

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad Ciencias Naturales y Matemáticas

Procesamiento de mezclas con lignocelulosa mediante la generación de pellets para su posterior uso como biocombustible sólido

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero Químico

Presentado por:

Verónica Priscilla Illescas Morante

Francisco David Valencia Ospina

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2022

DEDICATORIA

Dedico esta tesis a mi abuela, Carmen Fabiola, por siempre tener la fe puesta en mi para la realización de mis proyectos, siempre apoyándome todo en medida de sus capacidades.

A Jefferson Joao, por siempre ser luz y voluntad para seguir hacia adelante, y enseñarme que no hay trabajo que no dignifique.

Y a Verónica Priscilla, por ser la motivación día tras día para realizar este trabajo, y no desfallecer en la empresa propuesta.

Francisco David Valencia Ospina

DEDICATORIA

El presente proyecto es dedicado a mi familia, en especial a mi mami Luzmira, mi papi Juan Pablo y sobre todo a mi mamá María del Carmen que fueron mi apoyo incondicional e inspiración desde el día uno para lograr llegar hasta donde me encuentro el día de hoy.

A toda la familia Orellana Vélez, sobre todo a mi mejor amiga María José y sus padres, que siempre estuvieron presente para mí y fueron mi segundo hogar cuando más los he necesitado.

Y a Luis Enrique, por siempre estar presente dándome aliento para seguir y ser mi pilar para no rendirme.

Verónica Illescas Morante

AGRADECIMIENTOS

Quiero comenzar agradeciéndole a Dios, por mantenerme a salvo a mi y a mis familiares, en medio de todas las aventuras y desventuras en las que me ha acompañado.

Gracias a Catherine, Marcos, Julissa, Verónica, Alejandra, Marcela, Josua, Gerson, Emily Solange, Lissette Elvira, Tatiana, Ginger, Mi querida Rayza Stefania, Oscar, Daniela, Gabriel, Maria José, Paula, Melany, Melanie, y todas las personas que hicieron de mi vida académica más bonita.

Gracias especiales a Rosa Elina, por haber creído en mi desde un principio, y por haber puesto luz en mi corazón.

A nuestra tutora académica, PhD. Emérita Delgado, por su arduo apoyo y compromiso para con nosotros; así también agradezco al PhD. Peralta y el Ing. José Reinoso, por sus consejos y guía durante la experimentación en el laboratorio.

A la Ing. Myrian Santos, el Mgtr. Christian Macias, la Ing. María Silva, el Ing. Luis Vaca y todo el cuerpo docente que, con paciencia y compañía, colaboraron para hacer de este trabajo algo real.

A la PhD. Suanny Mosquera por su paciencia y enseñanzas durante la elaboración del proyecto.

Francisco David Valencia Ospina

AGRADECIMIENTOS

Quiero comenzar agradeciéndole a Dios, por cuidar de mí y mi familia para llegar a celebrar este momento con ellos.

A mis amigos del colegio, y mis amigos de Ohana por acompañarme todos estos años y seguir disfrutando de momentos amenos y ayudándonos siempre. A mis amigos de los primeros semestres de la U, que siempre hicieron de estos años los más divertidos.

Gracias especiales a: Luis, Haward, Henry, Ximena, Marcela, Narcisa, Julissa, Kate, Marcos y Francisco por estar en momentos de crisis, sin ellos no lo hubiera logrado.

A nuestra tutora académica, PhD. Emérita Delgado, por su arduo apoyo y compromiso para con nosotros; así también agradezco al PhD. Peralta y el Ing. José Reinoso, por sus consejos y guía durante la experimentación en el laboratorio.

A la Ing. Myrian Santos por su ayuda todos estos años como consejera académica, y por todas sus enseñanzas.

A la PhD. Suanny Mosquera por su paciencia y enseñanzas durante la elaboración del proyecto.

Y a todos los profesores que lograron dejar un cambio positivo en mí para seguir nuevos retos.

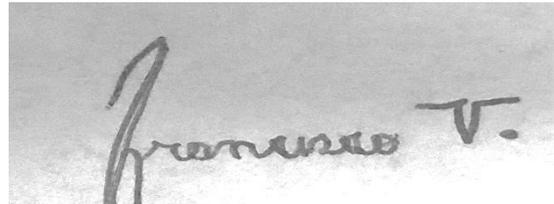
Verónica Illescas Morante

DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Verónica Priscilla Illescas Morante* y *Francisco David Valencia Ospina* 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”



Verónica Illescas
Morante



Francisco Valencia
Ospina

EVALUADORES



PhD. Suanny Mosquera
PROFESOR DE LA MATERIA

PhD. Emérita Delgado
PROFESOR TUTOR

RESUMEN

El proyecto busca aprovechar los residuos de poda generados dentro del campus Gustavo Galindo de ESPOL, para uso de bioenergía siendo una alternativa a los combustibles fósiles empleados tradicionalmente en la industria. Para ello se aplicaron varios procesos productivos para la elaboración de las muestras de biocombustible sólido en forma de pellets a partir del uso de especies forestales *Azadirachta indica* (árbol Neem) y *Handroanthus Chrysanthus* (árbol Amarillo) por ser las especies de mayor abundancia en el área de estudio. El proyecto inicia realizando una revisión bibliográfica de las especies, y su posterior recolección. Las muestras se sometieron a: un proceso de troceado manual, secado utilizando un secador de túnel vertical, triturado usando un molino de martillo y el proceso de tamizado permitiendo homogenizar las muestras secas. Finalmente, se realizaron cinco mezclas binarias a partir de la variación porcentual en masa y se procesaron en la máquina peletizadora. Se realizaron análisis al producto obtenido de poder calorífico siguiendo la metodología de prueba de incinerado y se obtuvo que la mezcla con proporciones de 20 % de amarillo y 80 % de Neem, obteniendo un valor de poder calorífico de 16754 kJ/kg, con un contenido de humedad 10.70 %. Referentes a las dimensiones de los pellets obtenidos de las muestras, todas se obtuvieron respecto a los estándares de la norma ISO 17225-2:2014, con parámetros físicos tales como longitud de 25.45 mm y diámetro de 7.82 mm.

Palabras Clave: pellets, biocombustible sólido, poder calorífico, residuos forestales.

ABSTRACT

*The purpose of this project is to help reduce the waste generated from pruning and gardening at the Gustavo Galindo campus of ESPOL and to seek an alternative to the fossil fuels traditionally used in the industry. The focus of the project was directed towards the production of solid biofuel in the form of pellets through the treatment of residues from the forest species *Azadirachta indica* (Neem tree) and *Handroanthus Chrysanthus* (Yellow tree) because they are the most abundant species in the study area. The proposal was based on a bibliographic review to obtain the species and their subsequent collection. The samples were then subjected to a manual chopping and drying process using a vertical tunnel dryer to be fed to a hammer mill and with the help of a sieving process the dry samples were homogenized. Subsequently, five binary mixtures were made from the percentage variation in mass and processed in the pelletizing machine. The obtained product was analyzed for calorific value following the incineration test methodology and it was obtained that the mixture with proportions of 20 % yellow and 80 % Neem has the highest calorific value with (16754 kJ/kg), with a moisture content of 10.70 %. Referring to the dimensions of the pellets obtained from the samples, all were obtained with respect to ISO 17225-2:2014 standards, with physical parameters such as length 25.45 mm and diameter 7.82 mm.*

Keywords: pellets, solid biofuel, calorific value, forest residues.

INDICE GENERAL

RESUMEN	8
ABSTRACT	9
INDICE GENERAL	10
ABREVIATURAS	13
SIMBOLOGÍA	14
ÍNDICE DE FIGURAS.....	15
ÍNDICE DE TABLAS.....	16
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	17
CAPÍTULO 1	18
1 Introducción.....	18
1.1 Descripción del problema	18
1.2 Justificación del problema	19
1.3 Objetivos	20
1.3.1 Objetivo General	20
1.3.2 Objetivos Específicos.....	20
1.4 Marco teórico.....	20
1.4.1 Biomasa.....	20
1.4.1.1 Diferentes tipos de biomasa	20
1.4.2 Biocombustibles.....	21
1.4.2.1 Clasificación de los biocombustibles.....	21
1.4.3 Áreas Forestales	21
1.4.3.1 Árbol Neem	21
1.4.3.2 Árbol Cedro	22
1.4.3.3 Árbol Amarillo	22
1.4.3.4 Árbol Acacia	22
1.4.4 Pellets.....	23
1.4.4.1 Antecedentes	23
1.4.4.2 Concepto de pellets de madera	23
1.4.4.3 Propiedades químicas del pellet	23
1.4.4.4 Parámetros para pellets de lignocelulosa	24

1.4.5	Proceso de peletizado	24
CAPÍTULO 2	25
2	Metodología.....	25
2.1	Diseño de investigación	25
2.2	Selección de especies.....	25
2.3	Recolección de residuos de lignocelulosa.....	26
2.4	Determinación del contenido de humedad de los residuos de lignocelulosa	27
2.5	Proceso de secado de residuos de lignocelulosa	27
2.6	Molienda de la muestra lignocelulosa seca	28
2.7	Proceso de tamizado de muestra lignocelulosa molida	29
2.8	Mezcla de muestras de ambas especies.....	30
2.9	Proceso de peletizado.....	31
2.10	Análisis de propiedades físicas del pellet.....	32
2.10.1	Ensayo de Longitud y Diámetro	32
2.11	Análisis de propiedades químicas del pellet.....	32
2.11.1	Ensayo de Contenido de Humedad.....	32
2.11.2	Ensayo de Contenido de Cenizas	33
2.11.3	Ensayo de Poder Calorífico	34
CAPÍTULO 3	36
3	Análisis de Resultados y Análisis.....	36
3.1	Determinación de contenido de humedad.....	36
3.2	Determinación de peso de muestras en el proceso de secado	37
3.3	Determinación de la curva de secado de cada especie	38
3.4	Determinación de peso de muestras después de la molienda	39
3.5	Peso final después del tamizado.....	40
3.6	Análisis de los pellets	41
3.6.1	Contenido de ceniza.....	41
3.6.2	Contenido de humedad	43
3.6.3	Resultado de PC	45
3.6.4	Dimensiones de pellets	46
3.7	Análisis económico de producción	47
CAPÍTULO 4	50
4	Conclusiones y recomendaciones.....	50

4.1	Conclusiones	50
4.2	Recomendaciones	51
5	Bibliografía y referencias	52

ABREVIATURAS

ESPOL Escuela Superior Politécnica del Litoral

ISO International Organization for Standardization

ENPLUS European Pellet Council

SIMBOLOGÍA

kJ	Kilojoules
kg	Kilogramos
mg	Miligramos
g	Gramos
°C	Grados Celsius
mm	Milímetros
ws	Wet solid (sólido húmedo)
L	Litros

