

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA  
LA MOLINA  
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES**



**“EVALUACIÓN DE PELLETS PRODUCIDOS CON RESIDUOS DE  
*Guadua angustifolia* Kunth”**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO FORESTAL**

**GABRIELA JAZMINA MUCHA AVILES**

**LIMA-PERÚ**

**2020**

---

**La UNALM es titular de los derechos patrimoniales de la presente investigación  
(Art. 24- Reglamento de Propiedades Intelectual)**

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA  
LA MOLINA**

**FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES**

**“EVALUACIÓN DE PELLETS PRODUCIDOS CON RESIDUOS DE  
*Guadua angustifolia* Kunth”**

**TESIS PARA OPTAR EL TITULO DE INGENIERO FORESTAL**

**GABRIELA JAZMINA MUCHA AVILES**

**Sustentada y aprobada ante el siguiente jurado:**

---

*Ing. Moisés Pascual Acevedo, Mg. Sc*  
*Presidente*

---

*Mg.Sc Graciela Egoavil Cueva Gálvez*  
*Miembro*

---

*Ing. Miguel Angel Meléndez Cárdenas,*  
*Mg.Sc.*

---

*Ing. Héctor Enrique Gonzales Mora, Ph. D*  
*Asesor*

## *DEDICATORIA*

*A mis padres Rosa y Víctor por su apoyo incondicional*

## AGRADECIMIENTOS

*Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mis padres Rosa mi madre y mi mejor maestra en la vida, guíen me ha guiado con muchos ánimos a ser perseverante y a trabajar para cumplir mis objetivos trazados. A Víctor mi padre quien me enseñó el amor a las plantas y el trabajo con madera, por todo el apoyo incondicional y los sacrificios realizados. A mis hermanas Wendy y Sofía por todas las alegrías que me brindan.*

*Un agradecimiento especial al PhD Héctor Gonzales, por sus enseñanzas, paciencia y disponibilidad, por enseñarnos a dar valor al bosque transformándolo en productos y por todo el tiempo que dedica a la Facultad de Ciencias Forestales.*

*A Angela Molina y Liz López, amigas con quienes compartimos los tiempos de investigación.*

*Este trabajo de investigación se realizó con el apoyo de FONDECYT-CONCYTEC, programa de Ciencia Activa, del convenio N° 174-2015 “Círculo de Investigación para el Desarrollo de la Cadena de Valor del Bambú para el desarrollo Científico y Tecnológico.*

# ÍNDICE GENERAL

	Página
<b>I. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>II. REVISIÓN DE LITERATURA .....</b>	<b>3</b>
<b>1. BAMBÚ (GUADUA ANGUSTIFOLIA KUNTH).....</b>	<b>3</b>
<b>1.1 DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA .....</b>	<b>3</b>
<b>1.2 DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA EN EL PERÚ.....</b>	<b>4</b>
<b>1.3 ANATOMÍA DEL TALLO .....</b>	<b>5</b>
<b>1.4 COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL TALLO.....</b>	<b>6</b>
<b>1.6 GENERACIÓN DE RESIDUOS DE BAMBÚ .....</b>	<b>7</b>
<b>2. ENERGÍA.....</b>	<b>8</b>
<b>2.1 FUENTES DE ENERGÍA .....</b>	<b>8</b>
<b>2.2 BIOMASA CON FINES ENERGÉTICOS .....</b>	<b>8</b>
<b>2.3 PROCESOS DE TRANSFORMACIÓN DE LA BIOMASA VEGETAL .....</b>	<b>15</b>
<b>3. BIOCOMBUSTIBLES .....</b>	<b>16</b>
<b>3.1 CLASIFICACIÓN DE LOS BIOCOMBUSTIBLES SEGÚN SU APARIENCIA FÍSICA .....</b>	<b>17</b>
<b>3.2 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS, QUÍMICAS Y FÍSICO-QUÍMICAS DE LOS BIOCOMBUSTIBLES .....</b>	<b>18</b>
<b>3.3 BIOCOMBUSTIBLES SÓLIDOS.....</b>	<b>19</b>
<b>4. PELLETS.....</b>	<b>23</b>
<b>4.1 PRETRATAMIENTOS ANTES DE SU PRODUCCIÓN .....</b>	<b>23</b>
<b>4.2 VARIABLES EN LA OBTENCIÓN DE PELLETS .....</b>	<b>24</b>
<b>4.3 PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS PELLETS.....</b>	<b>28</b>
<b>4.3.1 DIMENSIONES DE LOS PELLETS .....</b>	<b>28</b>
<b>4.3.2 CONTENIDO DE HUMEDAD .....</b>	<b>29</b>
<b>4.3.3 DENSIDAD.....</b>	<b>30</b>
<b>4.3.4 FRIABILIDAD Y DURABILIDAD .....</b>	<b>30</b>
<b>4.4 PROPIEDADES QUÍMICAS DE LOS PELLETS.....</b>	<b>31</b>
<b>4.5 PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS.....</b>	<b>33</b>

