

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas

Procesamiento de residuos agrícola de la provincia del Guayas en la producción de pellet para su aprovechamiento como biocombustible sólido

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero Químico

Presentado por:

Peter Andrés Cotto Zambrano

Christopher Josué Gómez Gómez

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2022

DEDICATORIA

Este proyecto lo dedico en primer lugar a Dios por haberme guiado a lo largo de toda mi vida y permitirme concluir con éxito mi carrera, a mis padres y hermano porque siempre han estado a mi lado brindándome su apoyo incondicional; y a todos mis compañeros y personas que han formado parte de mi camino como profesional y me han ayudado a crecer como persona.

Christopher Josué Gómez Gómez

Dedico este proyecto a mi familia, quienes han sido mi inspiración y soporte fundamental a lo largo de toda mi vida y en especial en los momentos claves de mi formación como estudiante y profesional.

Peter Andrés Cotto Zambrano

AGRADECIMIENTOS

Al Centro de investigación CDTTS de la facultad de Ingeniería en Mecánica, que nos proporcionó todos los equipos necesarios para el procesamiento de los residuos y el conocimiento para ejecutar correctamente los ensayos experimentales.

A nuestra profesora MSc. Suanny Mosquera por el exhaustivo monitoreo y paciencia para culminar exitosamente el proyecto.

A nuestra tutora la Dra. Emérita Delgado por facilitarnos toda la ayuda posible a lo largo de todo este trabajo de investigación, al Ing. Jimmy Ramírez de la Empresa LABCESTTA S.A que nos apoyó con los análisis del producto final. De manera muy especial a la MSc. Nadia Flores por sus consejos y guía incondicional.

A nuestros compañeros, por ayudarnos y colaborarnos a lo largo de toda nuestra carrera.

A todos los docentes que forman parte del equipo de desarrollo del Laboratorio de Investigación del CDTTS, por su colaboración, especialmente al Dr. Juan Peralta y el Ing. José Reinoso.

DECLARACIÓN EXPRESA

"Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Peter Andrés Cotto Zambrano* y *Christopher Josué Gómez Gómez* damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual"



Peter Andrés Cotto
Zambrano



Christopher Josué
Gómez Gómez

EVALUADORES

.....
PhD(c). Suanny Mosquera Romero

PROFESOR DE LA MATERIA



.....
PhD. Emérita Delgado Plaza

PROFESOR TUTOR

RESUMEN

La demanda energética en los sectores industriales, agrícolas y actividades de procesamiento afines ha incrementado paulatinamente a nivel mundial conforme pasan los años. En el sector, los residuos provenientes de la actividad agrícola normalmente son vistos como un problema, mas no como una fuente segura de energía sustentable. Es por ello, que en el presente trabajo se propone establecer en detalle un procedimiento del manejo y tratamiento de los residuos agrícolas del sector cacaotero, arrocerero y maicero de la provincia del Guayas. Así como el procesamiento correspondiente para la elaboración de un pellet, que se ofrezca como un producto de valor agregado, que aporte con el desarrollo y la sostenibilidad de los procesos productivos del sector agroindustrial. Esta iniciativa fue desarrollada en 5 etapas; donde se destacaron la recepción y selección de los residuos, la elaboración de curvas de secado para cada tipo de material específico y el respectivo procedimiento para la reducción de tamaño de partícula de cada uno. Esto nos permitió obtener una materia prima con características idóneas para su densificación, la elaboración de pellets en 4 diferentes proporciones de residuos y la obtención de un producto con características ideales para su función. Con ello se estableció un protocolo experimental del tratamiento para estos residuos, la efectiva elaboración del biocombustible, la identificación de la configuración del pellet con mejores características y el reconocimiento de las zonas de actuación, donde se puede implementar dicha iniciativa dentro de la provincia.

Palabras Clave: Residuos Agrícolas, Pellet, Poder Calorífico, Protocolo Experimental.

ABSTRACT

Energy demand in the industrial, agricultural and agro-processing sectors has been steadily increasing worldwide over the years. In this sector, waste from agricultural activities is normally seen as a problem, but not as a safe source of sustainable energy. For this reason, the present work proposes to establish in detail a procedure for the management and treatment of agricultural waste from the cocoa, rice and corn sectors in the province of Guayas. As well as the corresponding processing for the elaboration of a pellet, which is offered as a value-added product that contributes to the development and sustainability of the productive processes of the agro-industrial sector. This initiative was developed in 5 stages, which included the reception and selection of waste, the development of drying curves for each type of specific material and the respective procedure for the particle size reduction of each one. This allowed us to obtain a raw material with ideal characteristics for its densification, the elaboration of pellets in 4 different proportions of waste and the obtaining of a product with ideal characteristics for its function. With this, we established an experimental protocol for the treatment of these wastes, the effective elaboration of the biofuel, the identification of the pellet configuration with the best characteristics and the recognition of the areas of action where this initiative can be implemented within the province.

Keywords: *Agricultural Residues, Pellet, Calorific Power, Experimental Protocol.*

ÍNDICE GENERAL

EVALUADORES.....	5
RESUMEN.....	I
ABSTRACT	II
ÍNDICE GENERAL	III
ABREVIATURAS.....	VI
SIMBOLOGÍA.....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
ÍNDICE DE TABLAS.....	XI
CAPÍTULO 1.....	1
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	2
1.2 JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA	3
1.3 OBJETIVOS	4
1.3.1 Objetivo General.....	4
1.3.2 Objetivos Específicos	4
1.4 MARCO TEÓRICO.....	4
1.4.1 Antecedentes.....	4
1.4.2 BIOMASA	5
1.4.3 Clasificación y Aplicaciones de la Biomasa	7
1.4.4 Composición de la Biomasa	8
1.4.5 Ventajas y Desventajas del uso de Biomasa	9
1.4.6 Aplicación de la biomasa en los sectores productivos.....	10
1.4.7 Tecnología de Aprovechamiento	10
1.4.8 Características de los residuos de cacao, arroz y maíz.....	11
1.4.9 Características Físico-Químicas	12
1.4.1 Propiedades Físicas	12
1.4.2 Propiedades Químicas	13

CAPÍTULO 2.....	15
2. METODOLOGÍA	15
2.1 IDENTIFICACIÓN DE FUENTES POTENCIALES DE RESIDUOS DE CACAO, ARROZ Y MAÍZ EN LA PROVINCIA DEL GUAYAS.....	15
2.2 ETAPAS DEL PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	16
2.2.1 Etapa 1: Recepción y Clasificación de Materia Prima	16
2.2.2 Etapa 2: Secado de los residuos	17
2.2.3 Etapa 3: Molienda del material	20
2.2.4 Etapa 4: Tamizado del material	20
2.2.5 Etapa 5: Peletización del material.....	21
2.2.6 Configuraciones Experimentales	21
2.2.7 Etapa 6: Criterios de calidad.....	22
CAPÍTULO 3.....	24
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS	24
3.1 RESULTADOS DEL ANÁLISIS BIOENERGÉTICO DE LOS RESIDUOS AGRÍCOLAS DE LA REGIÓN COSTA DEL ECUADOR	24
3.1.1 Residuos de la actividad productiva del Cacao	24
3.1.2 Residuos de la actividad productiva del arroz	25
3.1.3 Residuos de la actividad productiva del Maíz Duro	25
3.2 RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE RESIDUOS AGRÍCOLAS DE MAYOR ABUNDANCIA EN LA PROVINCIA DEL GUAYAS	26
3.3 RESULTADOS DE IDENTIFICACIÓN Y SELECCIÓN DE LOS CENTROS DE ACOPIO Y PILADORAS.....	26
3.4 RESULTADOS DEL PROTOCOLO DE TRATAMIENTO DE RESIDUOS AGRÍCOLAS.....	29
3.4.1 Preparación y tratamiento de los residuos.....	29
3.4.2 Procedimiento de Secado.....	29
3.4.3 Molienda y Tamizado.....	31
3.5 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE PRODUCCIÓN DE PELLETS	32
3.6 RESULTADOS DE PARÁMETROS DE CALIDAD	32
3.6.1 Dimensiones (Longitud y Diámetro).....	32
3.6.2 Densidad unitaria.....	33

3.6.3	Contenido de ceniza	33
3.6.4	Contenido de Humedad.....	34
3.6.5	Poder Calorífico	34
CAPÍTULO 4.....		35
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	35
4.1	CONCLUSIONES.....	35
4.2	RECOMENDACIONES	37
BIBLIOGRAFÍA.....		38
APÉNDICES.....		42
A.1.	PROTOCOLO DE PRETRATAMIENTO DE RESIDUOS SÓLIDOS	43
1.1.	Cáscara de Mazorca de Cacao	43
1.1.1.	Tratamiento y Preparación	43
1.1.2.	Manejo de la muestra seca.....	45
1.1.3.	Procedimiento de Molienda	45
1.1.4.	Manejo de la muestra molida.....	46
1.1.5.	Procedimiento de Tamizado	46
1.2.	Madera del árbol de Cacao (CNN-51)	47

ABREVIATURAS

CDTS	Centro de Desarrollo de Tecnologías Sustentables
ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
FCNM	Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas
FIMCP	Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción
GLP	Gas Licuado de Petróleo
KWh	Kilo Vatios por Hora
LOPU	Laboratorio de Operaciones Unitarias
PCS	Poder Calorífico Superior
PCI	Poder Calorífico Inferior
SynGas	Gas Sintético
EN	European Normative

SIMBOLOGÍA

atm	Atmosfera
BS	Base Seca
C	Carbono
Ca	Calcio
Cl	Cloro
CH ₄	Metano
CO	Monóxido de Carbono
CO ₂	Dióxido de Carbono
cm	Centímetro
°C	Grados Celsius
g	Gramos
h	Horas
H	Hidrógeno
H ₂ O	Agua
in	Pulgadas
J	Joules
K	Potasio
Kg	Kilogramo
Km	Kilómetro
Km ²	Kilómetro Cuadrado
lt	Litros
m	Metro
mm	Milímetro
m ²	Metro Cuadrado
m ³	Metro Cúbico
min	Minuto
MJ	Mega Joules
N	Nitrógeno
O	Oxígeno
P	Fósforo

S	Azufre
Si	Silicio
SO ₂	Dióxido de Azufre
t	Toneladas
TJ	Tera Joules
tm	Toneladas Métricas

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Composición porcentual de energías renovables del Ecuador.....	6
Figura 1.2 Tipos de Biomasa por su Composición, Origen y Estado.....	7
Figura 2.1 Mapas de producción de residuos de Arroz a nivel Provincial(Guzmán et al., 2014).	15
Figura 2.2 Residuos de cáscara de mazorca de cacao, a) Recolectado hace 2 días y b) Recolectado hace más de una semana	16
Figura 2.3 Secado al ambiente, a) muestra inicial, b) muestra seca y c) Medición de Temperatura por termopar.....	18
Figura 2.4 Equipos de secado directo, a) Secador de bandejas y b) Termobalanza.....	19
Figura 2.5 Equipo de molienda del CDTs - Molino de Martillo	20
Figura 2.6 Sistema de Tamizado RX - 812 de LOPU (Base + tamiz 1mm + tamiz 2mm)	20
Figura 2.7 Porcentaje de producción anual de residuos agrícolas de la Región Costa del Ecuador.Figura 2.8 Sistema de Tamizado RX - 812 de LOPU (Base + tamiz 1mm + tamiz 2mm)	20
Figura 2.9 Porcentaje de producción anual de residuos agrícolas de la Región Costa del Ecuador.	20
Figura 2.10 Curva de Secado Directo y al Ambiente de los Residuos de Mazorca de Cacao.Figura 2.11 Porcentaje de producción anual de residuos agrícolas de la Región Costa del Ecuador.Figura 2.12 Sistema de Tamizado RX - 812 de LOPU (Base + tamiz 1mm + tamiz 2mm).....	20
Figura 2.13 Porcentaje de producción anual de residuos agrícolas de la Región Costa del Ecuador.Figura 2.14 Sistema de Tamizado RX - 812 de LOPU (Base + tamiz 1mm + tamiz 2mm).....	20
Figura 3.1 Porcentaje de producción anual de residuos agrícolas de la Región Costa del Ecuador	26
Figura 3.2 Curva de Secado Directo y al Ambiente de los Residuos de Mazorca de Cacao.	30
Figura 3.3 Curva de Secado Directo y al Ambiente de los Residuos de Tusa de maíz (Choclo).	30

Figura 3.4 Residuos de tusa de maíz molidos y tamizados para diferentes tamaños de partícula: a) < 1mm, b) 1 – 2 mm y c) > 2mm.....	31
Figura 3.5 Residuos de cascarilla de arroz molidos y tamizados para diferentes tamaños de partícula: a) < 1mm, b) 1 – 2 mm y c) > 2mm.....	32
Figura 4.1 Mazorcas de Cacao húmeda color naranja claro y seca color concho de vino	43
Figura 4.2 Curva de Secado de Mazorca de Cacao.....	44
Figura 4.3 Almacenamiento de Residuos: a) Residuos en bolsas Ziploc – Humedad 11 %, b) Residuos de madera sellado al vacío humedad > 30%	45
Figura 4.4 Residuos de mazorca de cacao molida y tamizada para diferentes tamaños de partícula: a) < 1mm, b) 1 – 2 mm y c) > 2mm.....	47
Figura 4.5 Curva de Secado de Tusa de Maíz	48
Figura 4.6 Residuos de Tusa de maíz molida y tamizada para diferentes tamaños de partícula: a) < 1mm, b) 1 – 2 mm y c) > 2mm.....	48
Figura 4.7 Residuos de Tusa de maíz molida y tamizada para diferentes tamaños de partícula: a) < 1mm, b) 1 – 2 mm y c) > 2mm.....	48

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Capacidad Calorífica de diferentes tipos de Biomasa	6
Tabla 1.2 Composición elemental de la Biomasa.....	9
Tabla 2.1 Proporciones experimentales de los pellets fabricados.....	21
Tabla 3.1 Generación de Residuos de Cacao por provincia	24
Tabla 3.2 PCI promedio de los tipos de Residuos agrícolas en el Ecuador	25
Tabla 3.3 Densidad productiva de residuos de Arroz y número de Piladoras presentes por Cantones de la Provincia del Guayas	27
Tabla 3.4 Densidad productiva de residuos de Cacao por Cantones de la Provincia del Guayas	27
Tabla 3.5 Densidad productiva de residuos de Maíz por Cantones de la Provincia del Guayas	28
Tabla 3.6 Contenido de Humedad de los Residuos sin moler y Tiempo de secado al Ambiente.	31
Tabla 3.7 Diámetros de Pellets por Configuración	33
Tabla 3.8 Longitudes de Pellets por Configuración	33

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

Existe una necesidad energética en el sector agrícola e industrial que se desea cubrir cumpliendo con requisitos en torno a la reducción de costos operativos, sujeto al actual uso de combustibles fósiles en sus procesos productivos.