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Pasos en la recolección de residuos lignocelulosos.....	27
Figura 2.2 Muestras durante el proceso de secado y su almacenamiento	28
Figura 2.3 Recolección de muestra a la salida del molino.....	29
Figura 2.4 Muestras separadas por granulometría	30
Figura 2.5 Apreciación visual de las proporciones de cada muestra.....	31
Figura 2.6 Empleo del calibrador de Vernier para toma de dimensiones de los pellets.....	32
Figura 2.7 Medición del porcentaje de humedad de los pellets	33
Figura 2.8 Muestras en mufla para medición del contenido de cenizas de los pellets.....	34
Figure 2.9 Ecuación para el cálculo del contenido de cenizas.....	34
Figura 2.10 Ensayo Poder Calorífico en el laboratorio de Hidrocarburos	35

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Especificaciones de pellets de biomasa residual forestal clase A1.....	24
Tabla 2.1 Breve descripción de especies disponibles en área de estudio	25
Tabla 2.2 Cantidad de especies seleccionadas en el área de estudio	26
Tabla 2.3 Concentraciones de las especies seleccionadas en cada muestra	30
Tabla 2.4 Condiciones de operación de la máquina peletizadora	31
Tabla 3.1 Masa de las especies antes y después del proceso de secado	37
Tabla 3.2 Información de las muestras antes y después del proceso de molienda	40
Tabla 3.3 Porcentajes de contenido de humedad de los pellets elaborados.....	44
Tabla 3.4 Dimensiones promedio de los pellets elaborados.....	46
Tabla 3.5 Descripción de costos de equipos y materiales para la producción.....	48

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfica 3.1 Humedad inicial y final de la materia residual forestal.....	36
Gráfica 3.2 Humedad vs. tiempo (Azadirachta Indica)	38
Gráfica 3.3 Humedad vs. tiempo (Handroanthus Chrysanthus).....	39
Gráfica 3.4 Peso final por tamaño de partícula después del tamizado	40
Gráfica 3.5 Porcentajes de contenido de cenizas de las muestras de pellets	42
Gráfica 3.6 Poder Calorífico en kJ/kg de los pellets elaborados.....	45

CAPÍTULO 1

1 Introducción

1.1 Descripción del problema

El manejo de residuos de poda y manejo de jardín en el campus Gustavo Galindo de la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL) es una actividad que involucra la acumulación progresiva de alta cantidad de biomasa vegetal. Estos residuos se generan al intentar contener posibles plagas de termitas que puedan esparcirse a través de toda la vegetación, que pueden generar desgaste en la estructura y terminar en grandes ramas o troncos caídos ocasionando posibles daños para los colaboradores que circulen por el campus. Adicionalmente, los residuos se generan al intentar mantener un sentido estético del panorama por lo que ciertos árboles son podados cada cierto período de tiempo. El tratamiento final al que se han destinado estos desechos generados involucra la quema de estos por parte de los colaboradores del campus. Hasta el momento, han existido diferentes propuestas para dotar de valor agregado a los residuos madereros de los principales árboles existentes, tales como el árbol Neem y el árbol Amarillo, progresando como temas de investigación a fin de establecer mejoras en la sostenibilidad de los recursos en la institución.

Se ha constatado que el mal aprovechamiento de los residuos de poda y residuos madereros tiene asociaciones negativas con la proliferación de plagas de diversos parásitos, así como el tratamiento de quema de residuos por el impacto ambiental que ello conlleva, en consonancia de la preocupación colectiva por el impacto del dióxido de carbono en la atmósfera. El tratamiento de los residuos madereros que se generan a partir del expansionismo del suelo empleado para desarrollo humano o propósitos académicos e industriales debe ser tomar en cuenta en pos de una mejor cultura ambiental en el campus. Ahondar esta problemática permitirá explorar los beneficios que involucra un mejor tratamiento de los desechos, así como la posibilidad de brindar un valor agregado a dichos residuos.

1.2 Justificación del problema

A lo largo del tiempo, el uso de combustibles fósiles, más allá de ser una herramienta útil, ha demostrado a la vez, ser una importante fuente de contaminación por los residuos generados durante la combustión en gran cantidad en diversas industrias (Wuebbles & Jain, 2001). El crecimiento exponencial de los gases de efecto invernadero significa un daño directo a la población de todo lugar que se halle expuesto así también para su entorno, por lo que, buscar vías alternas al uso de los combustibles tradicionales se ha vuelto de carácter obligatorio en los últimos años (New York State Energy Research and Development Authority, 1997).

Por otra parte, se cuenta con otra actividad humana que atenta contra la salud del ecosistema, la cual es la tala indiscriminada de árboles (Emmanuel & Ekiti, 2017). Esto ocurre en su mayor parte por la expansión de zonas comerciales o urbanas, pero existen otras razones, como en el caso del Campus Gustavo Galindo, que la poda de sus árboles se relaciona directamente con mantener una estructura saludable de los bosques al disminuir el riesgo de contaminación por colonias de hormigas blancas, entre otros parásitos. A pesar de que este proceso se realiza en pro de un bien mejor, los residuos que se producen siguen contribuyendo a un nuevo tipo de problema, donde existen residuos de materia lignocelulosa en el bosque protector y áreas del campus transitadas que se van acumulando para lo cual, actualmente, se implementa la quema del material lo cual continúa con la contaminación al ambiente que se intenta reducir urgentemente.

Para esto, emplear la biomasa forestal de los diversos tipos de árboles en un proceso de elaboración de pellets permite evitar la contribución de gases de efecto invernadero a la atmósfera, adicionalmente, dependiendo del poder calorífico según la especie de árbol, los pellets se pueden emplear en la generación una alternativa amigable con el ambiente a los combustibles fósiles tradicionales, pasando de ser un residuo sin mayor provecho a un producto con un valor agregado que aporte positivamente a la conservación de un ambiente seguro para toda la población (Zawiślak et al., 2020a).

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Identificar la composición porcentual ideal de una mezcla de residuos madereros mediante el análisis del poder calorífico para el aprovechamiento de los desechos de poda.

1.3.2 Objetivos Específicos

Elaborar pellets con biomasa residual forestal según el cumplimiento de las normativas internacionales existentes.

Establecer la metodología para el tratamiento de los residuos maderables y el procesamiento de la biomasa.

Comparar los valores obtenidos de poder calorífico con los expuestos en la literatura consultada para la correlación entre los datos.

1.4 Marco teórico

1.4.1 Biomasa

Consiste en materia solar contenida a partir de residuos tanto vegetales como animales, mismos que pueden posteriormente emplearse como materia prima para la elaboración de biocombustibles y compostaje (Brasil et al., 2015).

1.4.1.1 Diferentes tipos de biomasa

La biomasa puede verse concebida a partir de sus diferentes orígenes, sean vegetales o animales, así como su estado de agregación, sea este líquido, sólido o gaseoso.

De forma general, el origen de la biomasa sea este vegetal o animal, viene determinado tanto por actividades agroindustriales, podas y manejos de jardinería, como por actividad natural residual, como ocurre con los desperdicios biológicos (Kayo et al., 2013).

1.4.2 Biocombustibles

Son sustancias sintetizadas a partir del tratamiento físicos y químicos de biomasa obtenida de forma vegetal o animal, la cual posteriormente es adaptada para aprovechar su contenido energético como alternativa a los combustibles fósiles tradicionales.

1.4.2.1 Clasificación de los biocombustibles

Según su estado de agregación, sea sólido, líquido o gaseoso, los biocombustibles pueden ser clasificados para una mejor organización entre sus tipos.

Dentro de los biocombustibles sólidos, se encuentran los pellets y las briquetas, las cuales son obtenidas a partir de biomasa sólida tales como trozos de astillas y podas, así como material de compostaje. Los biocombustibles líquidos surgen a partir de procesos químicos tales como la fermentación de desperdicios biológicos ricos en carbohidratos, los cuales posteriormente darán paso a alcoholes con elevado poder calorífico. De forma similar, el gas de síntesis surge a partir de la degradación de material basado en biomasa, los cuales se desprenden en altas cantidades dentro de cámaras cerradas.

1.4.3 Áreas Forestales

1.4.3.1 Árbol Neem

El árbol de Neem, lila india o también conocido por su nombre botánico como *Azadirachta indica*, es una especie que se desarrolla en el sur del continente asiático, nativo de India. Pertenece a la familia *Meliaceae* correspondiente a la caoba y se desarrolla en climas tropicales con alturas cercanas al nivel del mar. Su aspecto consiste en hojas que no perecen y poseen un gran ancho. El tronco de esta especie tiene una corteza con surcos y grosor considerable; el mismo puede alcanzar hasta los 30 metros de altura. El árbol de Neem es resistente a la poda constante tanto en su parte superior e inferior gracias a la distribución de raíces que posee (Neem, 1992).

1.4.3.2 *Árbol Cedro*

Los Cedros, también conocidos en latín como arbor vitae o Cedrela Odorata, son árboles pertenecientes a la familia Cupressaceae que se caracterizan por la forma conífera de sus brotes en los primeros años de crecimiento. Se conocen seis especies según la zona donde se desarrollan: América del Norte o el este del continente asiático. El cedro rojo, especie que crece en altas zonas rocosas del continente americano, puede alcanzar una altura de hasta 60 metros y su tronco, una anchura de hasta tres metros el cual también posee surcos profundos o grietas marcadas junto con un aroma característico. El árbol Cedro resiste la poda de sus ramas más altas para continuar con la distribución de manera más centrada de los nutrientes al tronco de este, sin embargo, la poda en el área superior es delicada por el lento proceso de crecimiento de la especie cónica (Torii et al., 2022).

1.4.3.3 *Árbol Amarillo*

El árbol amarillo, guayacán o Handroanthus Chrysanthus como nombre botánico, es una especie que se caracteriza por sus brotes en forma de campana larga de coloración amarilla neón que ocurre durante la primavera. Este árbol pertenece a la familia de los Bignoniaceae y se desenvuelve en zonas forestales con suelos húmedos y clima tropical con alturas inferiores a los 800 metros sobre el nivel del mar. El tronco de este árbol posee una corteza de coloración gris con tonos amarillos con grietas prominentes, logra alcanzar alturas de hasta 20 metros y una anchura de medio metro. La madera proveniente de esta especie se denomina madera lpe. Esta madera es de un color marrón profundo, de gran peso, resistente y de larga duración por lo que se emplea para la elaboración de mangos de diversas herramientas de construcción (Medina Arroyo et al., 2020).

1.4.3.4 *Árbol Acacia*

El árbol Acacia, o Delonix Regia, pertenece a la familia Fabaceae y puede desarrollarse en climas secos y áridos como es su nativo Australia o sur de África, con alturas cercanas al nivel del mar. Sus frutos varían según la especie, pero siempre presentan flores de pétalos escasos de ligera coloración amarillo blanquinoso pero abundantes estambres. El tronco del árbol acacia alcanza hasta

15 metros de altura con una corteza grisácea o marrón oscuro de exuberantes surcos. La madera que se obtiene de este mástil tiene coloración de la paleta naranja y posee una gran resistencia y larga durabilidad siendo empleada para la elaboración mueblería y cubiertas de pisos (New, 1984).