4.6	<b>PROCESOS DE PRODUCCIÓN INDUSTRIAL DE PELLETS</b> .....	35
5.	<b>PRODUCCIÓN Y CONSUMO MUNDIAL DE PELLETS</b> .....	37
<b>III.</b>	<b>MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	<b>40</b>
1.	<b>LUGARES DE ESTUDIO</b> .....	40
1.	<b>MATERIALES Y EQUIPOS</b> .....	41
1.1	<b>MATERIALES</b> .....	41
1.2	<b>EQUIPOS</b> .....	41
2.	<b>MÉTODOLOGÍA</b> .....	42
3.1	<b>APROVECHAMIENTO DE LOS CULMOS DE BAMBÚ PARA LA ELABORACIÓN DE LATAS</b> .....	43
3.2	<b>RECOLECCIÓN DE LOS RESIDUOS DEL LATILLADO</b> .....	44
3.3	<b>CARACTERIZACIÓN DEL ASERRIN DE GUADUA ANGUSTIFOLIA</b> .....	44
3.4	<b>ACONDICIONAMIENTO DEL ASERRÍN</b> .....	44
3.5	<b>PRODUCCIÓN DE PELLETS</b> .....	46
3.6	<b>DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES</b> .....	48
3.7	<b>EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE LOS PELLETS</b> .....	50
3.8	<b>DISEÑO EXPERIMENTAL</b> .....	51
<b>IV.</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	<b>53</b>
1.	<b>PROPIEDADES QUÍMICAS Y FÍSICAS DE LAS PARTICULAS DE GUADUA ANGUSTIFOLIA KUNTH</b> .....	53
1.1	<b>CONTENIDO ELEMENTAL</b> .....	53
1.2	<b>PODER CALÓRICO DE LOS RESIDUOS</b> .....	54
1.3	<b>CONTENIDO DE HUMEDAD</b> .....	55
1.4	<b>CLASIFICACIÓN DE LA PARTÍCULAS</b> .....	56
1.5	<b>DENSIDAD APARENTE DE LAS PARTÍCULAS DE GUADUA ANGUSTIFOLIA KUNTH</b> .....	58
2.	<b>EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS PELLETS</b> .....	60
2.1	<b>DIÁMETRO</b> .....	63
2.2	<b>LONGITUD</b> .....	64
2.3	<b>DENSIDAD APARENTE</b> .....	65

<b>2.3 FRIABILIDAD</b> .....	68
<b>3. PROPIEDADES QUÍMICAS DE LOS PELLETS</b> .....	70
<b>2.1 PODER CALÓRICO</b> .....	70
<b>3. PROPIEDADES FISICO QUIMICAS DE LOS PELLETS</b> .....	72
<b>V. CONCLUSIONES</b> .....	79
<b>VI. RECOMENDACIONES</b> .....	80
<b>VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	81
<b>VIII. ANEXOS</b> .....	92

## *Índice de tablas*

	Página
<b>TABLA 1: COMPOSICIÓN QUÍMICA DE GUADUA ANGUSTIFOLIA KUNTH</b>	6
<b>TABLA 2: RANGOS DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA ELEMENTAL DE LA BIOMASA VEGETAL</b>	11
<b>TABLA 3: COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LOS POLISACÁRIDOS DE RESERVA EN LA BIOMASA VEGETAL</b>	14
<b>TABLA 4: CLASIFICACIÓN DE LOS BIOCOMBUSTIBLES</b>	17
<b>TABLA 5: CARACTERÍSTICAS FÍSICAS, QUÍMICAS Y FISICOQUÍMICAS DE BIOCOMBUSTIBLE</b>	18
<b>TABLA 6: COMPARACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LOS BIOCOMBUSTIBLES</b>	20
<b>TABLA 7: COMPARACIÓN DE LAS VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS BIOCOMBUSTIBLES</b>	21
<b>TABLA 8: CLASES DE CALIDAD DE LOS COMBUSTIBLES Y LAS ESPECIFICACIONES DE LOS PELLETS</b>	50
<b>TABLA 9 : DISEÑO EXPERIMENTAL DE LOS TRATAMIENTOS UTILIZADOS PARA EL ANÁLISIS ESTADÍSTICO</b>	52
<b>TABLA 10: ANÁLISIS ELEMENTAL DE LOS RESIDUOS DE GUADUA ANGUSTIFOLIA KUNTH</b>	53
<b>TABLA 11: PODER CALÓRICO SUPERIOR DE RESIDUOS BIOMASICOS</b>	54
<b>TABLA 12 : DISTRIBUCIÓN DE LAS PARTÍCULAS SEGÚN SU TAMAÑO</b>	56
<b>TABLA 13: VALORES DEL ANÁLISIS DE VARIANZA (ANVA) DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE DIÁMETRO, LONGITUD, DENSIDAD Y FRIABILIDAD.</b>	61
<b>TABLA 14: VALORES PROMEDIOS DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE DIÁMETRO, LONGITUD, DENSIDAD Y FRIABILIDAD DE LOS PELLETS CON LOS DIFERENTES TRATAMIENTOS.</b>	62
<b>TABLA 15: COMPARACIÓN DE DENSIDADES CON EL TAMAÑO DE PARTÍCULA</b>	66
<b>TABLA 16: VALORES DEL PODER CALÓRICO DE LOS PELLETS</b>	70
<b>TABLA 17: RESULTADOS PROMEDIOS DEL CONTENIDO DE HUMEDAD, MATERIAL VOLÁTIL, CARBONO FIJO Y CONTENIDO DE CENIZAS CON SUS CORRESPONDIENTES TEMPERATURAS PARA LOS PELLETS</b>	73
<b>TABLA 18: COMPARACIÓN DE PELLETS DE GUADUA ANGUSTIFOLIA KUNTH CON LA NORMA EN 14961-2</b>	76