Esto se puede lograr mediante la utilización de distintas fuentes energéticas sostenibles. Lo que origina una necesidad de acuerdo con el estudio de alternativas locales que les permitan la replicabilidad tecnológica en dichos procesos productivos.

A partir del estudio presentado por World Energy Outlook del 2021, indica que para el año 2040 la cantidad de energía destinada a nivel mundial aumentara en un 19%, debido al crecimiento demográfico.

Hoy en día los combustibles de origen fósil son destinados a cubrir en gran medida la demanda energética de las diferentes actividades que desarrolla el hombre. Esta dependencia sustancial, no solamente ha permitido el desarrollo industrial y tecnológico de la sociedad. Esto ha catapultado el inicio de una nueva era, donde la preservación y el cuidado de los recursos ha tomado un gran interés a nivel mundial (Abraham et al., 2020).

Estas nuevas tendencias han promovido la investigación y el desarrollo de nuevas tecnologías que permitan abrir el horizonte con respecto a su aprovechamiento como una fuente energética.

Entre las fuentes de energías alternativas se encuentran la biomasa, que es considerada un recurso valioso en los procesos de combustión para la generación de calor o generación eléctrica. Cabe mencionar, que el uso de la biomasa como materia prima contempla aplicaciones para la producción de biocombustibles sólidos, líquidos y gaseosos (Stolarski et al., 2020). El uso de este tipo de materia prima como fuente energética tiene ciertas ventajas, como la baja emisión de gases de efecto invernadero y su característica de neutralidad del ciclo del carbono.

La biomasa está compuesta principalmente por agentes extractivos aprovechables, como son; hemicelulosa, celulosa y lignina, que varían en proporción o carencia dependiendo del residuo que se trate. A pesar de esto, la biomasa lignocelulósica tiene ciertas propiedades no deseables como; la hidrofilia, baja densidad aparente que causa problemas con respecto al transporte y costo de almacenamiento, y, además alto

contenido de humedad el cual influye en el bajo contenido energético (Sarker et al., 2022). Los problemas antes mencionados se pueden resolver sometiendo la biomasa a un pretratamiento, donde se destacan técnicas de tratamiento físicos, biológicos, químicos y fisicoquímicos. Estos son aplicados con la finalidad de proporcionarle a la biomasa las propiedades que permitan un mejor aprovechamiento del recurso (Baruah et al., 2018).

1.1 Descripción del problema

De acuerdo con el Atlas Bioenergético del Ecuador (Guzmán et al., 2014), los residuos provenientes de las actividades agrícolas, producción de arroz, cacao, maíz duro, palma africana, caña de azúcar, banana y piña, muestran un gran potencial energético con un poder calorífico promedio de 15 MJ/kg para residuos agrícolas. Esto los hace factibles de ser aprovechados como fuente energética para el secado de granos el cual es uno de los procesos más costoso energéticamente en las etapas del proceso productivo de la industria alimentaria.

Desafortunadamente, es un hecho que en la práctica el uso directo de estos residuos suele generar muchos problemas como son; las cenizas y sintetizados que se forman en las cámaras combustión, intercambiadores de calor y demás equipos complementarios lo cual compromete la eficiencia de los equipos y disminución de la vida útil de los mismos (Kantová et al., 2022).

Involucrándonos en el entorno de los beneficiarios es una realidad que el sector agrícola no cuentan con conocimientos para el pretratamiento de los residuos sólidos antes de utilizarlos. Tampoco disponen de tecnología de combustión o adaptación tecnológica en los secadores, por lo tanto, terminan eliminando los residuos empleando métodos tradiciones. Tales son la quema a cielo abierto y la descomposición natural dejando los residuos en el campo, prácticas muy comunes en países en desarrollo como el Ecuador. Dichas acciones generan efectos negativos incrementando los gases de efecto invernadero (CO_2 , CO , CH_4) además de material particulado contaminando la atmósfera y propagando plagas que ocasionan la pérdida de la cosecha (Meza-Sepúlveda et al., 2021).

Es evidente, que varias piladoras de arroz de alta capacidad optan por aprovechar los residuos de cáscara del arroz de forma directa en los hornos de combustión que permite

calentar el aire para los secadores. Pero el aprovechamiento de residuos no se evidencia en pequeñas y medianas piladoras, centros de acopio de maíz y de cacao, consumiendo GLP y electricidad para el secado del grano, haciendo costoso el proceso (Delgado, 2019). Por lo antes expuesto, en el sector agroalimentario resulta relevante el desarrollo de nuevas metodologías y técnicas de aprovechamiento de recursos renovables como fuente principal o alterna de energía. Para este caso sería el aprovechamiento de residuos como bicomcombustibles sólidos. Esto no solo eliminaría los gastos excesivos para productores pequeños en la provincia del Guayas, sino que también proporcionaría oportunidades para nuevas aplicaciones de los desechos agrícolas. Desde el punto de vista ambiental las emisiones generadas por biomasa son menos contaminantes lo que implicaría un menor tratamiento requerido y la reducción del riesgo de daño en equipos por residuos como la sílice. Finalmente, en función de todo lo expuesto se vuelve importante preguntarnos: ¿qué composición de los residuos agrícolas sería la ideal en la mezcla para formar pellet con un alto poder calorífico y cumpla con los estándares de calidad de un biocombustible sólido?

1.2 Justificación del problema

El Ecuador es un país agrícola que genera una cantidad importante de residuos durante la poda, cosecha, y postcosecha. Estos residuos son normalmente dejados en el suelo o incinerados debido a que su manejo y eliminación representa un gasto económico no representativo para los pequeños y grandes productores agrícolas del sector. Esta actividad genera la contaminación del suelo, el aire e incluso la propagación de plagas, así como el deterioro paulatino del entorno, lo que repercute directamente en las actividades de producción alimenticia. Esta propuesta se presenta como una alternativa para promover el desarrollo bio-económico de la región, inculcando tendencias de actividades sostenibles con base en tecnologías de “residuo cero”. Permitiendo así la revalorización y la reutilización de dichos residuos como un biocombustible de bajo costo de producción (Orejuela-Escobar et al., 2021).

El estudio se realiza en consecuencia a la demanda energética interna del país que se debe cubrir anualmente. En el estudio presentado por el Ministerio de energía del Ecuador se presenta que desde el año 2019, el 40% de la demanda interna de estos

combustibles fósiles fueron importados. Debido al elevado porcentaje, el gobierno ha incitado a la investigación de energías alternativas que pueda suplantar en un futuro las importaciones de combustibles y cubra el crecimiento de la demanda prevista en el país.

Los beneficios de la propuesta no solo promueven al desarrollo sostenible de la región, sino también, sirve como propuesta para el crecimiento económico de los sectores agrícolas de la zona. Permittiéndonos aumentar las oportunidades laborales con la finalidad de generar una economía circular en torno a esta (Chiriboga et al., 2020; Ng et al., 2020).

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

- Estimar la proporción óptima de una mezcla de residuos agrícolas de al menos 3 cultivos del sector agrícola de la provincia del Guayas para la fabricación de pellet con alto poder calorífico mediante análisis experimental.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Cuantificar la cantidad de residuos agrícolas de cacao, arroz y maíz para la identificación de las zonas de actuación de la provincia del Guayas.
- Establecer un protocolo de tratamiento de los residuos agrícolas para el procesamiento de la biomasa.
- Proponer diferentes mezclas de residuos para elaboración de pellets según sus composiciones, dimensiones y propiedades físicas.

1.4 Marco teórico

1.4.1 Antecedentes

El aumento del CO₂ en el mundo en conjunto a otros gases que conforma efecto invernadero se han convertido en una de las realidades que más agobian a las naciones del mundo. Dicho incremento ha empeorado el calentamiento global aumentando la temperatura del planeta provocando a corto plazo grandes catástrofes. Es un hecho que reducir estas emisiones no es sencillo, el uso del combustible fósil es indispensable para las actividades productivas que más han aportado al desarrollo de la humanidad. Por lo tanto, simplemente optar por eliminar su utilización no entra en discusión.

El uso excesivo de combustibles fósiles en las centrales termoeléctricas para generación de electricidad aumenta más las emisiones de estos gases a la atmósfera tanto que en el año 2019 el nivel de CO₂ alcanzó el récord de 36 700 millones de toneladas métricas. De lo antes planteados, muchos países han apostado a las energías renovables como: energía geotérmica, mareomotriz, energía solar, eólica y bioenergía, como alternativas tecnológicas claves que disminuyan el calentamiento global y garantice energía inagotable y sostenible.

La biomasa corresponde a toda materia vegetal y residuos agrícolas de la industria maderera, bosques y campos de cultivo. Pese a las grandes ventajas como fuente de generación de energía limpia hay varias desventajas que hacen difícil su aprovechamiento. Entre estas desventajas están: el tamaño, uniformidad del residuo, alto contenido de humedad, baja densidad energética y el costo de la logística que hacen complicado y costoso transportarla. Para superar estas desventajas la biomasa se procesa en gránulos cilíndricos o pellets que por su forma, tamaño y durabilidad se aprovechan como combustible sólido para la generación de calor y energía.

1.4.2 BIOMASA

De manera técnica se define a la biomasa como “toda sustancia o materia de naturaleza orgánica producida por los compuestos de carbono que se forman durante el proceso de fotosíntesis”.

Dentro de las actividades agrícolas esto incluye los residuos de caña de azúcar, cacao, maíz, arroz y café, entre otras. Si hablamos de las actividades de poda o procesamiento de madera como los aserraderos se tendrán residuos como: el aserrín, ramas o cortezas, y, dentro de los desechos urbanos se generan aguas negras y basura orgánica (Bolívar et al., 2015).

Realizando una revisión del Balance Energético de Ecuador del año 2019 se nos presentan datos relevantes donde los hidrocarburos dominan la generación de energía primaria ocupando un 86,9%, el 4,4% lo cubre el gas natural y solo el 8,7% corresponde a uso de energías renovables. Dentro de ello, la mayor participación de las energías renovables no convencionales, se encuentra principalmente constituida en un 54,9% de gabazo de caña de azúcar para producción de energía, 39,8% de leña y el 5,3%

corresponde a producciones primarias a partir del biogás, energía solar y eólica (Lenín et al., 2019).

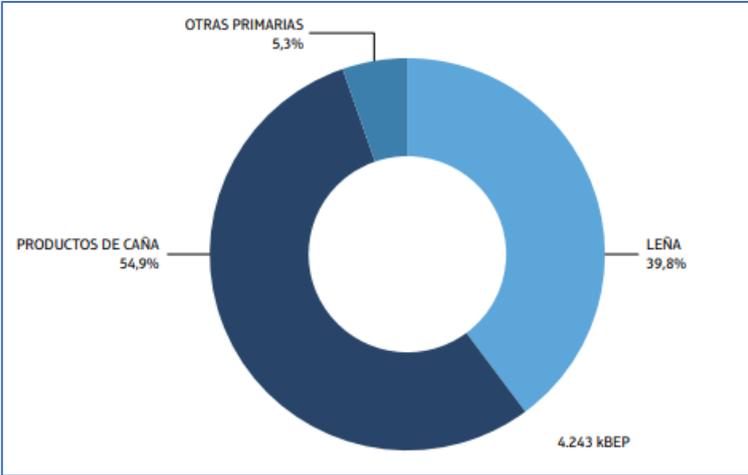


Figura 1.1 Composición porcentual de energías renovables del Ecuador (Lenín et al., 2019).

Entre las principales ventajas que ofrece el aprovechamiento de este recurso como fuente de energía se pueden citar:

- Facilidad de obtención, porque se puede obtener del medio natural o residuos de actividades productivas.
- Bajas emisiones de gases de efecto invernadero durante los procesos que transforman su composición.
- La recolección del residuo no supone gastos elevados.

Tabla 1.1 Capacidad Calorífica de diferentes tipos de Biomasa

Biomasa	Poder Calorífico (MJ/Kg)
Carbón coquizado	25 – 32
Madera	10 – 20
Paja	14 – 16
Cáscara de Coco	18 – 19
Cáscara de Café	16
Tallos de Algodón	16
Cáscara de Cacao	13 – 16

Cuesco de Palma de Aceite	15
Cáscara de Arroz	13 – 14
Tallos de Maíz	13 – 15
Aserrín	11
Pellet de aserrín	20,5
Pellet de madera	20,3

Fuente: Estudio de Gasificación EE.UU (Bolívar et al., 2015)

1.4.3 Clasificación y Aplicaciones de la Biomasa

La biomasa se clasifica en función de su composición, estado y origen siendo estas categorías las propiedades mayormente aceptadas en las bibliografías revisadas. En la figura 1.2 se presenta la clasificación general a partir del autor (Lucas Herguedas, 2012).