1.4.4 Pellets

1.4.4.1 Antecedentes

La producción y elaboración de pellets tiene alrededor de un siglo en la industria empleando diversas fuentes de materia prima. A partir de los años 70, ciertas compañías que empleaban prensas peletizadoras para la elaboración de comida animal fueron pioneras en introducir los residuos madereros al proceso como alternativa al combustible fósil que se empleaba comúnmente. Aunque para su época no tuvo gran acogida, a partir de los años 2000 la búsqueda por nuevas fuentes de energía ecológica y el incremento del precio del petróleo beneficio el proceso de peletización de la materia orgánica como la lignocelulosa (García et al., 2019).

1.4.4.2 Concepto de pellets de madera

Los pellets, o gránulos, de materia maderera residual son piezas de forma cilíndrica con la finalidad de emplearse como biocombustible sólido. Cuenta con dimensiones de aproximadamente hasta 2.00 cm de largo y un ancho de diámetro que fluctúa entre 0.50 a 1.00 cm que se obtienen a partir de la compresión de los residuos finamente molidos (Kayo et al., 2013).

1.4.4.3 Propiedades químicas del pellet

Las propiedades químicas del gránulo de biomasa tienen una dependencia directa a la materia prima empleada para su elaboración. Una de las propiedades químicas es la densidad aparente. La densidad aparente o volumétrica es importante puesto que el combustible se alimenta por volumen y cualquier posible variación en esta propiedad puede disminuir la eficiencia del combustible sólido; además de esta favorece la transportación del producto y disminuye el espacio de almacenamiento que se ocupa (García et al., 2019).

Otra propiedad es el porcentaje de cenizas es la propiedad que indica el contenido no reaccionante posterior a la combustión del producto; cuando se tiene una menor ceniza es un indicativo de un proceso de combustión eficiente y limpio (García et al., 2019).

Adicionalmente, se tiene el poder calorífico, propiedad que representa la energía disponible de los biocombustibles a partir de la cual se logra determinar su utilidad en la industria y se puede expresar en unidades de kJ/kg (Lett & Ruppel, 2004).

1.4.4.4 Parámetros para pellets de lignocelulosa

A continuación, se adjuntan las especificaciones que debe cumplir un pellet proveniente de biomasa de madera residual sin tratamiento químico previo según la normativa ISO 17225-2:2014: Biocombustibles sólidos.

Tabla 1.1 Especificaciones de pellets de biomasa residual forestal clase A1

Propiedad	Unidad	Valor
Diámetro	mm	Entre 6.60 a 8.80
Longitud	mm	Entre 3.15 a 40.00
Contenido de humedad	%	Inferior a 10.00
Cenizas	%	Inferior a 1.20
Poder calorífico neto	[kJ/kg]	Mayor a 16.50

Fuente: (Whittaker & Shield, 2017)

1.4.5 Proceso de peletizado

Se entiende por peletizado al proceso en el que, muchas partículas de un material se agrupan en condiciones de temperatura y presión adecuadas, permitiendo la formación de estructuras más estables, adaptadas en formas de pellets de una mayor densidad (Stelte et al., 2012).

De forma práctica, el uso de peletizado a partir de materiales con origen en biomasa, se hace factible a razón de emplearse en su mayoría residuos obtenidos a partir de procesos agroindustriales y de residuos orgánicos generados por procesos biológicos.

CAPÍTULO 2

2 Metodología

El método de investigación empleado es el hipotético-deductivo donde se plantea una suposición refutable o falseable, en este caso: “El procesamiento de los residuos madereros con alto contenido en lignocelulosa producidos en el campus Gustavo Galindo de la Escuela Superior Politécnica del Litoral servirá para la producción de biocombustible sólido peletizado”, para posteriormente ser comprobada por medio de datos obtenidos de la correspondiente experimentación y poder así determinar si la hipótesis establecida tiene validez.

2.1 Diseño de investigación

El diseño empleado para la investigación para el trabajo de titulación entra en el tipo experimental por la manipulación de variables independientes para ver su efecto en el comportamiento de otras variables del experimento realizado. Se evidenciará el cambio en valores de propiedades químicas de pellets de material maderero a partir de la elaboración de estos con ensayos de diferentes valores de composición entre dos especies diferentes.

2.2 Selección de especies

Se estudiaron cuatro especies que se hayan presente en las instalaciones del campus Gustavo Galindo para tener una población razonable y analizar la disponibilidad de recolección de muestras.

Tabla 2.1 Breve descripción de especies disponibles en área de estudio

Nombre común de especie	Nombre botánico	Familia
Árbol Cedro	<i>Cedrela Odorata</i>	Cupressaceae
Árbol Amarillo	<i>Handroanthus Chrysanthus</i>	Bignoniaceae
Árbol Neem	<i>Azadirachta Indica</i>	<i>Meliaceae</i>
Árbol Acacia Roja	<i>Delonix Regia</i>	<i>Fabaceae</i>

Fuente: (Castillo & Alvarado Llerena, 2019)

A partir de esto, las especies seleccionadas para los cinco ensayos de composiciones porcentuales másicas variadas fueron escogidas a partir de la disponibilidad de datos registrados en el estudio de distribución de especies del sendero “Mirador” que cuenta con un área de 21,764 m². Adicionalmente, se empleó el área total del campus Gustavo Galindo de 711 hectáreas para hacer la relación de especies totales, de donde se obtuvieron las cantidades estimadas de las siguientes especies:

Tabla 2.2 Cantidad de especies seleccionadas en el área de estudio

Nombre de especie	Origen	Unidades estimadas
Árbol Neem	Especie introducida	15,028
Árbol Amarillo	Especie nativa	9,801

Fuente: (Murillo, 2018)

2.3 Recolección de residuos de lignocelulosa

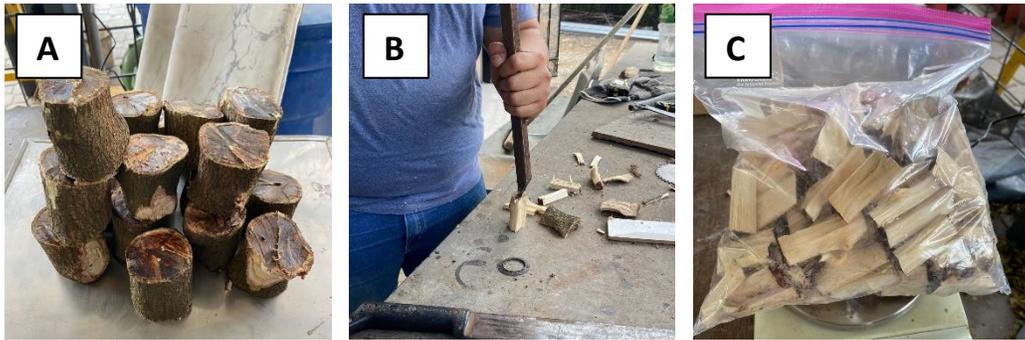
La materia prima recolectada para la elaboración del prototipo propuesto en el trabajo de titulación debería provenir de las talas planificadas por los jardineros de la institución, pero para evitar la dependencia de terceros se procedió a talar un par de ramas de cada especie, Neem y Amarillo. Posteriormente, se realizaron los siguientes pasos:

A) Cortes de la rama en tacos de una longitud de 5.00 cm con la ayuda de una sierra eléctrica circular (marca DeWalt) de tal forma que se tenga una muestra de aproximadamente 3.00 kg con corteza

B) Astillado en partes iguales y más pequeñas removiendo la corteza de cada taco, lo cual genera una mayor área de contacto que beneficia el proceso de secado de la muestra. En este paso la muestra se reduce aproximadamente hasta llegar a los 2.00 kg.

C) Almacenar en fundas marca Ziploc cerradas cuidadosamente para evitar generación de moho en la muestra por la presencia de humedad existente en cada especie.

Figura 2.1 Pasos en la recolección de residuos lignocelulosos



Fuente: Elaboración propia

2.4 Determinación del contenido de humedad de los residuos de lignocelulosa

El análisis de contenido de humedad para la materia prima se realizó previo al tratamiento de secado con la finalidad de tener una referencia inicial del valor de dicha propiedad.

Para el análisis se seleccionó una astilla al azar almacenada dentro de la muestra, se procede a medir el peso siendo inferior a 1.00 g, y además se mide la humedad con ayuda de una termobalanza (marca KERN). El mismo proceso se realiza para cada muestra tratada, de los residuos de la especie *Azadirachta* y *Handroanthus Chrysanthus*.

2.5 Proceso de secado de residuos de lignocelulosa

El secado se realizó en un secador de túnel vertical a una temperatura máxima establecida por el equipo de 52.00 °C para lograr remover la humedad de la materia prima hasta lograr obtener un porcentaje inferior al 18.00 % y superior al 5.00 % (Jewiarz et al., 2020). Las muestras de ambas especies fueron ingresadas en el interior del lecho en capas iguales para que sea posible asegurar que el aire caliente fluyera de forma homogénea por las astillas.

El equipo puede registrar mediante sensores de humedad y temperatura, que permite el registro de datos cada diez minutos. Aquellos datos fueron empleados para la elaboración de la curva de secado de la muestra Humedad (kg agua / kg ds) vs. tiempo (h) para cada especie.

Figura 2.2 Muestras durante el proceso de secado y su almacenamiento



Fuente: Elaboración propia

2.6 Molienda de la muestra lignocelulosa seca

La materia prima astillada y seca de las especies antes indicada, se procedió a molerla con un molino de martillo para disminuir el tamaño de las astillas de madera hasta obtener un material particulado de un par de milímetros de tamaño, con la finalidad que mediante la peletizadora se facilite el proceso y no se atasque en el plato del equipo.

Se introdujeron aproximadamente 15 a 20 astillas cada 10.00 minutos en el molino para evitar atascamientos con las barras de acero que molían. Es necesario indicar que se colocó una funda plástica ajustada a la salida del molino para la recolección de la materia molida que salía en distinta granulometría.

Figura 2.3 Recolección de muestra a la salida del molino



Fuente: Elaboración propia

Una vez reduciendo el material su tamaño, se procede a almacenar en fundas plásticas con cierre y se coloca en la balanza digital (marca CAS) para controlar las pérdidas durante el proceso por el material polvoroso que se suelta del recolector del equipo.

2.7 Proceso de tamizado de muestra lignocelulosa molida

La materia prima pulverizada y rotulada con su correspondiente peso se procede a colocar en el tamiz (marca Tyler modelo RX-812) para la obtención de partículas de granulometría homogénea que facilite la elaboración del pellet final. Se empleó el tamiz con dos luces de malla, uno de 2.00 mm y otro de 1.00 mm, para retener el material en tres grupos con diferente tamaño de gránulos (Jewiarz et al., 2020). Se realizaron aproximadamente cinco corridas de diez minutos cada una con una cantidad de muestra de alrededor de 250.00 g en el tamiz; esto se realizó para ambas especies.