## Índice de figuras

	Página
<b>FIGURA 1. PARTES DE LA GUADUA ANGUSTIFOLIA</b> .....	3
<b>FIGURA 2: DISTRIBUCIÓN DE LA GUADUA ANGUSTIFOLIA EN EL PERÚ</b> .....	4
<b>FIGURA 3: ESTRUCTURA ANATÓMICA DEL CULMO DE GUADUA ANGUSTIFOLIA A) SECCIÓN TRANSVERSAL, B) VISTA DE LOS HACES VASCULARES</b> .....	5
<b>FIGURA 4: PROCESOS DE CONVERSIÓN DE LA BIOMASA: MATERIAS PRIMAS UTILIZADAS Y APLICACIONES</b> .....	16
<b>FIGURA 5: TIPOS DE BIOCOMBUSTIBLES SOLIDOS</b> .....	19
<b>FIGURA 6: DESARROLLO DE LA TEMPERATURA Y PROCESOS RESPONSABLES DEL AUTOCALENTAMIENTO DE LA BIOMASA</b> .....	25
<b>FIGURA 7: PELLET CON DIFERENTES CONTENIDO DE HUMEDAD: (A) 5± 1 %; (B) 15±1,(C) 25±2% Y (D) 35±2%</b> .....	26
<b>FIGURA 8: REPRESENTACIÓN DE LOS PRINCIPALES MECANISMOS DE AGLOMERACIÓN</b> .....	27
<b>FIGURA 9: MECANISMOS IMPLICADOS EN LA FORMACIÓN DE CENIZAS EN LA COMBUSTIÓN DE LA BIOMASA</b> .....	32
<b>FIGURA 10: CURVA TERMIGRAVIMÉTRICA PARA UNA MUESTRA DE BIOMASA</b> .....	33
<b>FIGURA 11: PROCESO DE FABRICACIÓN DE LOS PELLETS</b> .....	35
<b>FIGURA 12: PRODUCCIÓN MUNDIAL DE PELLETS PARA LOS AÑOS 2000-2015 EN MILLONES DE TONELADAS</b> .....	37
<b>FIGURA 13: MAPA MUNDIAL DE LA PRODUCCIÓN Y CONSUMO DE PELLETS (MILLONES DE TONELADAS) AÑOS 2014-2015</b> .....	38
<b>FIGURA 14: MAPA DE UBICACIÓN DE LA MATERIA PRIMA EN EL DISTRITO DE LA FLORIDA, PROVINCIA DE SAN MIGUEL, DEPARTAMENTO DE CAJAMARCA.</b> .....	40
<b>FIGURA 15: DIAGRAMA DE FLUJO DE LA METODOLOGÍA A SEGUIR PARA LA OBTENCIÓN DE LOS PELLETS DE BAMBÚ</b> .....	42
<b>FIGURA 16: FIGURA 14: APROVECHAMIENTO DE LAS CAÑAS DE BAMBÚ PARA LA ELABORACIÓN DE LATAS : (1)SIERRA CIRCULAR; (2) CORTE LONGITUDINAL DE LA LATA;</b>	