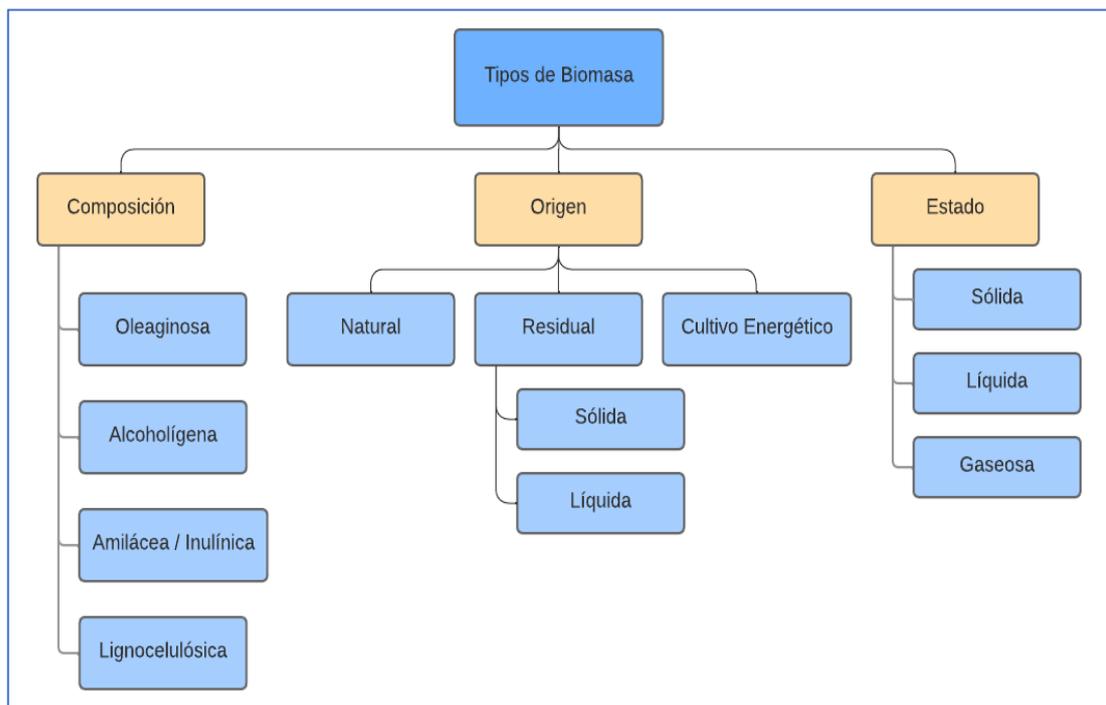


Figura 1.2 Tipos de Biomasa por su Composición, Origen y Estado (Lucas Herguedas, 2012)

1.4.3.1 Biomasa Natural

Corresponde a la biomasa presente en todos los ecosistemas, pero sin que haya sido ocasionada por la intervención humana, esto quiere decir que debe ser biomasa que se genera espontáneamente en el medio ambiente, por ejemplo, la hojarasca, ramas que caen al suelo debido al viento (Serrano et al., 2017).

1.4.3.2 Biomasa Residual

La biomasa residual es aquella que se origina debido a la intervención humana o directamente de las actividades productivas (Guzmán et al., 2014). Este tipo de biomasa a su vez se puede dividir en:

- Residual Seca: Considerados residuos de productos de la actividad agrícola, industria maderera, industria agroalimentaria, forestal.
- Residual Húmeda: Siendo los vertidos biodegradables como las aguas residuales de industrias y producción agrícola.

De la actividad agrícola podemos señalar específicamente algunos residuos generados como:

- Residuos agrícolas: pajas de cereales, residuos de los tratamientos silvícolas o excedentes agrícolas.
- Residuos de las industrias agrícolas y forestales: como las de producción de aceite de oliva, industria vinícola y alcoholera, oliva, producción de frutos secos, etc.
- Residuos ganaderos: principalmente purines.
- Residuos agroindustriales: como los provenientes de las industrias papeleras, lácteas, almazaras, destilerías, conserveras, etc.

1.4.4 Composición de la Biomasa

Debido a la gran variedad de fuentes de las cuales puede provenir la biomasa, esta tiene diferentes características ligadas a dichas fuentes de tal forma que en su estructura puede contener:

Ligno-Celulosa: también conocido como material ligno-celulósico siendo el componente que constituye la pared celular de las plantas y se encuentra presente principalmente en las partes más fibrosas de las mismas.

Lignina, la celulosa y la hemicelulosa estos tres componentes constituyen la base química que permite producir biocombustibles mediante el aprovechamiento de la biomasa vegetal, de manera que la especie que constituya en mayor proporción una biomasa se vuelve un parámetro de suma importancia ya que afecta directamente el rendimiento de la misma (Serrano et al., 2017).

Tabla 1.2 Composición elemental de la Biomasa

Elemento	Porcentaje en peso (base seca)
Carbono (C)	30-60%
Hidrógeno (H)	5-6%
Oxígeno (O)	30-40%
Nitrógeno (N)	<1%
Azufre (S)	<1%
Cloro (Cl)	<1%

Fuente: Determinación del Potencial de generación Eléctrica a Partir de Biomasa en Ecuador (Serrano et al., 2017).

1.4.5 Ventajas y Desventajas del uso de Biomasa

1.4.5.1 Ventajas Ambientales

- La biomasa no genera CO₂ por motivo que el proceso es equivalente a la cantidad de CO₂ adquirido por la planta antes de ser un residuo.
- Como biocombustible no produce contaminantes como SO₂, CO o hidrocarburos volátiles.
- Reducción de residuos.

1.4.5.2 Ventajas Socioeconómicas

- Reducción de los costos en procesos de secado para el sector agrícola al evitar la dependencia a los combustibles fósiles.
- Nuevas oportunidades laborales para el sector agrícola que van desde la recolección, gestión y clasificación de los residuos aprovechables.

1.4.5.3 Desventajas

- Su rendimiento energético es mucho menor al de los combustibles fósiles

- Los pretratamientos de la biomasa aprovechable junto a la instalación de equipos para procesarla suponen costos más elevados que la energía producida por combustibles fósiles.
- La baja densidad y forma no uniforme ocasionan problemas de transporte y almacenamiento.

1.4.6 Aplicación de la biomasa en los sectores productivos

1.4.6.1 Producción de Energía Térmica

La aplicación de la biomasa en la producción térmica se estructura por tres escalones: el primero se basa en su uso en calderas o estufas utilizadas de manera tradicional en los hogares, como segundo escalón se encuentran las calderas diseñadas específicamente para bloques y edificaciones de viviendas que proporcionan calefacción y agua caliente. El último escalón suele verse en países desarrollados que utilizan biomasa sólida para calefacción centralizadas en un pueblo o ciudad, proveen agua y calefacción a centros deportivos, edificios públicos, complejos comerciales e industrias (IDAE, 2007).

1.4.6.2 Producción de Energía Eléctrica

La biomasa utilizada proviene principalmente de cultivos leñosos de crecimiento rápido y biomasa residual de restos de cosecha y poda. Un aspecto desfavorable de las plantas de generación de electricidad que utilizan biomasa residual como fuente energética es que requieren de grandes calderas con volúmenes de hogar mayores a los de las calderas convencionales que utilizan combustible, lo cual implica grandes costos de inversión (Bolívar et al., 2015).

1.4.7 Tecnología de Aprovechamiento

1.4.7.1 Combustión

En el Ecuador los equipos de combustión son los más utilizados para el aprovechamiento de residuos sólidos. Estos generan calor el cual se usa para la cocción de alimentos, calefacción o para los procesos de secado de productos agrícolas. Los equipos requeridos para esta aplicación van desde estufas, hornos y calderas como sistemas simples hasta sistemas de combustión en lecho fluidizado (Barrera, 2018).

1.4.7.2 Gasificación

Este proceso endotérmico utiliza la oxidación parcial de la biomasa en dos etapas para producir una mezcla de gases muy rico en CO e hidrógeno, dicho gas obtenido es factible de ser enriquecido para producir una mezcla de gases de mayor calidad o “syngas” también conocido como “gas de síntesis” (Pérez et al., 2010).

1.4.7.3 Pirólisis

En este proceso la biomasa se calienta a alta temperatura en ausencia de oxígeno hasta alcanzar su descomposición en vapor, aerosoles y carbón. Estos productos son enfriados formando un líquido marrón oscuro denominado bioil que es un combustible que dispone de la mitad del poder calorífico de un fuel-oil convencional. En un proceso de pirólisis rápida suele producirse entre un 60-75% de bioil (Klug, 2012).

1.4.8 Características de los residuos de cacao, arroz y maíz

1.4.8.1 Residuos de arroz

Los principales residuos que se generan en el cultivo y cosecha de arroz son: los tallos, la paja y la cascarilla de arroz. Este tipo de biomasa posee un bajo valor comercial en el mercado y según estudios realizados en (Campos et al., 2020) esta materia prima se caracteriza por ser rica en minerales con bajo contenido de carbono y posee un alto aporte de potasio (6,98% - 13%), silicio (64,5% - 74,8%), entre otros nutrientes en menor medida como el fósforo ($\approx 5\%$) y el calcio ($\approx 4\%$).

1.4.8.2 Residuos del maíz

Entre los principales residuos que produce la cosecha de maíz están: la mazorca, la paja de maíz y los tallos del maíz. En (Ginni et al., 2021) se menciona que los subproductos del maíz como lo es la paja tienen cantidades de entre 28,4 a 37,7% de celulosa; 25,4 a 25,7% de hemicelulosa y 16,7 a 18,9% de lignina.

1.4.8.3 Residuos del cacao

Los principales residuos de las actividades relacionadas a este sector son: ramas por poda, hojarasca y la cascara de la mazorca del cacao presentando entre 70 y 80% en peso por cada unidad. Según (Porto de Souza Vandenberghe et al., 2022) los residuos están compuestos por un 35% de celulosa, 14,6% de lignina, 9,1% de cenizas, 11% de

hemicelulosa y 6,1% de pectina, además también puede contribuir con un 5,9% de proteínas y minerales como el potasio (3,18%), calcio (0,32%) y fósforo (0,15%) en su mayoría.

1.4.9 Características Físico-Químicas

Las diferentes técnicas y metodologías de evaluación de biomasa son aplicables para cualquiera de sus tipos, existen normativas específicas para calcular las propiedades físico- químicas que permiten caracterizar la biomasa. De esta manera el estado físico de una biomasa en particular puede calificarse de acuerdo con el tipo de recurso y características específicas como el tamaño, forma, distribución granulométrica, análisis inmediato, composición de partículas, análisis elemental y poder calorífico.

1.4.1 Propiedades Físicas

1.4.1.1 Poder Calorífico

Este es el parámetro que determina la cantidad de energías disponible o almacenada en la biomasa expresándose en unidades de energía y masa (Ejemplo: MJ/Kg). De forma general el poder calorífico se define como la energía que se libera en forma de calor al momento en el que la biomasa se combustiona completamente (González, 2018). El poder calorífico superior (PCS) se define como el calor que se produce durante la reacción de combustión incluyendo condensación del vapor de agua u otras reacciones, por otro lado, el poder calorífico inferior (PCI) corresponde a toda la energía liberada durante la combustión pero sin incluir la condensación del agua u otras reacciones, de hecho por esta particularidad es que el PCI suele ser el parámetro de mayor relevancia al momento de determinar la energía total netamente aprovechable de la biomasa.

El poder calorífico inferior de un combustible se determina a partir de su poder calorífico superior de acuerdo con la ecuación (1.1):

$$PCI = PCS - 2,5(9H + H_2O) \quad (1.1)$$

Donde:

PCI: Poder calorífico Inferior (MJ/Kg)

PCS: Poder calorífico superior (MJ/Kg)

Calor de condensación del agua a 0°C 2,5 (MJ/Kg H₂O)

Kilogramos de aguas formados al oxidarse un kg de H (9)

H: Cantidad de hidrógeno presente en el combustible (%)

H₂O: Cantidad de humedad presente en el combustible (%)

1.4.1.2 Densidad

En la industria la densidad es una de las propiedades cuya correlación con el poder calorífico y otras propiedades de los combustibles permite evaluar de manera exhaustiva el desempeño de los combustibles. Por otro lado, cuando hablamos de calidad en especial para los productos sólidos la densidad es el parámetro de mayor importancia puesto que influye en el almacenamiento, transporte y comercialización de dichos productos, como los pellets son un tipo de biocombustible sólido este parámetro también constituye uno de los parámetros evaluados por normativa.