Figura 2.4 Muestras separadas por granulometría



Fuente: Elaboración propia

2.8 Mezcla de muestras de ambas especies

Una vez tamizadas las muestras particuladas, se procede a realizar el mezclado de estas. Para ello, se pesan cantidades asociadas a las proporciones seleccionadas para la composición de los lotes especificadas en la tabla 2.3, donde el compuesto H corresponde a la especie *Handroanthus Chrysanthus* y la especie N, a la especie *Azadirachta Indica*.

Tabla 2.3 Concentraciones de las especies seleccionadas en cada muestra

Rótulo de muestras	Concentración
A	20 % de N y 80 % de H
B	40 % de N y 60 % de H
C	60 % de N y 40 % de H
D	80 % de N y 20 % de H
E	50 % de N y 50 % de H

Fuente: Elaboración propia

Se preparó una muestra de 300g para cada lote empleando la balanza digital marca CAS de un decimal.

Figura 2.5 *Apreciación visual de las proporciones de cada muestra*



Fuente: Elaboración propia

Una vez cuantificadas las cantidades necesarias, se mezclan los componentes a fin de generar los lotes bien diferenciados, mismos que serán posteriormente empleados en el peletizado.

2.9 Proceso de peletizado

Se colocaron de forma progresiva las muestras de 300.00 g en el plato calentado de la máquina peletizadora, a fin de que las muelas del equipo tengan suficiente tiempo para moler la masa compactándose por la fuerza de compresión entre las muelas y el plato. El proceso se repite múltiples ocasiones, hasta obtener una contextura de pellets deseada (tabla 2.4)

Table 2.4 Condiciones de operación de la máquina peletizadora

Parámetro	Valor
Temperatura máx (°C)	90.00
Capacidad máx. (kg)	5.00
Tamaño de partícula (mm)	< 3.00

Fuente: (Mero Constantine et al., 2017)

2.10 Análisis de propiedades físicas del pellet

La caracterización de las propiedades físicas de los pellets obtenidos se rigió por los valores estándares de la norma ISO 17225-2:2014: Biocombustibles sólidos obtenidos a partir de biomasa residual forestal.

2.10.1 Ensayo de Longitud y Diámetro

Los pellets obtenidos de cada lote de diferentes composiciones fueron medidos empleando el calibrador de vernier para conocer el valor de su diámetro y longitud en unidades de milímetros con la finalidad que el producto obtenido de la máquina se mantenga dentro del margen estándar.

Figura 2.6 Empleo del calibrador de Vernier para toma de dimensiones de los pellets



Fuente: Elaboración propia

2.11 Análisis de propiedades químicas del pellet

La caracterización de las propiedades químicas de los pellets obtenidos se basó en la verificación de sus valores dentro del margen de la misma normativa de las propiedades físicas.

Algún análisis se elaboró según las normas internacionales de determinación correspondiente y otros fueron avalados por los laboratorios de hidrocarburos de la Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas de servicios prestados externo con experiencia y certificación en ensayos químicos, ESPOL.

2.11.1 Ensayo de Contenido de Humedad

Se procede a seleccionar dos pellets por cada lote de los cuales se emplearon pequeñas muestras que no pasen 1.00 g para realizar el análisis de humedad; se

utiliza un platillo de aluminio para la muestra y se procede a colocarlo en la termobalanza (marca KERN) hasta que registre el resultante en unidades de porcentaje (%). (Figura 2.7)

Figura 2.7 Medición del porcentaje de humedad de los pellets



Fuente: Elaboración propia

2.11.2 Ensayo de Contenido de Cenizas

Para el ensayo de contenido de cenizas de las muestras se utilizó el protocolo estandarizado en la norma ISO 18122. Se tomaron muestras de 5.00 g por cada lote de diferente composición esparciendo en una capa uniforme en la cápsula. Se colocó la cápsula con la muestra dentro de la mufla de capacidad 14.00 L y un rango de operación de 975.00 a 1093.00 °C (marca Thermo Scientific), aumentando la temperatura uniformemente hasta alcanzar los 250.00 °C durante un período de tiempo de 30 a 50 minutos; una vez alcanzada esta temperatura mantenerla durante un período de tiempo de una hora para que los compuestos volátiles salgan de la muestra. (International Organization for Standardization, 2015). Se registró el peso inicial de cada crisol empleado y el peso final de cada crisol con restos de cenizas para el cálculo del contenido con la ecuación de la figura 2.9

Figura 2.8 Muestras en mufla para medición del contenido de cenizas de los pellets



Fuente: Elaboración propia

Figure 2.9 Ecuación para el cálculo del contenido de cenizas

$$\% \text{ Cenizas} = \frac{(m_{\text{crisol}} + m_{\text{cenizas}}) - m_{\text{crisol}}}{m_{\text{muestra inicial}}} * 100$$

Fuente: (International Organization for Standardization, 2015)

2.11.3 Ensayo de Poder Calorífico

Empleando el método de prueba de incinerado. Las muestras de los diferentes lotes fueron incineradas dentro del calorímetro (marca IKA modelo C200), con rango de medición máximo de 40000 J/g y temperatura ambiente permisible entre 20.00 a 25.00 °C.

Cada muestra fue colocada en el crisol de cuarzo de aproximadamente de 500.00 mg, el dispositivo se llena con agua a una temperatura de 10.00 a 15.00 °C; el tiempo de espera de la prueba redondea los 20 minutos. El resultado obtenido será un valor expresado en unidades de J/g (Brasil et al., 2015)

Figura 2.10 Ensayo Poder Calorífico en el laboratorio de Hidrocarburos



Fuente: Elaboración propia

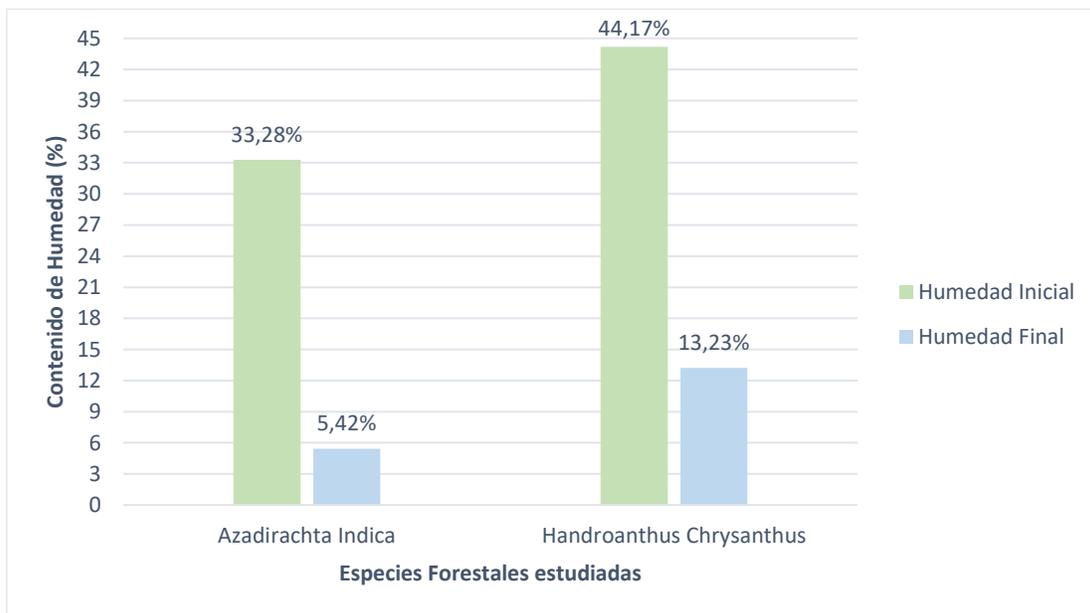
CAPÍTULO 3

3 Análisis de Resultados y Análisis

3.1 Determinación de contenido de humedad

En el siguiente gráfico 3.1 se expone la comparación entre la humedad inicial del material residual lignocelulosa sometido a procesos físicos para reducción de tamaño de partícula en relación de la materia prima final pasado el proceso de secado. Se puede apreciar que la muestra de Azadirachta Indica, o árbol Neem, tuvo una disminución de 27.86 % de su contenido de humedad al ser sometido a un período de 580 minutos (9 horas) en el secador de túnel vertical. Por otra parte, la muestra de Handroanthus Chrysanthus, o árbol amarillo, disminuyó en un 30.94 % al ser sometido durante un período de tiempo de secado igual a 270 minutos (4.50 horas).

Gráfica 3.1 Humedad inicial y final de la materia residual forestal



Fuente: Elaboración propia

Las muestras de las especies forestales se sometieron a diferentes periodos de tiempo en el secador para lograr que, en el caso de la Azadirachta Indica, alcanzar el poder calorífico registrado inicialmente de la especie y no sea afectado negativamente por un elevado contenido de humedad, por lo que se llevó la muestra a un valor cercano al límite inferior sugerido de humedad (5.00 %).

Por otra parte, en el caso del *Handroanthus Chrysanthus*, se decidió conservar esta muestra con un mayor contenido de humedad, por motivo que desde el proceso de astillado se identificó que la especie poseía mayor viscosidad por la elevada presencia de savia, siendo un factor importante que debía ser aprovechado para favorecer la compactación de las partículas en la máquina peletizadora, sin requerir del uso de aglutinantes adicionales, como se suele realizar en la peletización de otro tipo de biomásas. (Nielsen et al., 2009).

3.2 Determinación de peso de muestras en el proceso de secado

Una vez realizado el troceado de las muestras de *Azadirachta Indica* y de *Handroanthus Chrysanthus*, las mismas fueron sometidas a un proceso de secado empleando un secador de tubo vertical, en donde se monitoreó en tiempo real la disminución de la humedad en el material. En la tabla 3.1 se evidencia el valor de la masa inicial en unidades de kilogramos al comienzo del secado, así como el valor final al culminar el proceso.