(3) CORTE LONGITUDINAL PARA LA OBTENCIÓN DE OCTAVOS; (4) DENUDADO; (5); VISTA TRANSVERSAL DEL LISTÓN; (6) VISTA LONGITUDINAL DEL LISTÓN.....	43
<b>FIGURA 17: RESIDUOS DE BAMBÚ ORIGINADOS POR LA SIERRA CIRCULAR.....</b>	<b>44</b>
<b>FIGURA 18: HUMECTACIÓN Y CONTROL DEL CONTENIDO DE HUMEDAD DE LAS PARTÍCULAS</b> .....	<b>45</b>
<b>FIGURA 19: PELLETIZADORA Y SUS PARTES.....</b>	<b>46</b>
<b>FIGURA 20: PRODUCCIÓN DE PELLETS .....</b>	<b>47</b>
<b>FIGURA 21: FORMA DE MEDICIÓN DEL DIÁMETRO Y LONGITUD DE LOS PELLETS.....</b>	<b>48</b>
<b>FIGURA 22: DETERMINACIÓN DE FRIABILIDAD.....</b>	<b>49</b>
<b>FIGURA 23: DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA DE LAS PARTÍCULAS DE LA GUADUA</b> <b>ANGUSTIFOLIA KUNTH .....</b>	<b>56</b>
<b>FIGURA 24: TAMAÑO DE LAS PARTÍCULAS DE GUADUA ANGUSTIFOLIA KUNTH.....</b>	<b>58</b>
<b>FIGURA 25: DENSIDAD APARENTE DE LAS PARTÍCULAS HOMOGENIZADAS.....</b>	<b>59</b>
<b>FIGURA 26: PELLETS REALIZADOS .....</b>	<b>60</b>
<b>FIGURA 27: DIÁMETROS PROMEDIOS DE LOS PELLETS .....</b>	<b>63</b>
<b>FIGURA 28: LONGITUD PROMEDIO DE LOS PELLETS.....</b>	<b>64</b>
<b>FIGURA 29: DENSIDAD APARENTE DE LOS PELLETS.....</b>	<b>65</b>
<b>FIGURA 30: DENSIDAD APARENTE DE LAS PARTÍCULAS Y LOS PELLETS CON CH DE 8 POR</b> <b>CIENTO .....</b>	<b>67</b>
<b>FIGURA 31: DENSIDAD APARENTE DE LAS PARTÍCULAS Y LOS PELLETS CON CH DE 14 POR</b> <b>CIENTO .....</b>	<b>67</b>
<b>FIGURA 32: FRIABILIDAD PROMEDIO DE LOS PELLETS.....</b>	<b>68</b>
<b>FIGURA 33: CURVAS TERMOGRAVIMÉTRICAS DEL PELLETS CON CONTENIDO DE HUMEDAD</b> <b>14 Y GRANULOMETRÍA -50 .....</b>	<b>72</b>

## *Índice de anexos*

	Página
<b>ANEXO 1: VALORES DE LAS PROPIEDADES FISICAS DE LOS PELLETS CON DIFERENTES GRANOLUMETRIAS Y CONTENIDO DE HUMEDAD .....</b>	<b>92</b>
<b>ANEXO 2: ANÁLISIS DEL PODER CALORICO SUPERIOR DEL RESIDUO DE GUADUA ANGUSTIFOLIA KUNTH .....</b>	<b>93</b>
<b>ANEXO 3: ANÁLISIS ELEMENTAL DEL RESIDUO DE GUADUA ANGUSTIFOLIA KUNTH.....</b>	<b>93</b>
<b>ANEXO 4: ANÁLISIS TERMIGRAVIMETRICO DE LOS PELLETS DE GUADUA ANGUSTIFOLIA KUNTH.....</b>	<b>93</b>
<b>ANEXO 5: ANÁLISIS DEL PODER CALORIFICO SUPERIOR E INFERIOR DE LOS PELLETS DE GUADUA ANGUSTIFOLIA KUNTH.....</b>	<b>93</b>

## *RESUMEN*

La presente investigación trata sobre la evaluación de los pellets elaborados con residuos de *Guadua angustifolia* Kunth obtenidos a partir de la transformación con la sierra circular de los culmos a latillas. Produciéndose así diferentes tipos de residuos como viruta, aserrín, polvillo y nudos los cuales fueron separados y caracterizados según su tamaño. A partir de esta clasificación se propuso la reutilización a través de la pelletización para obtener pellets, el cual es un biocombustible sólido. Los pellets se elaboraron con 2 tipos de variables; granulometría y contenido de humedad: para la granulometría se utilizaron cuatro tipos de tamaños de partículas -20/+30, -30/+40, -40/+50 y -50 y para el contenido de humedad 2 tipos 8 y 14 por ciento. Posteriormente las partículas pasaron por una pelletizadora manual obteniéndose los pellets, que fueron evaluados en las siguientes propiedades. Las Propiedades físicas de diámetro, longitud, densidad aparente y friabilidad; propiedades químicas de poder calórico; propiedades físico-químicas de contenido de humedad, material volátil, carbono fijo y contenido de cenizas. Encontrándose que la granulometría y el contenido de humedad afectan significativamente las propiedades físicas, químicas y fisicoquímicas.