1.4.1.3 Contenido de Humedad

La humedad relativa o contenido de humedad se define como la cantidad de masa de agua contenida en un kilogramo de materia seca (Daniel Núñez Retana et al., 2019). Para el caso de la biomasa su humedad puede medirse en base seca (h) ecuación (1.3) o en base húmeda (H) ecuación (1.4).

$$h = \frac{P_h - P_o}{P_o} \quad (1.3)$$

$$H = \frac{P_h - P_o}{P_o} \quad (1.4)$$

1.4.2 Propiedades Químicas

1.4.2.1 Porcentaje de Cenizas

Este parámetro nos indica la cantidad de materia sólida no combustible por kilogramo de la biomasa (Daniel Núñez Retana et al., 2019). Los análisis de cenizas siempre se realizan en muflas para alcanzar elevadas temperaturas y asegurar la combustión completa de toda la parte orgánica de la biomasa, el final del ensayo solo se tendrán las cenizas cuyo porcentaje se calcula mediante la ecuación:

$$R = \frac{P_{c+ceniza} - P_c}{P_i} * 100\% \quad (1.5)$$

Donde:

R: Porcentaje de cenizas

P_c: Peso del crisol vacío

P_i: Peso inicial de la biomasa seca

P_{c+ceniza}: Peso del crisol más la ceniza

Posteriormente se cuantificó la producción de residuos por toneladas al año de cada producto de la provincia del Guayas. Dichos residuos fueron de: Arroz (*Oryza sativa*), Banano (*Musa Paradisiaca*), Cacao (*Theobroma cacao L*), Café (*Coffea arábica*), Caña de Azúcar (*Saccharum offinarum*) y Maíz Duro (*Zea mays*). Una vez cuantificada la producción de estos residuos se identificaron mediante un diagrama de pastel aquellos de mayor producción porcentual y se verificó su producción anual en la provincia. Después mediante criterios de mayor producción y viabilidad en conjunto con el CDTs de la universidad se seleccionaron los centros de acopio y piladoras más adecuadas para la implementación de la iniciativa.

2.2 Etapas del Procedimiento Experimental

2.2.1 Etapa 1: Recepción y Clasificación de Materia Prima

Mediante la colaboración de nuestra tutora la Dra. Emérita Delgado fue factible la solicitud de residuos de cáscara de mazorca de cacao, cascarilla de arroz, tusa de maíz y poda de las plantaciones de cacao CCN-51 de la ESPOL. Se receptaron 4 sacos de residuos para los ensayos de curva de secado y pruebas de densificación, uno por cada tipo de residuo con un peso de entre 3 a 5 kg. Durante la recepción de este material se priorizó aquella materia que no haya sido recolectada una semana antes de su selección para evitar la descomposición de los residuos. De los sacos se seleccionaron los residuos que estuvieran en buenas condiciones sin mostrar deterioro o presencia de moho. También se revisó que los residuos no estuvieran mezclados con ningún material extraño o desconocido (tierra, desechos, basura e insectos) que pudiesen afectar a los equipos. En las figuras 2.2 se muestran ejemplos de residuos en buenas y malas condiciones.



Figura 2.2 Residuos de cáscara de mazorca de cacao, a) Recolectado hace 2 días y b) Recolectado hace más de una semana

2.2.2 Etapa 2: Secado de los residuos

2.2.2.1 Consideraciones

El secado directo de cada residuo se realizó en el secador de bandeja del laboratorio del Centro de Desarrollo Tecnológico Sustentable (CDTS) de la Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción (FIMCP). El equipo tiene un límite de temperatura operacional de 60 °C y capacidad para más de 700 g de carga. Las muestras fueron dispuestas en bandejas de acero inoxidable las cuales se limpiaban al finalizar el secado individual de cada residuo.

Los equipos seleccionados para este proceso se eligieron de acuerdo a la norma EN ISO 18134-3. El tiempo de secado se escogió de manera particular para cada residuo en función de las curvas de secado hasta alcanzar el porcentaje de humedad requerido (valor dentro del rango de 10 - 15 %). Previo al secado de los residuos y ensayo de secado para modelado de curva los residuos se trozaron en tamaños y dimensiones iguales para asegurar así la homogeneidad del secado en la superficie de los mismos. Los equipos proporcionados por el CDTS no poseen una marca o serie en específico ya que los ingenieros de este departamento aseguraron que todos son equipos rediseñados por la FIMCP.

2.2.2.2 Modelado de Curva de Secado

Los ensayos de secado directo para el modelado de la curva de Humedad vs Tiempo se realizaron por triplicado. Se tomaron muestras de 200 g las cuales fueron secadas a una temperatura de 50 °C y 1 atm de presión de acuerdo a la recomendación del Ing. Reinoso del CDTS para secado de alimentos. La extracción de las muestras desde las bandejas de la cámara de secado para el registro de su peso se realizó cada 10 minutos. La humedad de las muestras al inicio y después del proceso de secado se verificaron mediante una termobalanza proporcionada por el CDTS.

Adicional a estos ensayos se incluyó el secado de cada residuo al ambiente con condiciones ambientales promedio de temperatura y humedad relativa de 26 °C y 65 % respectivamente. Para el secado al ambiente se tomó una muestra de 200 g y se colocó sobre una superficie de vidrio en un área fuera del laboratorio sin obstrucción del sol. El peso de la muestra se registró cada 20 minutos y dado que el secado al ambiente depende del clima también se verificó conjuntamente con las medidas de peso la

temperatura de la superficie de vidrio haciendo uso de un termopar. En la figura 2.3 se muestra el secado al ambiente y el equipo utilizado.

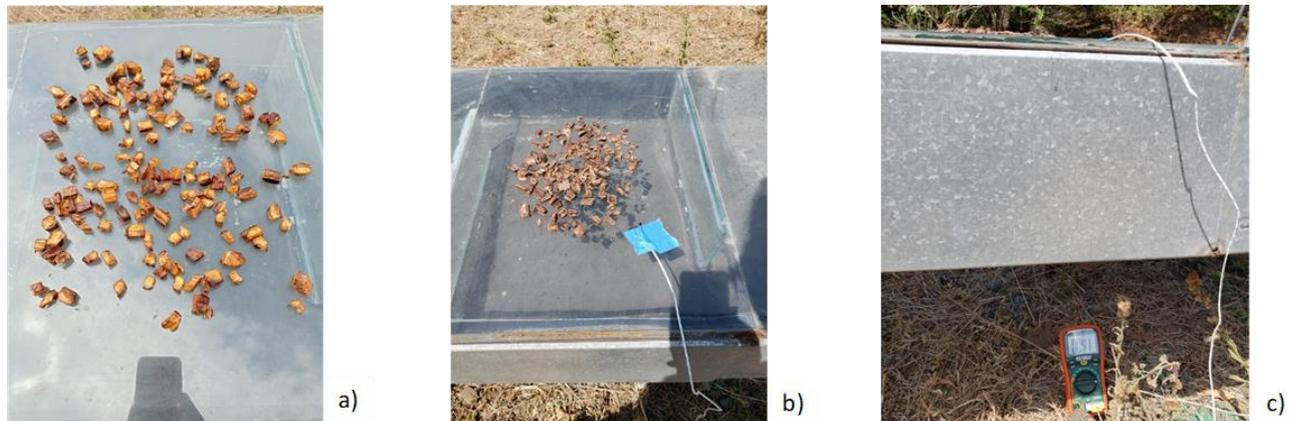


Figura 2.3 Secado al ambiente, a) muestra inicial, b) muestra seca y c) Medición de Temperatura por termopar

2.2.2.3 Secado de residuos de Cacao

Las cáscaras de mazorca de cacao se secaron de manera directa por corriente de aire en el secador de bandejas a una temperatura de 50°C durante 6 horas y 15 minutos. El equipo operó a 1 atm de presión disponiendo de dos sensores de temperatura y humedad portátiles dispuesto uno en el interior de la cámara de secado y otro en la parte exterior del laboratorio para registrar condiciones ambientales. La posición de los sensores permaneció invariable para el secado de los demás residuos y solo fueron retirados para verificación de datos de humedad.

2.2.2.4 Secado de residuos de Arroz

Los residuos de arroz secados fueron únicamente las cascarillas, su humedad fue estimada por termobalanza. Como el mayor contenido de humedad de este material es eliminado durante el procesamiento del arroz como producto, este residuo como tal no requirió de una etapa de secado.

2.2.2.5 Secado de residuos de Maíz

El residuo selecto fueron las mazorcas de maíz ya procesada sin ningún grano de maíz, se descartaron todas aquellas que se encontraban mojadas con el agua de los mismos residuos a fin de reducir la humedad total a eliminar. Las mazorcas de maíz fueron secadas directamente en el secador de bandejas a una temperatura de 50°C durante un

periodo de tiempo de 6 horas. Al igual que con los residuos de cáscara de cacao, para las tusas de maíz también se secó una parte al ambiente y se modeló su curva de secado.

2.2.2.6 Secado de residuo de Poda de árbol de cacao Colección Castro Naranjal 51 (CCN-51)

Los residuos de poda principalmente fueron ramas finas y gruesas del árbol de cacao (*Theobroma cacao L.*) variedad CCN-51 de la zona de plantación de cacao de la ESPOL. Previo al secado de este residuo las ramas y tallos se pelaron para eliminar hojas y elementos ajenos a la parte fibrosa del residuo. Una vez obtenida la parte fibrosa, el residuo fue trozado en astillas con un ancho no mayor a 1 cm y un largo de 5 cm para facilitar su posterior triturado. El material se dejó secar al sol durante 3 días a una temperatura de entre 32 a 45 °C, dicho rango se controló mediante un termopar y el contenido de humedad se verificó por termobalanza. Los residuos de madera se caracterizan por su alto contenido de lignina, para asegurar su presencia y aplicación en los procesos de densificado la humedad del residuo leñoso debe ser de 10 a 20 % (Picchio et al., 2020).

Los equipos utilizados para toda la etapa de secado directo de los residuos se muestran en la figura 2.4.



Figura 2.4 Equipos de secado directo, a) Secador de bandejas y b) Termobalanza

2.2.3 Etapa 3: Molienda del material

Una vez obtenido el porcentaje de humedad requerido, los residuos fueron colocados en un molino de martillo con capacidad de hasta 250 g por carga para alcanzar un diámetro de partícula < 10 mm. Los residuos fueron molidos por separado y la cámara interior del equipo se limpió después de la molienda de cada residuo para evitar contaminación entre las muestras. El material molido se almacenó en bolsas y sacos grandes transparentes, una para cada tipo de residuo.



Figura 2.5 Equipo de molienda del CDTS - Molino de Martillo

2.2.4 Etapa 4: Tamizado del material

El material molido fue trasladado al Laboratorio de Operaciones Unitarias (LOPU) del Departamento de Ingeniería Química donde fue depositado en el sistema de granulometría. Se utilizó un sistema de tamizado RX-812 marca W.S. TYLER estructurado de una base y dos tamices con tamaño de partícula de 2 mm y 1 mm. Para el tamizado se ingresaron de entre 200 a 350 g de material por periodo de operación del equipo. Los periodos de operación fueron de 10 min por carga, las partículas retenidas en la base, tamiz de 1 mm y tamiz de 2 mm se guardaron por separado en fundas Ziploc codificadas con el tipo y tamaño del residuo.



Figura 2.6 Sistema de Tamizado RX - 812 de LOPU (Base + tamiz 1mm + tamiz 2mm)

2.2.5 Etapa 5: Peletización del material

El equipo de densificado fue proporcionado por el CDTs. El tipo de peletizadora utilizada fue una de matriz plana con dos rodillos giratorios con una capacidad de producción de 10 kg/h. El material tamizado se separó en 4 bandejas de acero, una por cada configuración experimental a tratar y respetando las proporciones previamente planificadas para cada residuo. El equipo se operó con una temperatura constante de matriz de más de 80 °C, con ingresos de material de 500 g por carga.

2.2.6 Configuraciones Experimentales

Los pellets de diferentes proporciones se produjeron manteniendo los mismos valores de diámetro de 6 mm y 30 mm de largo de acuerdo con las especificaciones del equipo de peletizado. Luego se guardaron en fundas Ziploc y se almacenaron en un desecador para evitar cualquier ganancia de humedad durante su enfriamiento. Las configuraciones experimentales de los ensayos de producción de los pellets realizados para diferentes proporciones de los residuos se muestran en la Tabla 2.1

Tabla 2.1 Proporciones experimentales de los pellets fabricados.

Configuraciones	Proporción en peso de cáscara de Cacao (%)	Proporción en peso de cascarilla de arroz (%)	Proporción en peso de tusa de maíz (%)	Proporción en peso de (especie de árbol) (%)
A	20	10	20	50
B	15	5	20	60
C	15	5	10	70
D	5	5	10	80

Las proporciones de los diferentes residuos fueron seleccionadas mediante los criterios de:

Aseguramiento de la densidad del producto final: que implica una constitución del pellet del 50% o más, rica en el residuo de mayor contenido lignocelulósico. Para nuestro caso dicho residuo correspondió a los provenientes de la poda de la especie de árbol de cacao CCN-51 ya que se trata de un residuo de tipo leñoso.

Reducción del contenido de cenizas del producto final: donde se consideró reducir en lo más posible la proporción de aquellos residuos que durante la combustión del

producto final produzcan un mayor contenido de ceniza, en este caso fue la cascarilla de arroz.

2.2.7 Etapa 6: Criterios de calidad

2.2.7.1 Dimensiones (diámetro y longitud)

Para la medición de las dimensiones, se tomó como muestra un granulo de pellet conformado, se verificó que estuviese liso asegurando una forma cilíndrica exacta para evitar irregularidades en su superficie que pudiesen entorpecer las mediciones. Luego se procedió a tomar las dimensiones de longitud y diámetro con la ayuda de un calibrador Vernier de 150 x 0,05 mm con calibre de micrómetro de 6x1/128 in. Las muestras seleccionadas para estas mediciones fueron 5 por cada tipo de configuración.

2.2.7.2 Densidad unitaria y aparente

Este parámetro se verifico en base a los estándares de la norma UNE-EN-14103 (UNE, 2015). Se determinó mediante la medición del peso de un granulo de pellet en una balanza analítica con una precisión de 1×10^{-4} g. Luego se determinó el volumen mediante las dimensiones que se obtuvieron en el paso anterior y se calculó la densidad unitaria de esta. Para el caso de la densidad aparente se vertieron los pellets en un recipiente de 5 litros hasta llenarlo. A continuación, se pesó el contenido y luego se utilizó el volumen registrado por el recipiente.