Tabla 3.1 Masa de las especies antes y después del proceso de secado

	Azadirachta Indica	Handroanthus Chrysanthus
Masa inicial (kg)	2.00	2.08
Masa final (kg)	1.39	1.44

Fuente: Elaboración propia

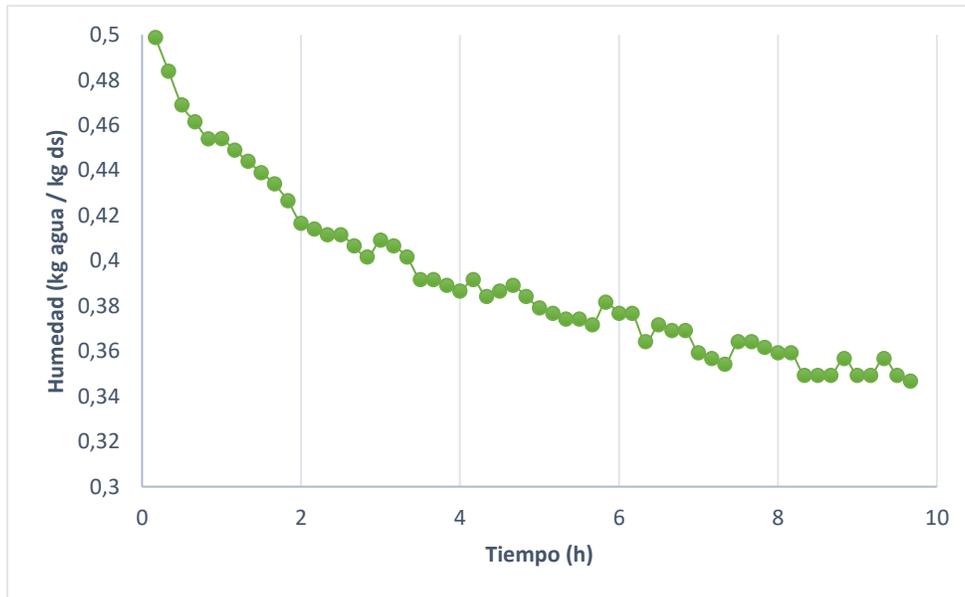
La especie *Azadirachta I.* tuvo una pérdida de 0.61 kg, un poco menos que la especie *Handroanthus C.* con una pérdida de 0.64 kg. La pérdida de masa de las especies se relaciona con la remoción de la humedad no ligada, o libre, en cada una de ellas al ser sometidas a una temperatura elevada de 52.00 °C durante el secado. La diferencia en pérdidas de masa depende de la naturaleza de las especies, se puede indicar que la especie *Azadirachta I.* el enlace de la humedad es más fuerte con el material lignoceluloso sólido. (Jewiarz et al., 2020).

Una vez terminado el secado, se procedió con su almacenamiento respectivo en recipientes sellados a fin de evitar la contaminación e influencia de la humedad.

3.3 Determinación de la curva de secado de cada especie

Se analizó los datos referentes al contenido de humedad en las mezclas, a partir del monitoreo del peso en tiempo real mientras se realizó el proceso de secado. Dichos datos fueron utilizados para elaborar la curva de secado de cada especie, teniendo que la curva del árbol Neem es la gráfica 3.2 y la del árbol amarillo es la en la gráfica 3.3.

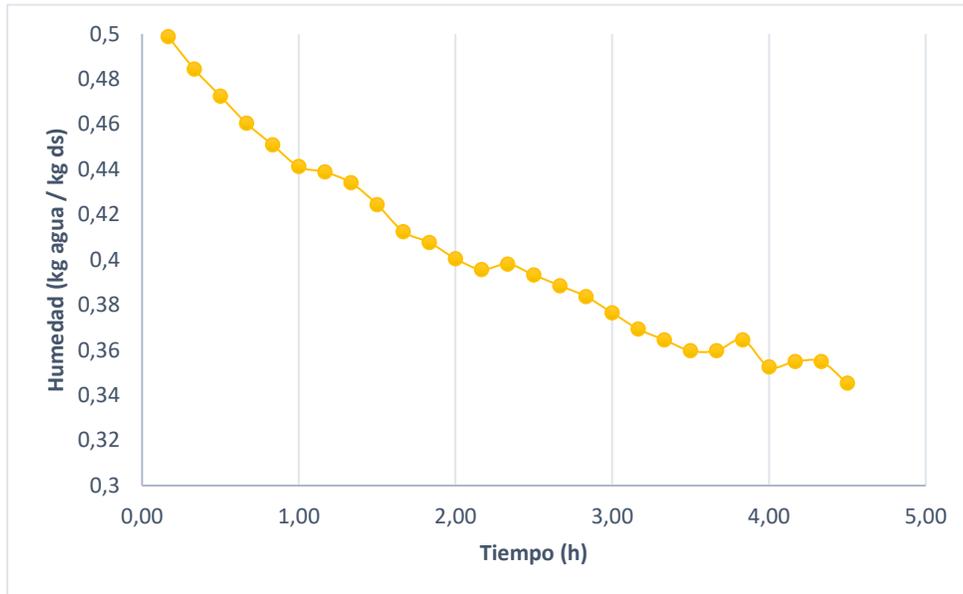
Gráfica 3.2 Humedad vs. tiempo (*Azadirachta Indica*)



Fuente: Elaboración propia

Respecto a su estructura, se puede apreciar en la gráfica no. 1 el comportamiento de secado de la *Azadirachta Indica*. Durante los primeros 30 minutos, el material mantuvo un secado constante, mismo que no interfiere de forma significativa con el proceso de remoción de humedad. A partir de este momento y hasta llegados las 4 horas y medias, transcurrió la remoción de la humedad no ligada. Desde las cinco horas, continuo la etapa post crítica en donde la humedad se evaporó desde el interior del sólido, llegando a sus valores finales, en ausencia de la humedad ligada.

Gráfica 3.3 Humedad vs. tiempo (*Handroanthus Chrysanthus*)



Fuente: Elaboración propia

Con relación a la gráfica no. 2, se aprecia el comportamiento de secado referente a la especie *Handroanthus Chrysanthus*. A partir del arranque del proceso y hasta la primera hora, se procedió con el secado constante. Desde dicho punto hasta las 3 horas, el secado favoreció la transferencia de masa de la humedad no ligada en el sólido, formando un comportamiento no lineal. Pasado este tiempo, se procedió con el secado post crítico, en donde la humedad ligada ya había sido evaporada y el contenido de agua en la muestra se evaporó desde adentro de la muestra.

3.4 Determinación de peso de muestras después de la molienda

Se realizó otro control de pesado de las muestras secadas de Neem y Amarillo posterior el paso por el molino de martillos. En la tabla 3.2 se evidencian tanto el valor obtenido durante el pesado y rendimiento de las muestras, entendiéndose este término como el porcentaje de masa útil que se molió respecto de la masa original. Al finalizar la molienda, se procedió al almacenamiento respectivo en recipientes sellados a fin de evitar la contaminación y la influencia de la humedad (Tabla 3.2).

A raíz de los valores mostrados en la tabla 3.2, se puede apreciar que el rendimiento de proceso para el caso de las especies consideradas sea el caso del Neem y del amarillo,

fue alto, siendo estos del 94% y el 88% respectivamente. Estos resultados pueden ser mejorados a partir de la recirculación progresiva de la muestra, misma que permita reducir aún más el tamaño de partícula. Así mismo, el contenido de humedad y la rigidez de la especie tiene importancia a la hora de predecir resultados en un proceso de molienda, siendo que para la especie *Handroanthus C.* el rendimiento del proceso fue menor, debido posiblemente a una mayor humedad contenida (García et al., 2019).

Tabla 3.2 Información de las muestras antes y después del proceso de molienda

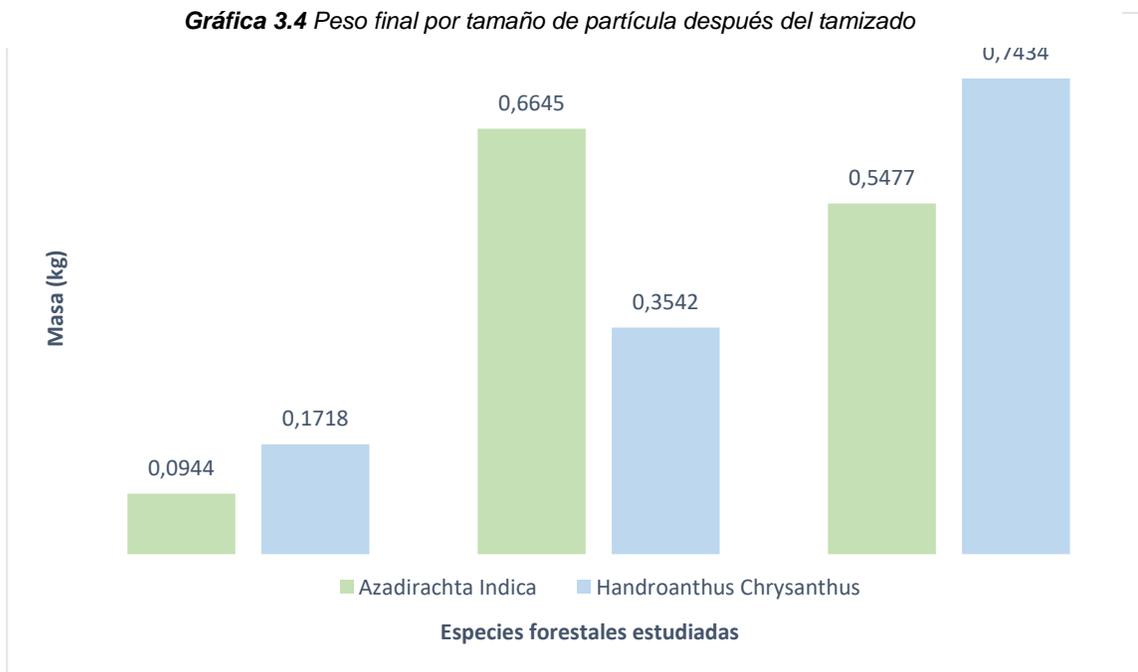
	Azadirachta Indica	Handroanthus Chrysanthus
Masa inicial (kg)	1.39	1.44
Masa final (kg)	1.31	1.27
Rendimiento del proceso (%)	94.00	88.00

Fuente: Elaboración propia

3.5 Peso final después del tamizado

Se realizó el pesado de las muestras molidas de Neem y Amarillo luego de su paso por la tamizadora mecánica. En el gráfico 3.4 se detallan las cantidades obtenidas en unidades de kilogramos a partir del proceso de tamizado, siendo diferentes según el tamaño de la abertura de luces de los tamices.

Gráfica 3.4 Peso final por tamaño de partícula después del tamizado



Fuente: Elaboración propia

Las partículas con granulometría inferior a 1mm del árbol Neem representan el 41.91% de la masa final de la molienda de la tabla 3.2; en el árbol Amarillo representan el 58.56%. Las partículas con un tamaño dentro del rango de 1.00 mm a 2 mm del árbol Neem figuran el 50.85%; mientras que del árbol Amarillo, un 27.90%. Finalmente, en la granulometría de las partículas mayores a 2.00 mm representa el 7.22% de la masa final de molienda del árbol Neem; mientras que para el árbol Amarillo, un valor del 13.53%.