**Palabras claves:** Biomasa, *Guadua angustifolia* Kunth, biocombustibles, pellets.

## *ABSTRACT*

This research deals with the evaluation of pellets made with *Guadua angustifolia* Kunth residues obtained from culm primary transformation. Thus producing different types of waste such as chips, sawdust, bamboo dust and nodes which were separated and characterized by size. From this classification, reuse was proposed through pelletization to obtain pellets. The pellets were made with two types of variables; granulometry and moisture content: four types of particle size -20 / + 30, -30 / + 40, -40 / + 50 and -50 were used for granulometry and for moisture content of 2 types 8 and 14 percent. Subsequently, the particles passed through a manual pelletizer, obtaining the pellets, which were evaluated in the following properties: physical properties of diameter, length, apparent density and friability; chemical properties of calorific power; physicochemical properties of moisture content, volatile material, fixed carbon and ash content. Finding that granulometry and moisture content significantly affect the physical, chemical and physicochemical properties.

**Key words:** Biomass, *Guadua angustifolia* Kunth, Biofuels, pellets.

## I. INTRODUCCIÓN

La generación y acumulación de residuos en la industria forestal es un problema económico, social y ambiental tal como lo describen Álvarez, Dias y Alessandrini (2001) y Aguirre, Mendez, Paez y Soto (2000) quienes mencionan que estos residuos obstaculizan el proceso productivo, generan plagas, enfermedades, y su eliminación deliberada a través de la quema libera gran cantidad de CO<sub>2</sub> al ambiente.

El sector forestal tiene altos volúmenes de residuos como resultado de las actividades de aprovechamiento y transformación así la magnitud en la que se producen los residuos forestales varía de 43,6 a 47,4 por ciento cuando se realiza las operaciones de cepillado, canteado y moldurada para obtener tablas dimensionadas de madera (Bobadilla y Cobián, 2016). Dentro de los recursos forestales considerados, destacan los maderables y los no maderables, como el bambú. Para el caso del bambú; recurso forestal no maderable; la generación de residuos proveniente de esta planta, en el Perú, puede ser mayor; Becerra (2003) menciona que la producción de residuos para obtener latillas es de 65,7 por ciento y Gonzales (2005) señala que el producir una masa de 40,43 t/ha/año de latillas de bambú genera una cantidad de residuo de 24,44 t/ha/año.

La presencia de residuos forestales tiene un gran potencial para el aprovechamiento energético debido a su composición lignocelulósica. Con relación al recurso bambú, principalmente el género *Guadua*, tiene una distribución en la mayoría de las regiones del Perú; se caracteriza por ser de rápido crecimiento y, dada su importancia, existen políticas de su fomento como el Plan Nacional de Promoción del Bambú. Por lo antes mencionado, se deduce que el uso del bambú da lugar a una generación importante de residuos de bambú, y que de mantenerse un volumen constante, sería una alternativa para elaborar productos combustibles con fines energéticos.

Una forma de aprovechar los residuos es a través de la densificación de la biomasa, como los de pellets, cuya producción es una técnica que eleva las propiedades energéticas por

volumen de biomasa. El pellets, es un biocombustible sólido, y puede convertirse en un reemplazante progresivo de los combustibles fósiles, cuyas emisiones son causantes del efecto invernadero y el cambio climático (Correa *et al*, 2013).

El utilizar pellets de bambú no solo reducirá los gases de efecto invernadero, sino que también contribuirá al desarrollo rural, fomentará la limpieza de los bosques, disminuirá el riesgo de incendios y la propagación de enfermedades. Además, los pellets de bambú tienen una amplia gama de utilización sea para calefacción, para cocinas y hornos de vapor industrial.

La presente investigación ha logrado obtener pellets a partir de los residuos de *Guadua angustifolia* Kunth y brinda información sobre la obtención y las propiedades físicas, químicas y termogravimétricas de pellets con bambú

## II. REVISIÓN DE LITERATURA

### 1. BAMBÚ (GUADUA ANGUSTIFOLIA KUNTH)

#### 1.1 DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA

La *Guadua angustifolia* Kunth es una monocotiledónea de rápido crecimiento (Cruz, 2009). Se desarrolla en altitudes comprendidas entre 1300 y 1500 m.s.n.m. en suelos francos de buen drenaje, con respecto al clima donde se desarrolla la especie, este requiere de precipitaciones de 2000 a 2500 mm anuales, una temperatura de 20°C a 30 °C y de 5 a 6 horas/luz/día (Charpentier, 2014). En cuanto a sus características físicas, la *G angustifolia* Kunth alcanza una altura de 15 a 28 metros, un DAP que va desde 6 a 14 cm y un espesor de pared de 0,5 a 0,9 cm (Ortiz ,2017). En la figura 1 se observan las partes en la que se divide comercialmente un tallo de guadua y como este es aprovechado.