2.2.7.3 Contenido de cenizas

El contenido de ceniza del pellet se verificó mediante los estándares de la norma EN-ISO 18122 (UK, 2015). Para el análisis se hizo uso de una mufla Thermo Scientific Thermolyne con capacidad de calentamiento de 3000 °C. Este parámetro se determinó incinerando 5 g de pellets previamente molidos y pesados dentro de la mufla, inicialmente se registraron los pesos de los crisoles como C-1, C-2, C-3 y C-4. Se agregaron las muestras una por una a cada crisol, se analizaron 4 muestras una por cada configuración codificadas como M-A, M-B, M-C y M-D. Estos crisoles se calentaron a 250 °C incrementando progresivamente la temperatura en un lapso de 5 °C por minuto a lo largo de 30 minutos para luego mantener dicha temperatura durante 60 minutos. Luego se incrementó la temperatura progresivamente a 550 °C a lo largo de 30 minutos y se mantuvo dicha temperatura durante otras 2 horas más. Finalmente se dejó reposar la muestra en un desecador durante 30 minutos y luego se registró el peso final de la

muestra calcinada más el crisol como C-A, C-B, C-C y C-D. La codificación es importante en este análisis puesto que para los cálculos se requiere del peso exacto de los crisoles, las muestras y el crisol final más el contenido de ceniza en su interior.

2.2.7.4 Contenido de humedad

Para el análisis de este parámetro se utilizó una termobalanza o Determinador de Humedad KERN- DBS. Se tomaron 4 muestras con pesos de entre 0,2 a 0,9 g, una de cada configuración del producto, luego se depositó cada una en el interior de la termobalanza para estimar su contenido de humedad. El equipo se programó para un calentamiento a 130 °C durante 5 minutos. Para esta etapa es necesario destacar que el periodo de operación se extiende automáticamente cuando el equipo detecta presencia de humedad, aun cuando se haya programado un tiempo en específico.

2.2.7.5 Poder Calorífico

El análisis de este parámetro se hizo mediante un Calorímetro semiautomático IKA C200 y fue realizado en el laboratorio de Análisis Instrumental del Departamento de Ingeniería Química de la FCNM. Inicialmente se verificó que el equipo se encontrase programado para un tiempo de análisis de 20 minutos desde el comienzo de la ignición en el interior de la cámara de combustión sin tener en cuenta el periodo de enfriamiento. Luego se llenó la camisa de agua del equipo y se preparó la muestra, se pesó un aproximado de 0,5 g por cada configuración a analizar. El análisis se realizó de forma individual para cada muestra por lo que el tiempo total de análisis de las 4 configuraciones fue de alrededor de 4 horas.

Una vez lista se ingresó la muestra dentro de la cámara de combustión, esta se selló y se presurizó inyectándose oxígeno a una presión de 30 bar. Una vez llena se ingresó en el interior del equipo asegurándose su contacto con la resistencia eléctrica y se dio el paso al periodo de combustión.

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Resultados del Análisis Bioenergético de los residuos agrícolas de la región costa del Ecuador

A través de los mapas de densidad de producción de residuos agropecuarios del Ecuador, se verificó la presencia de estos residuos en la región Costa, luego a nivel provincial y finalmente los cantones de mayor generación de los residuos y cantidad en t/año. Posteriormente se muestran los resultados del Protocolo establecido y los análisis de Poder Calorífico, Humedad y Ceniza de los pellets producidos.

3.1.1 Residuos de la actividad productiva del Cacao

Según los estudios del potencial bioenergético de los residuos agropecuarios del Ecuador respecto a la producción del cultivo de cacao a nivel provincial, se encontró que las provincias de mayor superficie cosechada en la región costa son: Guayas, Los Ríos, Manabí y Esmeraldas.

Como nuestro enfoque es hacia el aprovechamiento de los residuos de la producción de cacao, se priorizaron los datos de la distribución en función de la cantidad de residuos al año de este producto, dichos datos se muestran en la tabla 3.1.

Tabla 3.1 Generación de Residuos de Cacao por provincia

Provincia	Producción anual de residuos de cacao (t/año)
Esmeraldas	183431,54
Manabí	222350,38
Los Ríos	456552,76
Guayas	718018,43
Santa Elena	790,93
El Oro	79231,40

Fuente: Atlas Bioenergético del Ecuador (Centro Nacional Agropecuario y Encuesta de Producción Agropecuaria continua (ESPAC), con las Series Estadísticas Anuales nacionales a nivel de Provincia) (Guzmán et al., 2014).

Los resultados también mostraron que la menor producción de este residuo se encuentra en las provincias de Santa Elena y El Oro. La única tecnología aplicada para su

aprovechamiento es la combustión directa que permiten una producción de energía eléctrica de 374,05 KWh/t (base seca). El aprovechamiento energético se muestra a continuación en la tabla 3.2.

Tabla 3.2 PCI promedio de los tipos de Residuos agrícolas en el Ecuador

Tipo de residuo	Poder Calorífico Inferior (TJ/Kg)
Residuo de campo	6,464
Residuo de beneficio	15,526
Residuo de proceso	12

Fuente: Atlas Bioenergético del Ecuador (Centro Nacional Agropecuario y Encuesta de Producción Agropecuaria continua (ESPAC), con las Series Estadísticas Anuales nacionales a nivel de Provincia), (Guzmán et al., 2014).

3.1.2 Residuos de la actividad productiva del arroz

El análisis de este residuo reveló que la generación de residuos de la producción de arroz se encuentra distribuida en dos provincias principales: Guayas con una producción de 1311525,488 t/año y Los Ríos con 682811,74 t/año.

Las tecnologías de aplicación que aprovechan este residuo son la Gasificación y Combustión aprovechándose el PCI de estos residuos de 13,349 (MJ/kg), la generación eléctrica por tonelada de este residuo es de 744,38 Kwh.

3.1.3 Residuos de la actividad productiva del Maíz Duro

De acuerdo con el análisis del potencial bioenergético de los residuos de maíz del Ecuador a nivel Provincial se obtuvo que las provincias de mayor superficie cosechada en la región Costa son Guayas y Los Ríos.

La provincia del Guayas genera 77 771,22 t/año de este residuo mientras que en Los Ríos se producen 24 4377,83 t/año. Otras provincias que también producen residuos de maíz son Manabí y Santa Elena, sin embargo, su producción es menor. La tecnología que aprovecha estos residuos es la combustión ocupándose un PCI de 12,553 MJ/kg la producción de energía eléctrica alcanza los 689,59 kWh/t en base seca (Guzmán et al., 2014).

3.2 Resultados del Análisis de Residuos Agrícolas de mayor abundancia en la Provincia del Guayas

Los resultados obtenidos en el gráfico 3.1, evidenciaron que los residuos de las actividades productivas del Arroz, Cacao, Maíz y Caña de azúcar son los más abundantes en la provincia del Guayas. Analizando las zonas de producción de los residuos en cada mapa del Atlas Bioenergético del Ecuador, se estableció que la producción promedio de estos residuos es 1311525,48 t/año, 718018,43 t/año, 77771,21 t/año y 593316,16 t/año respectivamente.

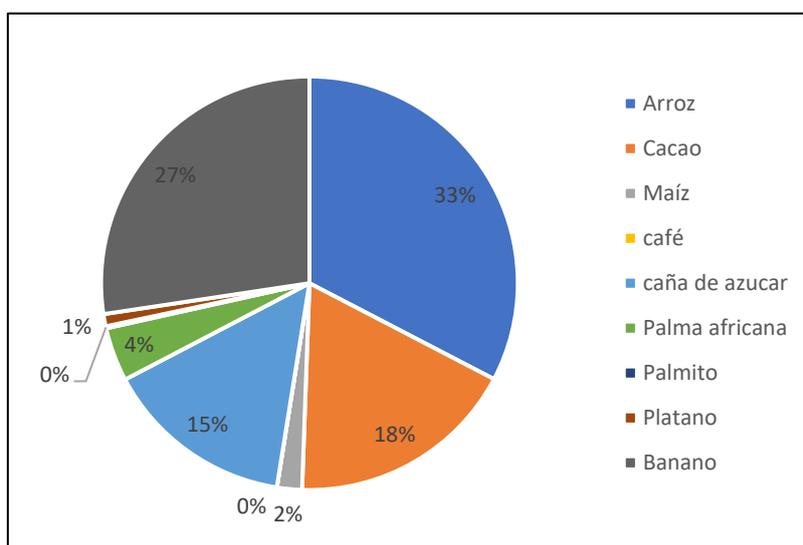


Figura 3.1 Porcentaje de producción anual en t/año de residuos agrícolas de la Región Costa del Ecuador

3.3 Resultados de Identificación y selección de los centros de acopio y piladoras.

El análisis de las zonas productivas de los mapas de Densidad de Producción del Atlas Bioenergético del Ecuador permitió identificar los cantones, la cantidad de piladoras y sus respectivas densidades de producción de estos residuos dentro de la Provincia del Guayas. Dichos resultados se muestran en las tablas 3.3, 3.4 y 3.5.

Tabla 3.3 Densidad productiva de residuos de Arroz y número de Piladoras presentes por Cantones de la Provincia del Guayas

Cantón	Número de Piladoras	Densidad de Residuos (t/km²/año)
Nobol	2	200 – 600
Pedro Carbo	1	10 – 50
Isidro Ayora	1	10 – 50
Santa Lucía	3	200 – 600
Daule	3	200 – 600
Colimes	4	50 – 200
Balzar	1	10 – 50
Salitre	4	200 – 600
Samborondón	3	200 – 600
Durán	1	50 – 200
Yaguachi	4	200 – 600
Milagro	2	10 – 50
Simón Bolívar	1	50 – 200
El Triunfo	1	10 – 50
Naranjal	6	50 – 200
Lomas de Sargentillo	2	50 – 200

Tabla 3.4 Densidad productiva de residuos de Cacao por Cantones de la Provincia del Guayas

Cantón	Densidad de Residuos (t/km²/año)
Nobol	0,15 – 10
Guayaquil	0,15 – 10
Bucay	10 – 50
Coronel Marcelino Maridueña	10 – 50
Juján	50 – 200
Naranjito	50 – 200
Balzar	0,15 – 10
Salitre	10 – 50
El Empalme	50 – 200
Durán	10 – 50
Yaguachi	50 – 200
Milagro	200 – 600
Simón Bolívar	50 – 200
El Triunfo	10 – 50
Naranjal	50 – 200

Balao	200 – 600
-------	-----------

Tabla 3.5 Densidad productiva de residuos de Maíz por Cantones de la Provincia del Guayas

Cantón	Densidad de Residuos (t/km ² /año)
Guayaquil	0,15 – 10
Isidro Ayora	10 – 50
Coronel Marcelino Maridueña	0,15 – 10
Colimes	0,15 – 10
Naranjito	0,15 – 10
Balzar	10 – 50
Salitre	0,15 – 10
El Empalme	10 – 50
Milagro	0,15 – 10
El Triunfo	0,15 – 10
Pedro Carbo	10 – 50

Pese a la identificación de 16 cantones que producen residuos de cacao, solo dos de ellos mostraron industrias procesadoras de Cacao, una de ellas se encuentra en Guayaquil y las dos restantes pertenecen al cantón Durán. La información respecto a las piladoras de residuos de maíz fue muy escasa, solo se contó con la densidad de generación del residuo.

Las piladoras adecuadas para la implementación del proyecto son todas aquellas que se encuentren en los cantones de mayor densidad de generación de los residuos de arroz, cacao y maíz. Para los residuos de arroz serian todas aquellas piladoras dentro de los cantones: Nobol, Santa Lucía, Daule, Salitre, Samborondón y Yaguachi.

Para los residuos de cacao vendrían a ser las piladoras de los cantones de Guayaquil y Durán puesto que todas las producciones de los cantones circundantes son enviadas a las industrias procesadoras de estos 2 cantones.

Por último, para los residuos de maíz se tendrían las piladoras o centros de acopio presentes en los cantones de: El Empalme, Balzar y Pedro Carbo ya que son las que disponen de mayor densidad de generación de este residuo.

3.4 Resultados del Protocolo de Tratamiento de Residuos Agrícolas.

3.4.1 Preparación y tratamiento de los residuos.

Los métodos de preparación aplicados identificaron a los residuos de mazorca de Cacao y tusa de Maíz como los residuos de mayor humedad inicial con valores de 83 % y 69 % respectivamente. Propiedad que les atribuyó un carácter de manejo y secado prioritarios con tiempos de espera de esta etapa inferiores a 2 días.

3.4.2 Procedimiento de Secado

Los resultados del secado Directo aplicado a los residuos de mayor contenido de humedad sacaron a relucir una reducción constante y proporcional del material desde un máximo de 9 g hasta un mínimo de 0,1 g. Esta reducción constante también verificó que los tamaños y dimensiones de trozado seleccionado ofrecieron un secado homogéneo. Estas dimensiones fueron de 2 x 1 cm para la mazorca de Cacao (grosor dependiente de la mazorca) y cilindros de 1,5 cm de largo para las tusas de maíz con trozado posterior en 4 partes iguales. La coloración de los residuos de mazorca de cacao aprovechable fue naranja y concho de vino.