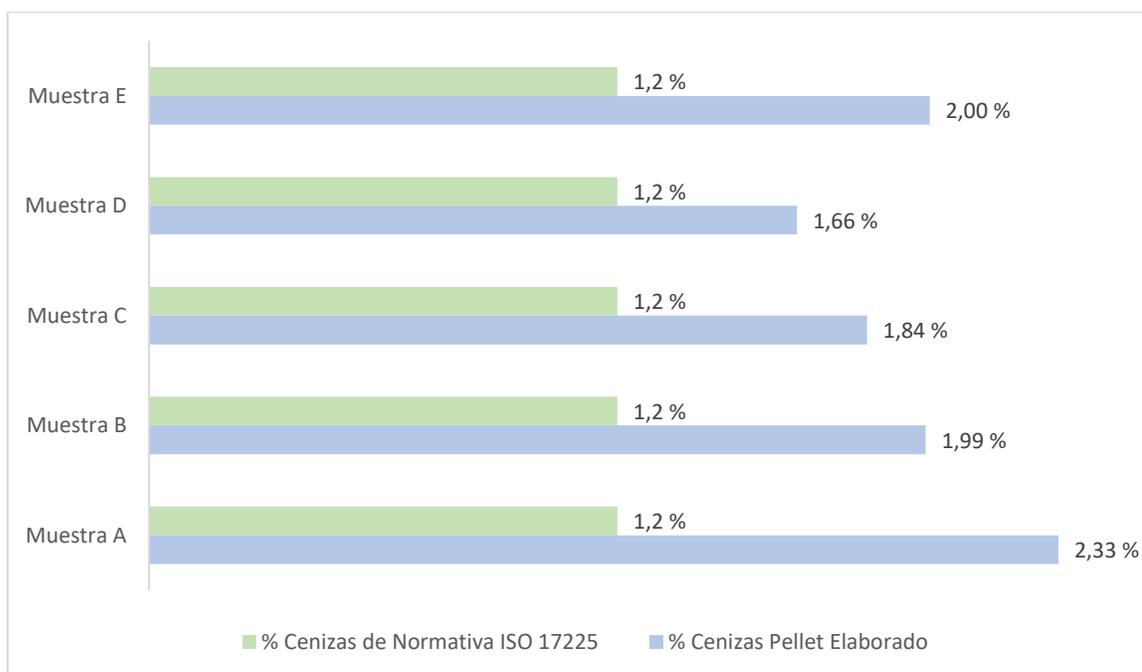
Se logró obtener una mayor cantidad de partículas con granulometría inferior a 1 mm, cuyo tamaño favorece en el procesamiento de la materia en la máquina peletizadora (Mero Constantine et al., 2017), en la especie *Handroanthus Chrysanthus* con una representación del 58.56% de la masa de molienda en comparación al 41.91% de la *Azadirachta Indica*. Esta diferencia se produce por el bajo contenido de humedad de la especie *Azadirachta* (Gupta et al., 2017), lo cual dificultó el proceso de disminución de tamaño en el molino por la rigidez que presentaba; por otra parte, el contenido de humedad de la especie *Handroanthus* permitió a los martillos del molino procesar correctamente la muestra por su maleabilidad obteniendo así el tamaño ideal para la siguiente etapa del proceso (Medina Arroyo et al., 2020).

3.6 Análisis de los pellets

3.6.1 Contenido de ceniza

Con relación a los análisis fisicoquímicos realizados sobre el producto terminado, se procedió con el análisis de porcentaje de ceniza. Dicho análisis se realizó a partir de lo mencionado en la metodología para todos los lotes propuestos. Concluida la experimentación, se obtuvieron los siguientes resultados (ver gráfico 3.5):

Gráfica 3.5 Porcentajes de contenido de cenizas de las muestras de pellets



Fuente: Elaboración propia

En la gráfica 3.5, se pueden apreciar los porcentajes de ceniza obtenidos en los ensayos de laboratorio. La muestra del lote D, destaca al ser la que menor porcentaje de humedad tiene, con un 1.66%. Respecto al mayor valor, este se obtuvo en la muestra del lote A. Dichos valores fueron comparados respecto a los sugeridos por las normas ENPLUS e ISO 17225:2014, de los cuales se encuentran expuestos en la gráfica 3.5, que son normativas europea e internacional respectivamente. En función de dichas legislaciones, los valores no cumplen los valores mínimos sugeridos. El alto contenido de ceniza se encuentra ligado a la presencia de compuestos inorgánicos en las muestras, los cuales vienen incorporados de forma intrínseca a la especie de árbol y son parte de los nutrientes necesarios para su desarrollo y crecimiento natural (Gani & Naruse, 2007).

En función de la referencia consultada (International Organization for Standardization, 2014), el lote A contiene los mayores valores de porcentajes tanto de nitrógeno como de hidrógeno, elementos que constituyen el análisis de cenizas; en contraste con el lote D que obtuvo los resultados más bajos (EPC,

2015). Estos elementos se encuentran relacionados con el porcentaje de humedad disponibles a partir de una relación inversamente proporcional (Kaliyan & Vance Morey, 2009). Asimismo, el porcentaje de ceniza se encuentra relacionado con la cantidad de humedad libre removible de las muestras, por lo que en el caso del lote D se logró remover mayor cantidad de agua, así como obtener menores porcentajes de ceniza.

En la gráfica 3.5, se pueden apreciar los porcentajes de ceniza obtenidos en los ensayos de laboratorio. La muestra del lote D, destaca al ser la que menor porcentaje de humedad tiene, con un 1.66%. Respecto al mayor valor, se obtuvo en la muestra del lote A. Dichos valores fueron comparados respecto a los sugeridos por las normas ENPLUS e ISO 17225:2014, normativas europea e internacional respectivamente. Estos estándares controlan lo relacionado a biocombustibles sólidos y biomasa. Tomando esta referencia, los valores obtenidos no cumplen los valores mínimos sugeridos. El alto contenido de ceniza se encuentra ligado a la presencia de compuestos inorgánicos en las muestras, los cuales vienen incorporados de forma intrínseca a la especie de árbol y son parte de los nutrientes necesarios para su desarrollo y crecimiento natural. (Gani & Naruse, 2007).

El lote A contiene los mayores valores de porcentajes tanto de nitrógeno como de hidrógeno, elementos que constituyen el análisis de cenizas, en contraste con el lote D que obtuvo los resultados más bajos. Asimismo, el porcentaje de ceniza se encuentra relacionado con la cantidad de humedad libre removible de las muestras, por lo que en el caso del lote D se logró remover mayor cantidad de agua, así como obtener menores porcentajes de ceniza.

3.6.2 Contenido de humedad

Al someter las cinco muestras de pellets de lignocelulosa a la lectura de su porcentaje de humedad se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 3.3 Porcentajes de contenido de humedad de los pellets elaborados

Muestra	Composiciones	Contenido de Humedad (%)
A	20 % de N y 80 % de H	13.00
B	40 % de N y 60 % de H	12.76
C	60 % de N y 40 % de H	11.41
D	80 % de N y 20 % de H	10.70
E	50 % de N y 50 % de H	11.99

Fuente: Elaboración propia

Se puede apreciar que la muestra D, con una composición de 80% Azadirachta I. y 20 % de Handroanthus C., presenta el menor valor de contenido de humedad igual a 10.70 % en el producto final peletizado; por otra parte, el lote elaborado con la muestra A, con mayor concentración de Handroanthus C. presenta un resultado inverso, con el mayor valor de contenido de humedad de toda la prueba igual a 13.0 %

Correspondientemente, la especie de mayor concentración en el primer caso es la Azadirachta I. y como se explicó en el gráfico 3.1, el material tratado de esta especie contaba con un bajo porcentaje de humedad posterior al proceso de secado, por lo que al hallarse en mayor proporción en la mezcla se esperaba un contenido de humedad inferior en comparación a los lotes con muestras de menor concentración de esta especie (Beltrón Vincés et al., 2020).

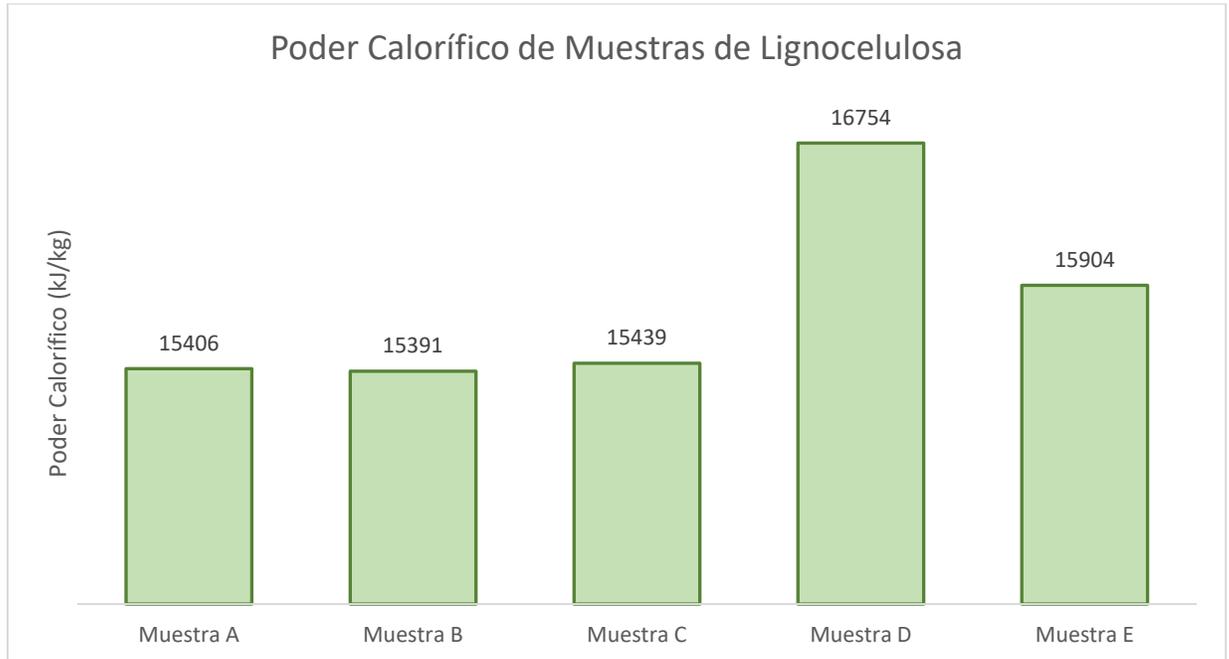
De igual manera, como la especie Handroanthus C. contaba con un valor alto de humedad al culminar con el proceso de secado, a medida que las muestras aumentaban su concentración de la especie se aprecia el aumento proporcional del contenido de humedad presente en el producto final como se aprecia en la tabla 3.3.

A partir de los valores obtenidos en esta prueba, se puede evidenciar que el material después de ser sometido al proceso de peletización no absorbe humedad alguna de su entorno; puesto que, el mayor valor arrojado de la prueba por parte de la muestra A, no sobrepasa el valor límite mayor de 13.23 % de humedad, lo cual correspondería a una muestra netamente de Handroanthus Chrysanthus.