	DESCRIPCIÓN		UTILIZACIÓN
<b>COPA</b>	Parte apical de la guadua con una longitud de 1,20 a 2,00 m	20 m.	Se replica en el suelo del guadua como aporte de materia orgánica.
<b>VARILLON</b>	Sección de menor diámetro Su longitud tiene aproximadamente 3 metros.	18 m.	Se utiliza en la construcción como correa de techos con tejas de barro o de paja. Se emplea como tutor en cultivos transitorios.
<b>SOBREBASA</b>	Es un tramo de guadua con buen comercio debido a su diámetro, que permite un uso variado. Posee una longitud aproximada de 4 metros.	15 m.	Utilizada como elemento de soporte en estructuras de hormigón de edificios en construcción. También se emplea como viguetas para diseñar planchas y como postes de espalderas en cultivos.
<b>BASA</b>	Parte de la guadua que mayores usos tiene, debido a su diámetro intermedio. Es la sección más comercial de la guadua. La longitud es de 8 metros aproximadamente.	11 m.	De esta sección se elabora generalmente la esterilla, la cual tiene múltiples usos como son la construcción de paredes, para el entramado de cubiertas, etc. Esta parte se utiliza para vigas y columnas en construcciones nuevas de guadua.
<b>CEPA</b>	Sección basal del culmo de mayor diámetro, debido a sus entrenudos más cortos proporciona una mayor resistencia y tiene una longitud de 3 metros.	3 m.	Se utiliza para columnas en construcción y para cercos.
<b>RIZOMA</b>	Es un tallo modificado, subterráneo, que se conoce popularmente como "caimán".	0 m.	En decoración, muebles y juegos infantiles.

Figura 1. Partes de la *Guadua angustifolia*

FUENTE: De Navas (2011)

## 1.2 DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA EN EL PERÚ

La presencia de la *Guadua* en el Perú, se da en los departamentos de Tumbes, Piura, Lambayeque, La Libertad, Cajamarca, Amazonas, San Martín, Pasco, Junín, Lima, Ucayali, Loreto y Madre de Dios, ver figura 3. Por su parte Gonzales (2005) divide la distribución según las zonas de carácter productivo del bambú en el Perú, las cuales son: Zona Norte donde están los departamentos de Piura y Lambayeque, Cajamarca, zona Nor Oriente con los departamentos de Amazonas y San Martín, zona Selva central donde están los departamentos de Huánuco, Pasco y Junín, zona Sur Oriente con los departamentos Cuzco y Madre de Dios. Zona sur chico para el departamento de Lima con las siguientes localidades Mala, Cañete y Lunahuana.

