.11.2017.2866>

McKendry, P. (2002). Energy production from biomass (part 1): Overview of biomass. *Bioresource Technology*, 83(1), 37–46. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(01\)00118-3](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00118-3)

Naik, S. N., Goud, V. V., Rout, P. K., & Dalai, A. K. (2010). Production of first and second generation biofuels: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(2), 578–597. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.10.003>

Narayanaswamy, N., Dheeran, P., Verma, S., & Kumar, S. (2013). *Pretreatment Techniques for Biofuels and Biorefineries* (Z. Fang (ed.)). <https://doi.org/10.1007/978-3-642-32735-3>

Olatunji, O., Akinlabi, S., Oluseyi, A., Peter, M., & Madushele, N. (2018). Experimental

- investigation of thermal properties of Lignocellulosic biomass: A review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 413(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/413/1/012054>
- Omar, R., Idris, A., Yunus, R., Khalid, K., & Isma, M. I. A. (2011). Characterization of empty fruit bunch for microwave-assisted pyrolysis. *Fuel*, 90(4), 1536–1544. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.01.023>
- Rambo, M. K. D., Schmidt, F. L., & Ferreira, M. M. C. (2015). Analysis of the lignocellulosic components of biomass residues for biorefinery opportunities. *Talanta*, 144, 696–703. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2015.06.045>
- Trigo, J. E. (1995). *Agricultura, cambio tecnológico y medio ambiente en América Latina*.
- Tumipamba, J. (2020). *Análisis de la dinámica agraria cañicultora limítrofe entre La Maná, Sigchos y Pujilí; Cotopaxi*.
- Varma, A. K., & Mondal, P. (2017). *Physicochemical Characterization and Pyrolysis Kinetic Study of Sugarcane Bagasse Using Thermogravimetric Analysis*. 138(September 2016), 1–11. <https://doi.org/10.1115/1.4032729>
- Vásquez, Z. S., de Carvalho Neto, D. P., Pereira, G. V. M., Vandenberghe, L. P. S., de Oliveira, P. Z., Tiburcio, P. B., Rogez, H. L. G., Góes Neto, A., & Soccol, C. R. (2019). Biotechnological approaches for cocoa waste management: A review. *Waste Management*, 90, 72–83. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.04.030>
- Ventura, S., Flores, N., & Tecante, A. (2020). *International Journal of Biological Macromolecules*

Preparation of microcrystalline cellulose from residual Rose stems (*Rosa* spp .) by successive delignification with alkaline hydrogen peroxide. *International Journal of Biological Macromolecules*, 155, 324–329. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.03.222>

Yang, B., Dai, Z., Ding, S. Y., & Wyman, C. E. (2011). Enzymatic hydrolysis of cellulosic biomass. *Biofuels*, 2(4), 421–449. <https://doi.org/10.4155/bfs.11.116>

Zoomers, A. (2010). Globalisation and the foreignisation of space: Seven processes driving the current global land grab. *Journal of Peasant Studies*, 37(2), 429–447. <https://doi.org/10.1080/03066151003595325>