3.6.3 Resultado de PC

A partir de la prueba de incinerado elaborado en el laboratorio de hidrocarburos se obtuvieron los siguientes resultados expresados en gráfico de barras No. 4:

Gráfica 3.6 Poder Calorífico en kJ/kg de los pellets elaborados



Fuente: Elaboración propia

Los ensayos realizados destacan lo esperado por la muestra del Lote D, la cual tuvo el mayor poder calorífico con 16754 kJ/kg. Para el caso del menor poder calorífico registrado, fue para la muestra B, con 15391 kJ/kg. Estos valores fueron comparados con las normas antes mencionadas, siendo el caso para el Lote D que cumple con los estándares mencionados en la tabla 1.1.

El análisis de poder calorífico arrojó resultados referentes a la influencia de las especies de árboles empleadas para la composición de los lotes. A partir de los datos experimentales, el lote D destaca entre las muestras propuestas debido a su alto porcentaje de Azadirachta Indica en comparación con el resto. Así mismo, este resultado del lote D permite ejemplificar la relación inversamente proporcional existente entre el poder calorífico vs. el contenido de humedad y cenizas. En dichas circunstancias, el lote D resaltó en el valor de su poder calorífico respecto

a los otros lotes lo cual es prometedor para su uso como biocombustible (Mostafa et al., 2019).

Se puede verificar lo mencionado previamente, comparando los resultados de: (Zawiślak et al., 2020b) y su elaboración de pellets a partir de aserrín de bedul; y (Erol et al., 2010), con pellets de fresno, los valores de poder calorífico fueron 16873.50 kJ/kg y 18060.00 kJ/kg respectivamente. El valor obtenido de la mezcla de especies en el presente proyecto resulta competitivo en el mercado con las mezclas arbóreas con aglutinantes sugeridas en otras investigaciones.

3.6.4 Dimensiones de pellets

Con ayuda del calibrador de Vernier se tomaron las medidas de diez pellets, dos de cada lote de diferente composición, para obtener un promedio de sus valores de longitud y diámetro obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 3.4 Dimensiones promedio de los pellets elaborados

Rótulo de muestra	No.	Longitud (mm)	Diámetro (mm)
Muestra A	Pellet 1	21.40	7.80
	Pellet 2	28.40	7.88
Muestra B	Pellet 1	29.00	7.96
	Pellet 2	29.44	7.86
Muestra C	Pellet 1	26.80	7.70
	Pellet 2	27.88	7.98
Muestra D	Pellet 1	17.50	7.84
	Pellet 2	24.30	7.88
Muestra E	Pellet 1	24.32	7.80
	Pellet 2	25.50	7.50
Promedio		25.45	7.82

Fuente: Elaboración propia

Se puede apreciar que tanto el valor promedio del diámetro de los diez pellets como el valor promedio de longitud se encuentran dentro del rango de estándares vigentes según la normativa internacional ISO 17225-2 descrito en la tabla 1.1. El

valor promedio del diámetro fue 7.82 mm, con una varianza de 0.02; la baja variación entre los datos se debe a que se utilizó el mismo plato con el mismo tamaño de hendiduras durante todas las pruebas, esto asegura un tamaño ideal puesto que un menor diámetro comprometería la estabilidad de estructura del pellet en presencia de mucho movimiento durante el transporte de este. Por otra parte, los valores de longitud tuvieron una mayor varianza igual a 14.13, pero todo manteniéndose dentro del rango con un valor promedio de 25.45 mm; sin embargo, para lograr obtener una mayor uniformidad se sugiere mantener una alimentación continua al equipo de peletizado con una mayor cantidad de muestra lo cual va a impedir que exista una distribución desigual de la muestra en el plato durante la rotación del molino ni que se segmente demasiado el producto en el corte a la salida, generando así pellets de un tamaño más homogéneo (Stelte et al., 2012).

3.7 Análisis económico de producción

Los costos de producción toman en consideración el valor de equipos, materiales para el tratamiento de la materia prima y el costo de los análisis necesarios para asegurar su cumplimiento de los requisitos internacionales de calidad del producto. Los costos de materia prima no forman parte en la consideración para la inversión puesto que son residuos reutilizados que se generan del proceso de poda del campus.

En la tabla 3.5, se muestran los valores necesarios iniciales por lo que se necesitaría una inversión inicial de aproximadamente de 1000 USD, teniendo en consideración la compra de nuevos equipos y de los materiales detallados necesarios para las diferentes etapas de tratamiento. Se adiciona también el valor de la prueba de incinerado que permite conocer el valor del poder calorífico del producto ofrecido, lo cual permitirá garantizar el cumplimiento de este con respecto a los valores estándares en normativas internacionales para la propiedad química mencionada.

Tabla 3.5 Descripción de costos de equipos y materiales para la producción

Descripción	Precio Total
Machete	\$ 4.70
Sacos	\$ 2.50
Recipientes	\$ 16.00
Sacos	\$ 2.50
Prueba de Incinerado	\$ 40.00
Secador vertical	\$ 80.00
Molino de martillo	\$ 80.00
Tamizadora	\$ 100.00
Balanza termogravimétrica	\$ 350.00
Balanza de un decimal	\$ 150.00

Fuente: Elaboración propia

El precio destinado para el producto se escogió a partir del análisis del mercado de las diversas opciones de pellets de madera que se encuentran actualmente disponibles para comercialización. Los valores variaban de 40 USD hasta 75 USD por tonelada donde a mayor precio de venta se garantizaba un producto de mayor calidad, es decir, cumplimiento de todos parámetros registrados para biocombustibles sólidos; adicionalmente, se consideraban ciertos pellets con aditivos o aglutinantes lo cual al favorecer la compactación, y generar un incremento en el poder calorífico del producto esto generaba un aumento considerable en el precio de venta. Considerando que la materia prima residual del árbol Neem y del árbol Amarillo se empleó sin aditivo ni en su tratamiento ni durante el proceso final de peletizado, no se realizó un aumento al costo de producción correspondiente. El costo más representativo es la inversión para las pruebas de incinerado, por lo que el valor de venta para el año 1 del proyecto es de 55 USD por tonelada, donde se logra cubrir en totalidad la inversión por lote y adicionalmente se genera una ganancia de alrededor del 35.00 %.

Según reportes internacionales, en el continente europeo el mercado de biocombustibles peletizados es más marcado que en Latinoamérica, pero se recalca que por los

resultados favorecedores a partir de su uso, se espera que el continente americano incremente la demanda de los biocombustibles en los próximos 5 años (Beltrón Vences et al., 2020). Esto permitiría un incremento anual en el precio de venta del 5.00 %, en base a la demanda del mercado y considerando mejoras implementadas en el control de calidad de las propiedades del producto, asegurando así un producto en óptimas condiciones que cumpla con la expectativa del cliente y lograr así resaltar ante la competencia en el futuro auge de material forestal densificado en pellets.

CAPÍTULO 4

4 Conclusiones y recomendaciones

4.1 Conclusiones

Con el objeto de proponer diferentes alternativas para la generación de biocombustibles sólidos basados en los residuos de poda de algunas especies de árboles disponibles en la ESPOC se evaluaron diferentes alternativas en función de la disponibilidad y abundancia de estas con la finalidad de formar pellets variando la composición másica porcentual en una mezcla. A partir de los resultados obtenidos en la práctica y experimentación, se puede concluir que:

- Se elaboraron pellets a partir de la biomasa residual de las siguientes especies seleccionadas: *Azadirachta Indica* (Árbol Neem) y *Handroanthus Chrysanthus* (Árbol Amarillo). La muestra que brindó mejor resultado fue aquella con una composición de 80.00 % *Azadirachta I.* y 20.00 % *Handroanthus C.* con un poder calorífico de 16,754 kJ/kg y un contenido de humedad y cenizas de 10.70 % y 1.66 % respectivamente.
- En la producción de los pellets se cumplieron las normativas ENPLUS e ISO 17225:2014, referentes a la legislación europea e internacional respectivamente, para la evaluación y comparación de las características fisicoquímicas del pellet producido, las cuales indican poder calorífico, porcentaje de humedad y contenido de cenizas.
- Se estableció una metodología práctica para la generación de pellets a partir de residuos de poda y jardinería. Dicha metodología fue puesta en práctica para el desarrollo de las muestras que se emplearon en los análisis fisicoquímicos.
- Se compararon valores de poder calorífico, humedad y porcentaje en función de los recomendados por las normativas internacionales antes mencionadas para la elaboración de pellets producidos a partir de residuos madereros y su uso como

biocombustible sólido, concluyendo que la propuesta cumple con los estándares sugeridos por dichas normas.

4.2 Recomendaciones

- Debido a las complicaciones presentadas al momento de realizar el peletizado referentes al contenido de humedad de las muestras empleadas donde se requería recircular la muestra hasta la obtención del pellet, se recomienda el uso de aglutinantes de origen natural que permitan una mayor compactación de los materiales, favoreciendo la formación de estos. Se sugiere que se investiguen posibles fuentes de aglutinantes a partir de residuos de biomasa presentes en el campus.
- A fin de ampliar el alcance del análisis económico de la propuesta presentada, se sugiere extender el mismo a partir de consideraciones exergoeconómicas, a fin de evaluar la eficiencia del proceso desde esa arista.
- En consideración de las maquinarias empleadas y su naturaleza artesanal, se puede tener en cuenta mejoras en el diseño de estas, así como optimizaciones en sus puntos de operación, para favorecer la metodología de formación relacionada a los pellets.
- Teniendo en cuenta el uso de peletizadoras artesanales, se considera recomendable ahondar en la mejora y optimización de las condiciones operativas de este equipo, así como la sugerencia respecto al uso de otras maquinarias al momento de realizar los pellets.