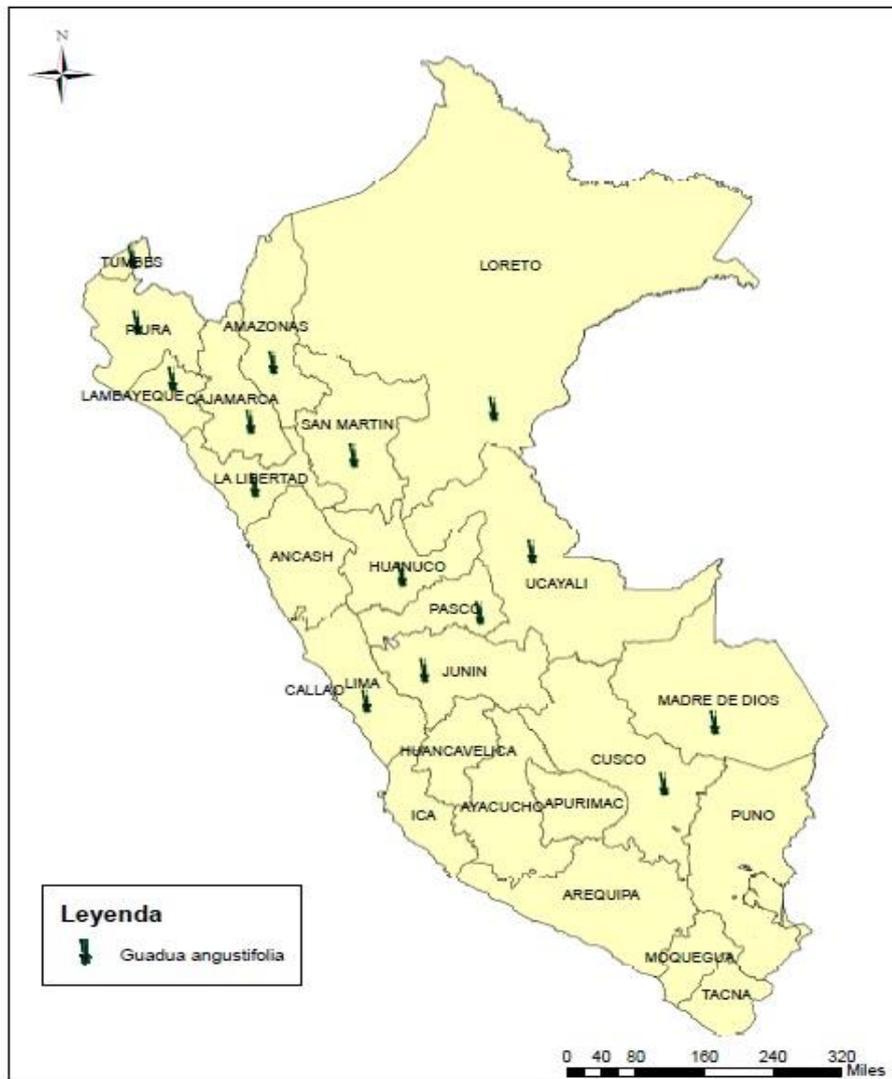


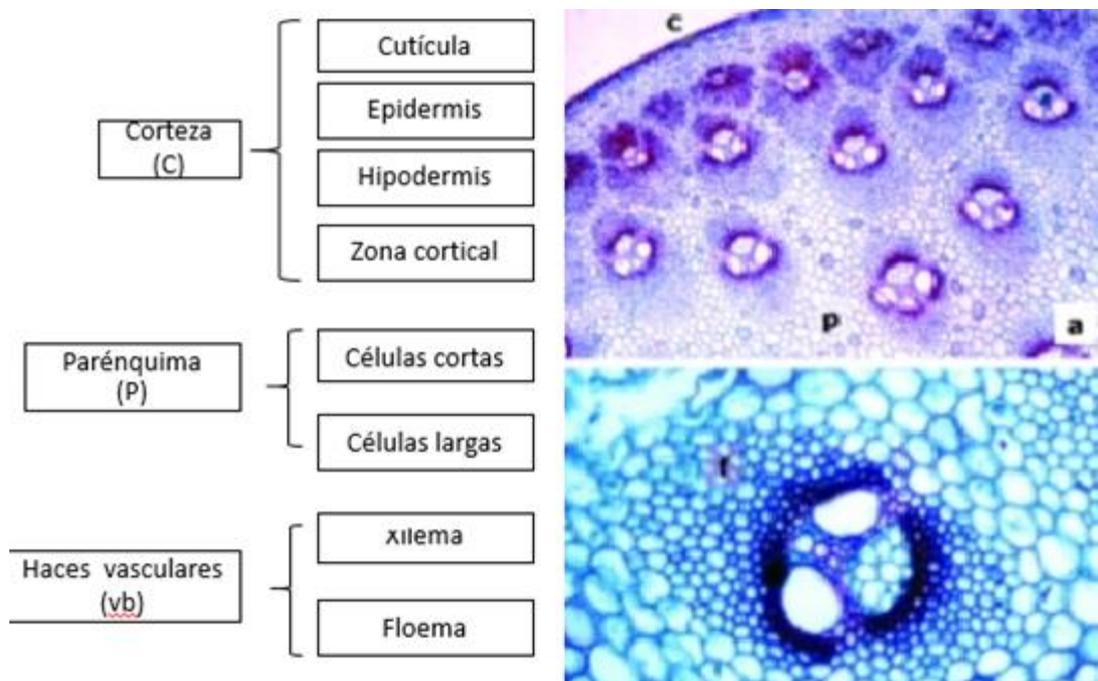
Figura 2: Distribución de la *Guadua angustifolia* en el Perú

FUENTE: Adaptado de Gonzales (2005)

### 1.3 ANATOMÍA DEL TALLO

El tallo de *Guadua angustifolia* Kunth tiene la siguiente composición anatómica: 51 por ciento de tejido parenquimático, 40 por ciento de fibra y 9 por ciento de células de conducción (Londoño, 2002). Según como se divide el tallo de *G. angustifolia* variara el contenido de los tejidos. Para la parte basal se tiene 63 por ciento de parénquima, 29 por ciento de fibras y 8 por ciento de tejido conductivo; para la parte media 64 por ciento parénquima, 26 por ciento de fibras, 10 por ciento de tejido conductivo; para la parte apical 36 por ciento de parénquima, 56 por ciento de fibras, 8 por ciento de tejido conductivo (Londoño, Camayo, Riaño y López, 2002).

En la sección transversal del espesor del culmo de la *Guadua angustifolia* se distinguen la corteza exterior (C), el tejido parenquimático (P) y los haces vasculares (vb). La corteza es la encargada de proteger la parte interna posee células alargadas axialmente y sílice. Las células parenquimáticas están formadas por tubos que forman el sistema conductivo y los haces de fibras. Los haces vasculares están compuestos por el sistema conductivo, formado por vasos, floema y protoxilema (Londoño et al, 2002).



**Figura 3: Estructura anatómica del culmo de *Guadua angustifolia***  
a) sección transversal, b) vista de los haces vasculares

FUENTE: Londoño et al (2002)

## 1.4 COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL TALLO

En la caracterización química Gutiérrez (2015) analizó a la *Guadua angustifolia* Kunth obteniendo un contenido de lignina de 24,07 por ciento, un contenido de holocelulosa de 68,3 por ciento, un contenido de extractivos en etanol de 7,54 por ciento, un contenido de cenizas de 4,94 por ciento y un contenido de sílice de 2,94 por ciento.