Los resultados del secado al Ambiente aplicado a estos residuos de alto contenido de humedad mostraron una reducción de humedad de 10 a 20 % factible de ser alcanzada en periodos de tiempo similares a los del secado Directo. La variación de la temperatura ambiental afectó significativamente la reducción de la humedad presente en estos residuos así también como el tiempo de secado. En las Figuras 3.2 y 3.3 se muestran las curvas de secado para los residuos de Mazorca de Cacao y tusa de maíz donde se evidencia la influencia de las condiciones climáticas en la curva de secado al ambiente. Para la curva de secado al ambiente de Cacao la temperatura ambiente promedio fue de 42 °C mientras que para el secado de la Tusa de maíz fue de 29 °C. La Tabla 3,6 muestra los porcentajes de humedad iniciales de los residuos tratados y el porcentaje final alcanzado durante los procesos de secado.

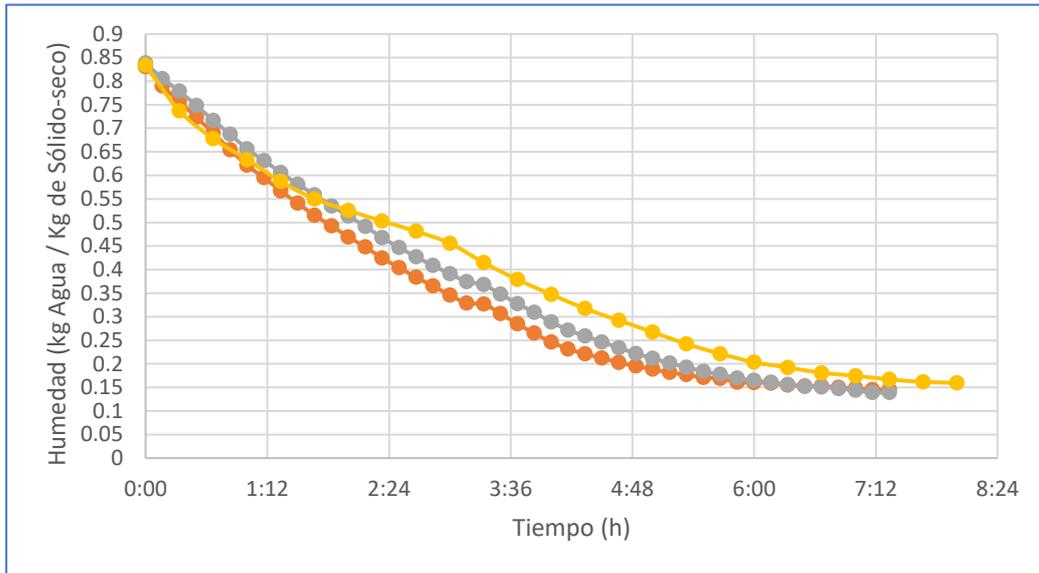


Figura 3.2 Curva de Secado Directo y al Ambiente de los Residuos de Mazorca de Cacao.

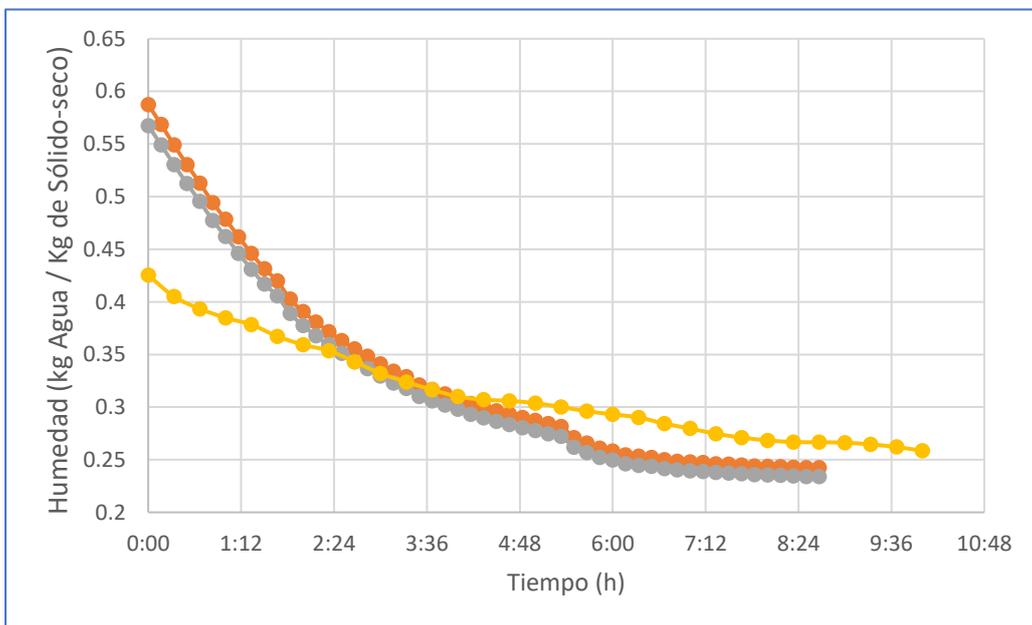


Figura 3.3 Curva de Secado Directo y al Ambiente de los Residuos de Tusa de maíz (Choclo).

Tabla 3.6 Contenido de Humedad de los Residuos sin moler y Tiempo de secado al Ambiente.

Muestra	Humedad Inicial (%)	Humedad Final (%)	Tiempo de Secado Ambiente (d)	Tiempo de secado Directo (h)
Cáscara de Mazorca de Cacao	80,13 - 83	10 - 11	3	7 – 8
Madera de Cacao (CNN-51)	39,92 – 45,04	11,29 – 13	3 – 4	NA
Tusa de maíz	69	10 -11	4	6 – 7
Cascarilla de arroz	11	10	NA	NA

Estos Resultados demostraron que los métodos y equipos de secado seleccionados permitieron la obtención de resultados de reducción de humedad dentro de los rangos requeridos para la fabricación de pellet que son del 10 – 11 % para residuos y 10 – 20 % para la madera o residuos de poda.

3.4.3 Molienda y Tamizado

Las medidas de seguridad establecidas en el protocolo para el manejo de los equipos de molienda, tamizado y almacenamiento del material molido permitieron evitar cualquier problema durante estas etapas del proceso. Finalmente se obtuvo la materia prima seca y reorganizada en tamaños de partícula menores a 1 mm, entre 1 y 2 mm y mayores a 2 mm para cada uno de los tres residuos y la madera de cacao utilizada como aglomerante natural.

En las figuras 3.4 se visualizan muestras de tamaño de partícula de los residuos de tusa de maíz y cascarilla de arroz como ejemplos de apariencia final de un residuo húmedo y un residuo seco respectivamente ya procesados.



Figura 3.4 Residuos de tusa de maíz molidos y tamizados para diferentes tamaños de partícula: a) < 1mm, b) 1 – 2 mm y c) > 2mm



Figura 3.5 Residuos de cascarilla de arroz molidos y tamizados para diferentes tamaños de partícula: a) < 1mm, b) 1 – 2 mm y c) > 2mm

Como guía y fundamento para investigaciones futuras el Protocolo Establecido garantizó la obtención de los mismos resultados mostrados en este proyecto siempre que los equipos utilizados permitan condiciones de trabajo similares a las especificadas.

3.5 Resultados de los Ensayos de Producción de Pellets

Las proporciones de los residuos y madera de cacao seleccionadas para formar las configuraciones A, B, C y D permitieron producir pellets de una textura liza y sólida. Los pellets de la configuración D muestran un estado más homogéneo que se le atribuye a su mayor constitución en residuo de madera. Los pellets de las configuraciones A, B y C mostraron tonalidades cafés que se atribuye a su composición de entre 20 a 15 % de residuo de cacao.

3.6 Resultados de parámetros de calidad

3.6.1 Dimensiones (Longitud y Diámetro)

Las mediciones realizadas mostraron que las dimensiones de los pellets de cada configuración rodearon valores promedios de 30,23 mm de largo y 6,05 mm de diámetro. Comparando estos valores con los rangos de 6 a 8 mm para diámetro y 3,15 a 40 mm para la longitud, los resultados obtenidos cumplieron con la EN-16127 para dimensiones del pellet de madera.

Las desviaciones de 0,23 mm en la longitud y 0,05 mm en el diámetro respecto a las especificaciones del equipo se deben a que durante el periodo de enfriamiento y salida del pellet su presión es menor. Las tablas 3,7 y 3,8 muestran estas mediciones.

Tabla 3.7 Diámetros de Pellets por Configuración

Configuraciones	Pelet 1	Pelet 2	Pelet 3	Pelet 4	Pelet 5	Diámetro (mm)
A	6,044	6,048	6,051	6,049	6,047	6,048
B	6,055	6,049	6,058	6,054	6,052	6,054
C	6,05	6,039	6,048	6,044	6,045	6,045
D	6,049	6,052	6,054	6,047	6,05	6,050
Promedio						6,049

Tabla 3.8 Longitudes de Pellets por Configuración

Configuraciones	Pelet 1	Pelet 2	Pelet 3	Pelet 4	Pelet 5	Longitud (mm)
A	30,399	30,202	30,239	30,241	30,106	30,237
B	30,2	30,012	30,424	30,228	30,145	30,202
C	30,23	29,295	31,251	30,223	30,174	30,235
D	29,992	30,441	30,334	30,101	30,28	30,230
Promedio						30,226

3.6.2 Densidad unitaria

Se pesó cada pellet y se tomó un promedio de su peso dicho valor fue de 0.9559 g. El volumen se determinó con la ayuda de los datos de sus dimensiones. La densidad unitaria se determinó con la masa promedio representativa de cada grupo y el volumen promedio calculado dando así un valor de densidad del pellet de 1100 Kg·m⁻³.

3.6.3 Contenido de ceniza

Los porcentajes de ceniza obtenidos durante este análisis fueron de 8,63 % para A, 7,876 % para B, 8,699 % para C y 8,260% para D, dando un promedio en contenido de ceniza del producto de 8,366 %. Este valor es superior al límite establecido por la norma EN – 14775 para Pellets constituidos por madera cuyo rango es entre 0,7 y 3 %. Desde un punto de vista estructural este resultado es uno esperado principalmente debido al hecho de que los residuos agrícolas se caracterizan por su elevado contenido de ceniza en comparación con la madera. Esto también es evidente entre los porcentajes de ceniza de A y B donde pese a tenerse casi el mismo porcentaje en madera la adición de un 5 % de cáscara de cacao y arroz en su composición le atribuye un contenido mayor.

3.6.4 Contenido de Humedad

Los pesos que se registraron inicialmente fueron de 0,902 g, 0,878 g, 0,892 g y 0,820 g para las configuraciones A, B, C y D respectivamente. Al finalizar cada análisis se registró el porcentaje de humedad y el tiempo tomado de análisis en cada caso. Los valores obtenidos fueron 10,12 % 2,51min; 11,20% 4,45 min; 10,05% 3,24min; 11,43% 5,12 min, para las configuraciones A, B, C y D respectivamente. Teniendo en cuenta el límite de 10 % de humedad según la normativa EN – 14774-3, solo las configuraciones A y C cumplieron con este parámetro.

3.6.5 Poder Calorífico

A través del análisis de poder calorífico se obtuvieron los valores de PCS para cada configuración, siendo estos: 15733 KJ/Kg para la configuración A, 15546 KJ/Kg para B, 15737 KJ/Kg para C y 15984 KJ/Kg para D, con un promedio de 15750 KJ/Kg. Estos resultados permitieron estimar valores de PCI de 15237 KJ/Kg, 15096 KJ/Kg, 15311 KJ/Kg y 15519 KJ/Kg para cada configuración respectivamente.

Considerando el rango de poder calorífico de 16 MJ/Kg hasta 19 MJ/Kg presente en la EN- 14918 para pellets de madera, los resultados obtenidos fueron excelentes ya que se acercaron a dicho rango pese a usarse una composición de residuos agrícolas.

Es necesario recalcar que las configuraciones D y C tuvieron los valores más altos, esto puede deberse a que de entre las 4 configuraciones ambas son las de mayor contenido de madera con porcentajes del 80 y 70 % respectivamente. Esto último es de gran importancia ya que las configuraciones A y B solo se alejan de D y C en un rango de 87 a 300 MJ/Kg hecho que demuestra el elevado aporte de poder calorífico de los residuos en el pellet para composiciones de un 50 % de residuos agrícolas y 50 % de madera.

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

Los resultados alcanzados en este estudio permitieron definir las siguientes conclusiones:

- Mediante el análisis realizado en las zonas de mayor producción de residuos de arroz, maíz y cacao de la provincia del Guayas se logró seleccionar los cantones cuyos centros de acopio, piladoras y fábricas fueron los más factibles de implementar la iniciativa. De esta manera se identificó en los cantones de Guayaquil y Duran las únicas fábricas de cacao que permiten la obtención de este residuo, más de 6 cantones que facilitan la adquisición de residuos de arroz y 4 cantones para la obtención de residuos de maíz. Por otro lado, también se verificó densidades de producción de 50 a 600 t/km²/año de los 3 residuos en los cantones seleccionado asegurando así la disponibilidad del material requerido.
- Se estableció un protocolo de tratamiento que permitió un correcto manejo y almacenamiento de los residuos trabajados junto con las medidas y equipos de seguridad requeridos para cada etapa del pretratamiento de los mismos.
- El Protocolo también garantiza bajo un seguimiento estricto del procedimiento, la obtención de un material particulado de entre 1 a 2 mm y con una humedad de entre 11 a 20 % siendo propiedades idóneas para un adecuado peletizado.
- Mediante los ensayos de secado realizados en el protocolo se obtuvo las curvas de secado de los residuos de cascara de mazorca de cacao y tusa de maíz permitiendo alcanzar la humedad requerida y definir tiempo de secado necesarios. Las gráficas obtenidas a su vez permiten reducciones de tiempo de secado dentro de un rango de 6 a 7 horas a 50 °C para un secado Directo y un rango de 8 horas a 3 días con un rango variante de 24 – 42 °C para el secado al Ambiente. Adicionalmente el procedimiento aplicado logró la reducción del contenido de humedad de los residuos hasta un 11 %, ideal para su uso en la fabricación de pellet y el almacenaje duradero del material seco.
- Las configuraciones propuestas (A, B, C y D) demostraron la viabilidad del uso de los residuos de cacao, maíz y arroz como materia prima para la producción exitosa

de pellet además de la aplicación de la madera de cacao CNN-51 como aglomerante natural para el proceso.