5 Bibliografía y referencias

- Beltrón Vines, I. C., Palacios Bravo, H. E., & Rosero Delgado, E. (2020). Evaluación energética de biocombustibles sólidos elaborados a partir de mezclas de biomasa lignocelulósica. *Revista de Investigaciones En Energía, Medio Ambiente y Tecnología: RIEMAT ISSN: 2588-0721*, 4(2), 33. <https://doi.org/10.33936/riemat.v4i2.2192>
- Brasil, D. S., Martins, M. P., Nakashima, G. T., & Yamaji, F. M. (2015). Use of sugarcane bagasse and candeia waste for solid biofuels production. *Floresta*, 45(1), 185–192. <https://doi.org/10.5380/rf.v45i1.36502>
- Castillo, I., & Alvarado Llerena. (2019). *Distribución de Especies Arbóreas Nativas e Introducidas en el sendero “Mirador” del Bosque Protector Prosperina*. Distribución de Especies Arbóreas Nativas e Introducidas En El Sendero “Mirador” Del Bosque Protector Prosperina. https://www.researchgate.net/publication/335542717_Distribucion_de_Especies_Arboreas_Nativas_e_Introducidas_en_el_sendero_Mirador_del_Bosque_Protector_Proasperina
- Emmanuel, O., & Ekiti, A. (2017). *Effects of Deforestation on Land Degradation*. 3(August), 96.
- EPC. (2015). *ENplus Handbook, version 3. Quality Certification Scheme For Wood Pellets, Part 3: Pellet Quality Requirements*. www.enplus-pellets.eu].
- Erol, M., Haykiri-Acma, H., & Küçükbayrak, S. (2010). Calorific value estimation of biomass from their proximate analyses data. *Renewable Energy*, 35(1), 170–173. <https://doi.org/10.1016/j.RENENE.2009.05.008>
- Gani, A., & Naruse, I. (2007). Effect of cellulose and lignin content on pyrolysis and combustion characteristics for several types of biomass. *Renewable Energy*, 32(4), 649–661. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2006.02.017>
- García, R., Gil, M. V., Rubiera, F., & Pevida, C. (2019). Pelletization of wood and alternative residual biomass blends for producing industrial quality pellets. *Fuel*, 251(January), 739–753. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.03.141>
- Gupta, S. C., Prasad, S., Tyagi, A. K., Kunnumakkara, A. B., & Aggarwal, B. B. (2017). Neem (*Azadirachta indica*): An indian traditional panacea with modern molecular basis. *Phytomedicine*, 34, 14–20. <https://doi.org/10.1016/j.PHYMED.2017.07.001>
- International Organization for Standardization. (2014). *ISO 17225-2:2014 - Solid biofuels - Fuel specifications and classes - Part 2: Graded wood pellets*. <https://www.iso.org/standard/76088.html>
- International Organization for Standardization. (2015). ISO 18122: Solid biofuels - Determination of ash content. *Brussels*, 6. <https://www.iso.org/standard/61515.html>
- Jewiarz, M., Wróbel, M., Mudryk, K., & Szufa, S. (2020). Impact of the drying temperature and grinding technique on biomass grindability. *Energies*, 13(13). <https://doi.org/10.3390/en13133392>
- Kaliyan, N., & Vance Morey, R. (2009). Factors affecting strength and durability of densified biomass products. *Biomass and Bioenergy*, 33(3), 337–359. <https://doi.org/10.1016/j.BIOMBIOE.2008.08.005>
- Kayo, C., Tojo, S., Iwaoka, M., & Matsumoto, T. (2013). Evaluation of Biomass Production and Utilization Systems. In *Research Approaches to Sustainable Biomass Systems* (pp. 309–346). Academic Press.

<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-404609-2.00014-3>

- Lett, R. G., & Ruppel, T. C. (2004). Coal, Chemical and Physical Properties. In *Encyclopedia of Energy* (pp. 411–423). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b0-12-176480-x/00283-7>
- Medina Arroyo, H. H., Torres Torres, J. J., Palacios Palacios, C. A., Ruiz Blandón, B. A., Martínez Guardia, M., & Rengifo Murillo, L. (2020). Germination and growth of the tree *Handroanthus chrysanthus* (Bignoniaceae) under nursery conditions. *UNED Research Journal*, *12*(2), e3175. <https://doi.org/10.22458/urj.v12i2.3175>
- Mero Constantine, K. G., Bonifaz Martínez, J. S., & Espol. (2017). *Diseño de un prototipo para la fabricación de pellets a partir de biomasa residual forestal*. <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/41581>
- Mostafa, M. E., Hu, S., Wang, Y., Su, S., Hu, X., Elsayed, S. A., & Xiang, J. (2019). The significance of pelletization operating conditions: An analysis of physical and mechanical characteristics as well as energy consumption of biomass pellets. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 105, pp. 332–348). Pergamon. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.01.053>
- Murillo, V. (2018). Determinación de las propiedades físicas de tres especies forestales del bosque seco tropical de Manabí. In *Univerisdad estatal del sur de manabí* (Issue 1). <http://repositorio.unesum.edu.ec/handle/53000/1135>
- Neem, N. R. C. (US) P. on. (1992). *Neem*. National Academies Press (US). <https://doi.org/10.17226/1924>
- New, T. R. (1984). *A biology of acacias*. Oxford University Press in association with La Trobe University Press,.
- New York State Energy Research and Development Authority. (1997). *Alternative Fuels for Vehicles Fleet Demonstration Program Volume 3, Technical Reports*. <https://doi.org/10.2172/527935>
- Nielsen, N. P. K., Gardner, D. J., Poulsen, T., & Felby, C. (2009). Importance of temperature, moisture content, and species for the conversion process of wood residues into fuel pellets. *Wood and Fiber Science*, *41*(4), 414–425. <https://wfs.swst.org/index.php/wfs/article/view/469/469>
- Stelte, W., Sanadi, A. R., Shang, L., Holm, J. K., Ahrenfeldt, J., & Henriksen, U. B. (2012). Recent developments in biomass pelletization - a review. *BioResources*, *7*(3), 4451–4490. <https://doi.org/10.15376/biores.7.3.stelte>
- Torii, M., Ichihara, Y., Masuya, H., & Hattori, T. (2022). Trunk sap rot of Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) caused by *Fomitiporella sinica*. *Journal of Forest Research*. <https://doi.org/10.1080/13416979.2022.2043592>
- Whittaker, C., & Shield, I. (2017). Factors affecting wood, energy grass and straw pellet durability – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *71*, 1–11. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2016.12.119>
- Wuebbles, D. J., & Jain, A. K. (2001). Concerns about climate change and the role of fossil fuel use. *Fuel Processing Technology*, *71*(1–3), 99–119. [https://doi.org/10.1016/S0378-3820\(01\)00139-4](https://doi.org/10.1016/S0378-3820(01)00139-4)
- Zawiślak, K., Sobczak, P., Kraszkiwicz, A., Niedziółka, I., Parafiniuk, S., Kuna-Broniowska, I., Tanaś, W., Żukiewicz-Sobczak, W., & Obidziński, S. (2020a). The use of lignocellulosic waste in the production

of pellets for energy purposes. *Renewable Energy*, 145, 997–1003.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.051>

Zawiślak, K., Sobczak, P., Kraszkiewicz, A., Niedziółka, I., Parafiniuk, S., Kuna-Broniowska, I., Tanaś, W., Żukiewicz-Sobczak, W., & Obidziński, S. (2020b). The use of lignocellulosic waste in the production of pellets for energy purposes. *Renewable Energy*, 145, 997–1003.
<https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2019.06.051>

Anexos

Cálculo de promedio, varianza y desviación estándar de las dimensiones de los pellets

The screenshot shows the RStudio interface with the following R code in the editor:

```
1 longitud = c(21.4, 28.4, 29.0, 29.44, 26.80, 27.88, 17.5, 24.30, 24.32, 25.5)
2 var(longitud)
3 mean(longitud)
4 sd(longitud)
5 diametro = c(7.80, 7.88, 7.96, 7.86, 7.70, 7.98, 7.84, 7.88, 7.80, 7.50)
6 var(diametro)
7 mean(diametro)
8 sd(diametro)
9
```

The console output shows the results of these calculations:

```
R 4.0.0 ~ /
> longitud = c(21.4, 28.4, 29.0, 29.44, 26.80, 27.88, 17.5, 24.30, 24.32, 25.5)
> var(longitud)
[1] 14.1288
> mean(longitud)
[1] 25.454
> sd(longitud)
[1] 3.75883
> diametro = c(7.80, 7.88, 7.96, 7.86, 7.70, 7.98, 7.84, 7.88, 7.80, 7.50)
> var(diametro)
[1] 0.01911111
> mean(diametro)
[1] 7.82
> sd(diametro)
[1] 0.1382429
>
```

The Environment pane on the right shows the following objects:

Object	Class	Attributes
longitud	num [1:10]	21.4 28.4 2...
var(longitud)	num [1:1]	14.1288
mean(longitud)	num [1:1]	25.454
sd(longitud)	num [1:1]	3.75883
diametro	num [1:10]	7.80 7.88 7.96...
var(diametro)	num [1:1]	0.01911111
mean(diametro)	num [1:1]	7.82
sd(diametro)	num [1:1]	0.1382429

Informe de análisis de muestra del laboratorio de hidrocarburos, ESPOL.



Escuela Superior Politécnica del Litoral
Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas
Laboratorio de Análisis Químico Instrumental
LAQUINS – ESPOL

INFORME DE ANÁLISIS

Informe de Análisis N°: 095-2022
Cliente: Francisco David Valencia Ospina
Dirección:
Solicitado por: Francisco David Valencia Ospina
Fecha de recepción de muestra: 18-08-2022
Fecha de realización y finalización de ensayo: 18-08-2022 / 19-08-2022
Analizado por: Ing. Tyrone Alcivar R.
Fecha de emisión del informe: 23 de agosto de 2022

Muestra	Código	Parámetro	Unidad	Resultado	±s	Límite máximo permisible	Método de Análisis
Muestra A	095-2022-01	Poder calorífico	J/g	15733	1	N/A	ASTM D240
Muestra B	095-2022-02			15546	1	N/A	
Muestra C	095-2022-03			15737	1	N/A	
Muestra D	095-2022-04			15984	1	N/A	
Muestra 1	095-2022-05			15904	1	N/A	
Muestra 2	095-2022-06			16754	1	N/A	
Muestra 3	095-2022-07			15439	1	N/A	
Muestra 4	095-2022-08			15391	1	N/A	
Muestra 5	095-2022-09			15406	1	N/A	

Los ensayos marcados con (*) están incluidos en el alcance de la acreditación del SAE.
Los datos proporcionados por el cliente se encuentran subrayados y no son responsabilidad del Laboratorio.
Si es aplicable, la declaración de conformidad se basa en la guía ILAC G8:09/2019 y/o en las normas o reglamentos que correspondan y que se indican.

Observaciones: Muestra entregada e ingresada por el cliente como: "Muestra"

Condiciones en que se recibe la muestra: Sólido en envase de plástico 100 g aprox.

Código de la muestra: 095-2022

Temperatura ambiente promedio: 27 °C Humedad relativa promedio: 57 % HR

JOAN RAMON VERA
VILLALOBOS
Dirección de Laboratorio
LAQUINS

Director de Laboratorio

Notas: El informe original impreso o digital es válido solo con la firma digital del Director de Laboratorio o su delegado y no debe ser reproducido de forma parcial o total, excepto por su emisor como copia autorizada.
La información completa relativa a los ensayos y de las incertidumbres calculadas están a disposición del cliente.
Los resultados obtenidos corresponden solo a la muestra analizada. Las cifras luego del punto (.) deben ser consideradas como decimales. Las cifras luego de la coma (,) deben ser consideradas como enteros.

Ecuador - Guayaquil – Campus Gustavo Galindo, km 30.5 vía Perimetral, Código Postal 090903
Teléfono: 2269559, correo electrónico: labquimica@espol.edu.ec