- Al comparar los resultados de los análisis de Poder Calorífico, Humedad y Ceniza de cada una de las configuraciones con los límites por parámetro de las EN para pellets de madera se encontró que el producto es potencialmente competitivo. Las configuraciones D y C alcanzaron valores de 15,98 MJ/kg y 15,74 MJ/kg que comparado con el poder calorífico de los residuos individuales de 12 MJ/kg evidenció un incremento significativo en el potencial energético de los residuos como parte del pellet. Pese a que el contenido de ceniza obtenido sale del límite por normativa, se puede añadir que el contenido de humedad si cae dentro del rango de la normativa. Además, el poder calorífico fue muy cercano al valor de 16 MJ/kg de los pellets constituidos únicamente de madera incluso para las configuraciones propuestas cuya composición de residuos agrícolas fue solo de un 50%.

- Se logró evidenciar que los pellets constituidos en un 50 % de residuos de cacao, maíz, arroz y un 50 % de aglomerante natural de madera de cacao en adelante son capaces de ofrecer un poder calorífico de más de 15,7 MJ/Kg.

Definiéndose finalmente una proporción óptima de mínimo un 50 % de aglomerante para garantizar la densificación del producto y cualquier variante proporcional de los residuos rica en la cascara de cacao para el poder calorífico. Cabe destacar que los pellets obtenidos mostraron gran resistencia y una humedad de entre 10 al 11% cumpliendo con las propiedades que caracterizan a este producto al asegurar su durabilidad y almacenamiento.

4.2 Recomendaciones

- Durante la etapa de recepción y selección de la materia prima, se debe inspeccionar y clasificar minuciosamente los residuos que posean mayor cantidad de humedad, esto debido a la tendencia que tiene esta materia orgánica en descomponerse con la interacción del medio, y de esta manera evitar la proliferación de hongos y aparición de insectos que puedan provocar la contaminación de todo el material recibido.
- Los residuos agrícolas con mayor contenido de humedad, se deben de tomar como prioridad para la etapa de secado, en el caso de que se disponga de un secador con capacidad limitada con respecto a su carga.
- Con respecto a los residuos de cacao y maíz, se recomienda no exceder un tiempo aproximado de 3 días sin almacenarlos, contando a partir del momento en que estos se hayan podado. A partir de este tiempo estimado se sugiere utilizar técnicas de almacenamiento bajo refrigeración, congelación o al vacío.
- En la etapa del secado, se debe verificar que la temperatura del secador no opere a más de 150°C, caso contrario se corre el riesgo que la materia orgánica se auto combustione y que la lignina se activa en una etapa muy temprana.
- Con vistas a la mejora de la calidad del pellet, se sugiere aplicar técnicas de tratamiento especializadas al producto una vez que ya se haya obtenido, así de esta forma se garantizaría la eliminación de la mayor cantidad posible de humedad en el producto sin que se vea afectada la densidad y conformación del pellet.
- Para precisar con mayor grado el alcance del proyecto, se invita a realizar el reconocimiento especializado del campo de estudio, con la ayuda de técnicas y herramientas estadísticas que permita incluir la identificación tanto de los grandes y pequeños productores del sector.

BIBLIOGRAFÍA

- Barrera, C. : (2018). Combustión de biomasa: conceptos, tecnologías y aplicaciones en la agroindustria de la palma de aceite* Biomass Combustion: Concepts, Technologies and Applications in the Oil Palm Agroindustry. In *Revista Palmas. Bogotá (Colombia) vol* (Vol. 39, Issue 4).
- Bolívar, V., Alvarado, C., Armando, J., & Macías, V. (2015). *UNIVERSIDAD DE GUAYAQUIL FACULTAD DE INGENIERIA QUIMICA TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TITULO DE: INGENIERO QUIMICO TEMA: ESTUDIO DE LAS POSIBILIDADES DE PELETIZACIÓN DE LA CÁSCARA DE CACAO Y SU UTILIZACIÓN COMO BIOCOMBUSTIBLE AUTOR.*
- Campos, P., Miller, A. Z., Knicker, H., Costa-Pereira, M. F., Merino, A., & de la Rosa, J. M. (2020). Chemical, physical and morphological properties of biochars produced from agricultural residues: Implications for their use as soil amendment. *Waste Management*, 105, 256–267. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.02.013>
- Chiriboga, G., de La Rosa, A., Molina, C., Velarde, S., & Carvajal C, G. (2020). Energy Return on Investment (EROI) and Life Cycle Analysis (LCA) of biofuels in Ecuador. *Heliyon*, 6(6). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04213>
- Daniel Núñez Retana, V., Ángel Escobedo Bretado, M., Quiñones Reveles, M., Aquino Faustino, R., & Carrillo Parra, A. (2019). EFECTO DEL CONTENIDO DE HUMEDAD SOBRE PÉLETS DE ASERRÍN DE MADERA DE *Pinus spp* 1 [EFFECT OF THE MOISTURE CONTENT ON *Pinus spp*. WOOD SAWDUST PELLETS]. In *Revista Mexicana de Agroecosistemas* (Vol. 6, Issue 2).
- Djomdi, Fadimatou, H., Hamadou, B., Nguela, L. J. M., Christophe, G., & Michaud, P. (2021). Improvement of thermophysical quality of biomass pellets produced from rice husks. *Energy Conversion and Management*: X, 12. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2021.100132>
- Dolores Cortés-Sánchez, M., Macarena Gata-Montero, E., Pipió-Ternero, A., & Rodríguez-Rivas Juan Manuel Sánchez-Santos, Á. (2017). *Biocombustibles: tipos y estrategias de producción.*

- Ginni, G., Kavitha, S., Yukesh Kannah, R., Bhatia, S. K., Adish Kumar, S., Rajkumar, M., Kumar, G., Pugazhendhi, A., Chi, N. T. L., & Rajesh Banu, J. (2021). Valorization of agricultural residues: Different biorefinery routes. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(4). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105435>
- González, E. R. (2018). *Caracterización y densificación de biomasa forestal (aerrín y corteza de Pinus Caribaea Morelet var Caribaea) en fabricación de briquetas en la Empresa Agro Forestal (EAF) Macurije.*
- Guzmán, R. E., Albornoz Vintimilla, E., Santiago, E., & Palacios, M. (2014). *Econ. RAFAEL CORREA DELGADO Presidente de la República del Ecuador.*
- IDAE. (2007). *Manual de Energías Renovables España_Energía de la Biomasa.*
- Kantová, N. Č., Holubčík, M., Čaja, A., Trnka, J., & Jandačka, J. (2022). Analyses of Pellets Produced from Spruce Sawdust, Spruce Bark, and Pine Cones in Different Proportions. *Energies*, 15(8). <https://doi.org/10.3390/en15082725>
- Klug, M. (2012). *Pirólisis un proceso para derretir Biomasa.*
- Lenín, L., Garcés, M., María, A., Muñoz, A., Ortiz, I. R., & Por, E. (2019). *Balance Energético Nacional Agradecimientos Agradecimiento especial a las instituciones que hicieron posible la elaboración de este documento: Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales No Renovables-ARCERNNR Petroecuador EP Petroamazonas EP BALANCE ENERGÉTICO.*
- Lucas Herguedas, A. I. de. (2012). *Biomasa, combustibles y sostenibilidad.* ITAGRA.
- Meza-Sepúlveda, D. C., Castro, A. M., Zamora, A., Arboleda, J. W., Gallego, A. M., & Camargo-Rodríguez, A. v. (2021). Bio-based value chains potential in the management of cacao pod waste in colombia, a case study. In *Agronomy* (Vol. 11, Issue 4). MDPI. <https://doi.org/10.3390/agronomy11040693>
- Ng, H. S., Kee, P. E., Yim, H. S., Chen, P. T., Wei, Y. H., & Chi-Wei Lan, J. (2020). Recent advances on the sustainable approaches for conversion and reutilization of food wastes to valuable bioproducts. In *Bioresource Technology* (Vol. 302). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122889>
- Orejuela-Escobar, L. M., Landázuri, A. C., & Goodell, B. (2021). Second generation biorefining in Ecuador: Circular bioeconomy, zero waste technology, environment and sustainable development: The nexus. In *Journal of Bioresources and*

Bioproducts (Vol. 6, Issue 2, pp. 83–107). KeAi Communications Co.
<https://doi.org/10.1016/j.jobab.2021.01.004>

Pérez, J., Borge, D., & Agudelo, J. (2010). Proceso de gasificación de biomasa: una revisión de estudios teórico-experimentales Biomass gasification process: theoretical and experimental studies a review. In *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia N.º* (Vol. 52). Marzo.

Picchio, R., Latterini, F., Venanzi, R., Stefanoni, W., Suardi, A., Tocci, D., & Pari, L. (2020). Pellet production from woody and non-woody feedstocks: A review on biomass quality evaluation. In *Energies* (Vol. 13, Issue 11). MDPI AG.
<https://doi.org/10.3390/en13112937>

Porto de Souza Vandenberghe, L., Kley Valladares-Diestra, K., Amaro Bittencourt, G., Fátima Murawski de Mello, A., Sarmiento Vásquez, Z., Zwiercheczewski de Oliveira, P., Vinícius de Melo Pereira, G., & Ricardo Soccol, C. (2022). Added-value biomolecules' production from cocoa pod husks: A review. *Bioresource Technology*, 344. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126252>

Serrano, J., Mejía, W., Ortiz, J., Sánchez, A., & Zalamera, S. (2017). *Vista de Determinación del Potencial de Generación Eléctrica a Partir de Biomasa en el Ecuador*.

<https://publicaciones.ucuenca.edu.ec/ojs/index.php/quimica/article/view/1592/1252>

UK, B. S. I. (2015). *BSI Standards Publication Solid biofuels-Determination of ash content*. <http://qstandard.org/>

UNE, I. E. de E. (2015). *Determinación de la densidad a granel (UNE-EN 15103) | ISE Research Group*. <https://ise.uc3m.es/biolab/densidad-granel/>

APÉNDICES

APÉNDICE A

A.1. PROTOCOLO DE PRETRATAMIENTO DE RESIDUOS SÓLIDOS

1.1. Cáscara de Mazorca de Cacao

1.1.1. Tratamiento y Preparación

Una de las claves para la preparación de este residuo radica en su humedad, los residuos secos suelen ser muy sencillos de manejar y manipular cuando se trata de su trozado o limpieza. Sin embargo, en este caso estamos hablando de las mazorcas de cacao, una vez extraídas las pepas de cacao de su interior las mazorcas se caracterizan por ser muy húmedas.

Desde el primer corte su elevado contenido de humedad lo vuelve un residuo muy pegajoso y si solo lleva dos días de haber sido desechado su coloración será naranja con una textura similar al de una calabaza. Por otro lado, las mazorcas que lleven más de 5 días de haber sido desechadas mostrarán un moho blanco si es que no han sido puestas a secar y seguirán húmedas.

Para la selección de este residuo si se va a trabajar con aquellos de mayor humedad debe priorizar aquellas mazorcas cuya coloración sea naranja las cuales no muestren ninguna capa blanca. Si las mazorcas a utilizar se encuentran algo secas (3 días al sol), deben escogerse las que tengan un color concho de vino y no muestren ninguna capa blanca de moho.

Las mazorcas muy húmedas deben manipularse con guantes de látex debido a su textura pegajosa y su secado debe ser inmediato, el material debe trozarse en tamaños iguales para garantizar un secado homogéneo. En las figuras A.1 puede observarse ejemplos de tonalidad de la mazorca de cacao húmeda y semi seca.



Figura 4.1 Mazorcas de Cacao húmeda color naranja claro y seca color concho de vino

1.1.2. Consideraciones de Secado y Estado Final

La meta de secado de todos los residuos para su uso como materia prima en la elaboración del pellet es la obtención de un porcentaje de humedad entre el 10 al 11 %. Entre más húmedo el residuo más tiempo requerirá su secado a una temperatura constante para alcanzar dicha humedad.

Procedimiento de secado Directo

- Primero debe encenderse el secador de bandejas y esperar el calentamiento de la resistencia hasta la temperatura de 50 °C.
- Luego usando guantes de látex pesar dos cargas de 200 g de la mazorca de cacao trozada y depositarlas en dos bandejas de acero inoxidable limpias.
- Una vez verificado que el secador ha alcanzado la temperatura indicada, abrir la cámara de secado e ingresar las dos bandejas con el material y cerrarla.
- Controlar tiempo de secado mediante la curva de secado para este residuo, la curva está modelada para un secado continuo a 50 °C.

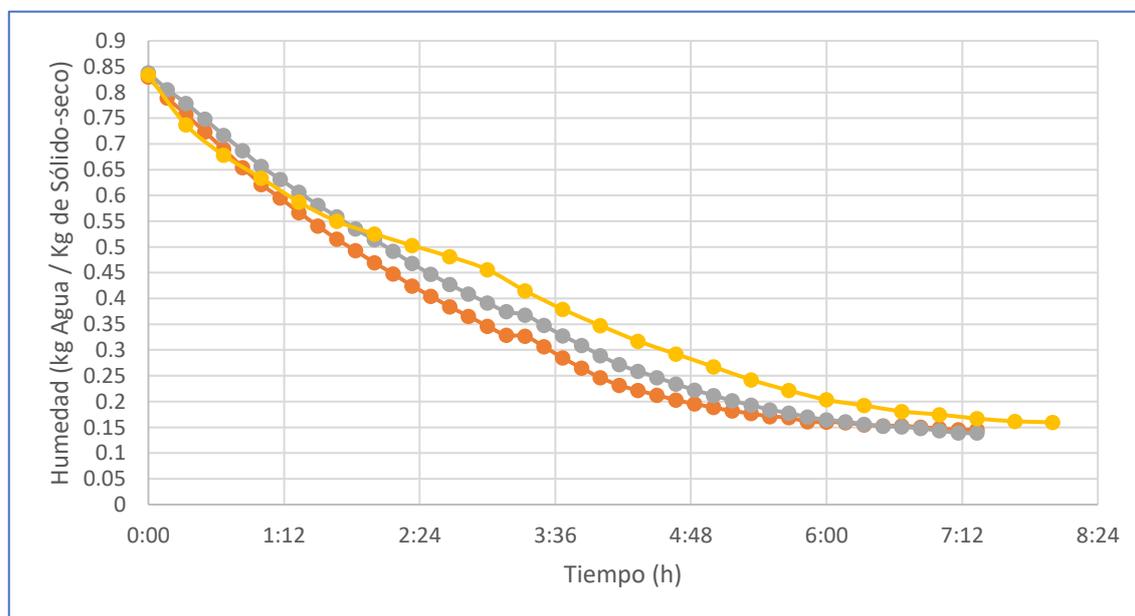


Figura 4.2 Curva de Secado de Mazorca de Cacao

Observación: La gráfica de Curva de secado muestra dos curvas de secado Directo por secador de Bandejas y una curva amarilla para secado al Ambiente. Los resultados del secado pueden variar dependiendo del tamaño del trozado del material, en específico esta curva responde al secado de un trozado de 2 x 1 cm.

1.1.3. Manejo de la muestra seca.

Para el almacenamiento de la muestra seca basta con usar fundas Ziploc y cerrarlas correctamente, la humedad del material deberá de ser del 10 u 11 %. Como caso particular si se desea almacenar muestras con una humedad mayor al 15 % esta deberá cerrarse al vacío ya que este material húmedo a los dos días mostrará moho. En las Figuras 3 y 4 se muestran ejemplos de almacenamiento al vacío y de residuos secos.



Figura 4.3 Almacenamiento de Residuos: a) Residuos en bolsas Ziploc – Humedad 11 %, b) Residuos de madera sellado al vacío humedad > 30%

1.1.4. Procedimiento de Molienda

El uso del molino de martillo deberá ser supervisado por uno de los miembros del CDTS además los usuarios deberán portar mascarilla caso contrario no deberá continuar con este paso.

- Una vez conectado y verificado el correcto funcionamiento de equipo se debe asegurar en la parte inferior de salida, la bolsa o saco donde se almacenará el material molido.
- Ingresar por la parte superior cargas de 200 g del material seco y cerrar la entrada con la tapa de seguridad.
- Controlar la molienda de las cargas en periodos de 10 a 15 minutos, posteriormente ingresar la siguiente carga.
- Una vez terminado el proceso apagar el equipo y desconectar la fuente de energía.

1.1.5. Manejo de la muestra molida

En la cámara del martillo siempre quedará gran parte de la muestra, por lo que posterior al proceso de molienda deberá abrirse dicha cámara y colocar la muestra molida en el interior del saco.

La manipulación del material deberá ser con mascarilla y gafas de protección hasta recuperar toda la muestra de la cámara y depositarla dentro del saco.

Finalmente, si el material fue secado adecuadamente una vez molido no requerirá de un almacenamiento exhaustivo, pero como en su mayoría será polvo debe cerrarse el saco adecuadamente.

A lo largo del proceso de molienda el equipo expulsará continuamente parte del material como polvo muy fino y volátil por lo que es obligatorio el uso de mascarilla. Las figuras 5 y 6 muestran el equipo de molienda preparado adecuadamente y su operación.

1.1.6. Procedimiento de Tamizado

El equipo de tamizado utilizado fue del Laboratorio de Operaciones Unitarias del Departamento de Ingeniería Química.

A lo largo del proceso los usuarios deberán llevar mandil y mascarilla.

- Armar el sistema de tamizado, este debe estar formado por una base más dos tamices, uno de 1 mm y otro de 2 mm, colocando en la parte superior el tamiz de mayor tamaño y en la parte inferior la base.
- Pesar en un vaso de 2000 ml una carga de 350 g del material molido.
- Depositar la carga en el tamiz superior, luego colocar la tapa y asegurar el sistema mediante los seguros dispuestos a los costados del equipo.
- Encender el equipo y programar una operación continua durante 10 min.
- Terminado un periodo de operación, aflojar los seguros, quitar tapa superior y retirar el sistema de base más dos tamices.
- Separa un tamiz a la vez y depositar el material retenido en fundas Ziploc codificadas con el tipo de residuo y tamaño de partícula, deberá tener 3 fundas por residuos con tamaños de partícula <1mm, > 2mm y entre 1 y 2 mm.

En la figura 7 se muestran ejemplo de los resultados del tamizado que debería obtener para la cáscara de mazorca de cacao, siguiendo correctamente el procedimiento.



Figura 4.4 Residuos de mazorca de cacao molida y tamizada para diferentes tamaños de partícula: a) < 1mm, b) 1 – 2 mm y c) > 2mm

1.2. Madera del árbol de Cacao (CNN-51)

1.2.1. Tratamiento y Preparación

La manipulación de este residuo depende de su estado inicial, si se trabaja justo después de su poda tendrá un mayor contenido de humedad, superior al 60 %. Siendo un residuo estructuralmente denso se prioriza su secado Directo en el secador de cono, para ello primero se debe limpiar las ramas eliminando las hojas y cualquier basura. Por otro lado, su secado puede reducirse hasta un contenido de entre 30 – 40 % si se deja secando al sol durante 2 días, temperatura promedio de 42 °C. El trozado a realizar debe ser en cilindros de 5 cm de ancho y posteriormente partidos en 4 partes iguales, las ramas deben tener un diámetro no mayor a 2,5 cm. El trozado se aplica igual tanto para la muestra húmeda como a la secada durante 2 días.

1.2.2. Observaciones

Si se deja la corteza hasta la etapa de molienda, esta formará una pelusa espesa que impedirá el tamizado correcto del material molido, por lo que es importante eliminar la corteza durante la etapa de preparación y trozado.

Procedimiento de Secado. El secado al ambiente se realiza siguiendo los mismos pasos que los aplicados a las cargas de la mazorca de cacao, además se priorizó este secado para proteger las propiedades del residuo como aglomerante natural. Una vez trozada la muestra debe secarse al ambiente con un rango de temperatura de entre 36°C hasta 42,5°C verificados por termopar, estas condiciones permitirán alcanzar sin problemas de almacenamiento una humedad final dentro del rango de 10 - 20% requerido para la formación del producto.

1.2.3. Molienda y Tamizado

Si la humedad del residuo se encuentra dentro del rango requerido su molienda no presentará problemas ni cambios y el proceso puede ser el mismo que el aplicado con la mazorca de cacao. El tamizado se hace de igual forma que el realizado para la mazorca de cacao.

1.3. Residuo de Tusa de maíz

1.3.1. Tratamiento y Preparación

Al igual que la mazorca de cacao este residuo es uno de naturaleza húmeda con un valor de humedad inicial promedio de 69 %. Por este motivo una vez recibido este debe ser separado seleccionado y puesto a secar al sol de manera inmediata para evitar pérdidas. Una particularidad de este residuo es que su troceado es más sencillo cuando se encuentra húmedo ya que una vez seco este es demasiado rígido para cortarse. Teniendo en cuenta lo anterior una vez receptado, este residuo debe trocearse en cilindros de 1.5 cm de ancho. Para las cargas al sol se recomienda dejarlas secar un par de días al ambiente y luego volver a trocear los cilindros en cuatro partes iguales.

1.3.2. Consideraciones de Secado y Estado Final

El procedimiento de secado Directo y al Ambiente de este residuo debe realizarse de la misma manera que el realizado con la mazorca de Cacao. A continuación, solo se compartirán aquellas condiciones y cambios específicos del proceso en función del uso la tusa de choclo como residuo a trabajar.

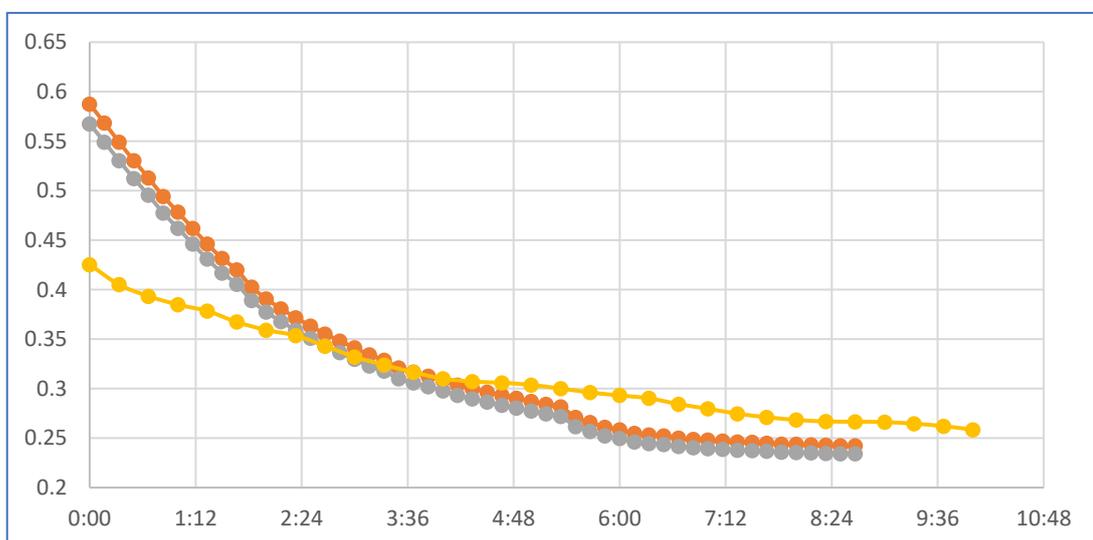


Figura 4.5 Curva de Secado de Tusa de Maíz

Pese a ser un residuo húmedo, durante su ensayo de secado se evidenció una pérdida de masa de entre 7 – 8 g cada 10 minutos, muy superior a la mazorca de cacao cuya reducción de masa fue inicialmente de 4g durante cada pesaje. Para una humedad de <15% este residuo no se ve afectado por hongos de ningún tipo por lo que su almacenamiento no requirió de sellado al vacío.

1.3.3. Observaciones

La gráfica de curva de secado muestra dos curvas de color naranja y gris que corresponde al secado Directo por secador de Bandejas y una curva amarilla que corresponde al secado al Ambiente. Cabe destacar que, si bien esta curva de secado responde al residuo trozado en 4 pedazos, por lo que su humedad inicial parte de un valor menor a los 69 %. Recuerde que hay un periodo de tiempo de 3 días si se elige la opción de trozado en 4 pedazos iguales. Es importante que alcanzado el tiempo de 6 a 7 horas se verifique con termobalanza la humedad de las cargas puestas a secar. Esto último es debido a que conforme se seca la tusa se hace rígida y se recoge por lo que la humedad restante se pierde fácilmente y es muy probable ya haber alcanzado la humedad del 11 %.

También es importante recalcar que el secado al ambiente si bien obtiene el mismo resultado suele tardar en función de las condiciones ambientales, el valor de 11 % se alcanza en un promedio de 7 días mediante este secado.

1.3.4. Manejo de la Muestra seca

Siendo un residuo húmedo si se desea su almacenamiento este basta con fundas Ziploc siempre que su humedad sea inferior al 15 %, entre el 15 y 20 % la muestra correrá riesgo de presentar hongo o indicios del mismo. Las muestras con humedad superior al 20 % deberán almacenarse por sellado al vacío.

1.3.5. Molienda y Tamizado

Si la humedad del residuo se redujo correctamente hasta un 10 u 11 %, no se tendrá problemas en su molienda y el proceso a seguir será igual que el aplicado con la mazorca de cacao. El proceso de tamizado tampoco requiere de ningún cambio o prevención distinto.

En la figura 4.8 se muestran el resultado del tamizado que se debería obtener para las tusas de maíz.



Figura 4.6 Residuos de Tusa de maíz molida y tamizada para diferentes tamaños de partícula: a) < 1mm, b) 1 – 2 mm y c) > 2mm

1.4. Residuo de la cascarilla de arroz

Puesto que este residuo es producto del secado inicial del arroz se caracteriza por ser seco, su humedad promedio verificada por termobalanza es de 11 %. Este criterio sumado al reducido tamaño de la cascarilla nos permite eliminar sus etapas de selección, trozado y secado.

1.4.1. Procedimiento de Molienda

Este simplemente consistirá en hacer uso de un molino manual, es necesario que el usuario porte mascarilla y disponga de un saco donde depositar el material una vez molido. Al encontrarse seco terminada su molienda este residuo no requiere de ningún almacenamiento específico.

1.4.2. Proceso de Tamizado

El procedimiento a seguir debe ser el mismo que el aplicado para la mazorca de Cacao. En la Figura 9 se muestran los resultados del tamizado de este residuo.



Figura 4.7 Residuos de Tusa de maíz molida y tamizada para diferentes tamaños de partícula: a) < 1mm, b) 1 – 2 mm y c) > 2mm