Por su parte Lozada (2012) describe como varía la composición química de la *G. angustifolia* Kunth según sus partes: interna, externa y porción de nudo (ver tabla 1).

**Tabla 1: Composición química de *Guadua angustifolia* Kunth**

Muestra	Cenizas %	Sílice (SiO <sub>2</sub> ) %	Lignina %	Carbohidratos
A	4,33	3,18	27,06	68,88
B	3,52	1,54	24,06	67,27
C	6,77	4,66	24,12	66,23

FUENTE: Lozada (2012)

A: Capa externa de la pared del tallo; B: Capa interna de la pared del tallo; C: Porción del Nudo

## 1.5 USOS

La guadua es un material ideal para construcciones por su carácter sismo-resistente, debido a su capacidad de absorber energía y admitir una mayor flexión (Cruz,2009). De acuerdo al nivel de transformación se distinguen tres categorías en el uso del culmo de guadua son: productos primarios, productos de transformación primaria y productos de mayor valor agregado. Los primeros se refieren al uso de la caña sin realizar ninguna transformación a su forma cilíndrica natural y sus aplicaciones son actividades agropecuarias ( tutores y postes), vivienda, infraestructura turística, puentes, infraestructura deportiva y recreativa. Los productos transformación primaria son latillas ( pisos, paredes, techos, puertas, cortinas), los productos de mayor valor agregado corresponden a muebles, productos utilitarios y decorativos (Añazco y Rojas,2015). Otros usos serían para la producción de pulpa para papel y como biocombustible.

## 1.6 GENERACIÓN DE RESIDUOS DE BAMBÚ

Los residuos de la industria del aserrío se caracterizan por tener una baja densidad, poseer un alto contenido de humedad, tener diversas formas y granulometrías (Correa, Carrillo, Guadalupe, Marcos, Márquez, Gonzales, Jurado y Garza 2013). Estos tienen efectos negativos hacia el medio ambiente ya que la liberan dióxido de carbono y otros gases contaminantes a la atmosfera. Además de ser depósitos y focos para la propagación de hongos, plagas y enfermedades. (FAO, 2001).

Una alternativa para revertir los efectos negativos de los residuos es a través del aprovechamiento, pero antes se tendrá que solucionar las características que poseen. Otro problema que presentan los residuos es su alta dispersión geográfica, lo cual hace que la recolección y el transporte para su aprovechamiento sea costoso (Ferreira, 2002). Debido a este problema Gonzales (2006) y CNE (2007) proponen una alternativa para obtener información acerca de los residuos en los aserraderos para su posterior aprovechamiento. Ellos proponen una metodología a base de encuestas, donde primero se debe definir los términos para homogenizar los datos así como contar con el área de influencia para su posterior georreferenciación.

En cuanto a la generación de residuos para la *Guadua* es necesario conocer cuál es el potencial de producción de residuos con lo que cuenta cada actividad o producto realizado. Por ejemplo Camargo, Arango y Amezquita (2012) estimaron la existencia de culmos secos y realizaron una proyección de biomasa seca disponible a nivel regional para el eje cafetalero en Colombia, teniendo como resultado 176, 400 t/año el cual muestra el potencial de producción de biomasa sin poner en riesgo la utilización para otro tipo de productos.

La generación de residuos de *Guadua* es mayor en la producción de latillado para la obtención de tableros, ya que es una operación donde se realizan muchos cortes y predimensionamientos. Becerra (2013) nos indica que en la fabricación de un tablero de *Guadua* se genera un 65,7 por ciento de residuos. Los cuales pueden estar formados por nudos, láminas delgadas, viruta y aserrín, las cuales pueden generarse en mayor o menor medida dependiendo del método de corte, tipo de máquina y habilidad del personal. Otro

ejemplo de cuanto residuo se genera lo da Gonzales (2005) señalando que al producir una masa de 40,43 t/ha/ año de latillas se genera de residuo 24,44 t/ha/año.

## **2. ENERGÍA**

La energía es la capacidad que tienen los cuerpos para producir trabajo como por ejemplo trabajo mecánico, emisión de luz, generación de calor, etc ( Schallenber Pieravieja,Hernandez, Unamunzaga, Garcia, Diaz,Cabrer, Martel, Padilla y Subiela, 2008). Esta se presenta en diferentes formas, como energía externa e interna. La energía externa se debe a la masa y a la velocidad, entre ellas se tiene a la energía cinética y la energía potencial. Por su parte la energía interna es la que radica en las estructuras de átomos y moléculas. La energía interna se agrupa en tres formas: energía mecánica interna; que es la energía cinética y potencial de las moléculas y átomos que forman el cuerpo; energía química, es la almacenada en los enlaces que unen los diferentes elementos en su estructura y la energía nuclear la que radica en el interior de los núcleos atómicos (Gonzalez, 2009).

### **2.1 FUENTES DE ENERGÍA**

Las fuentes de energía se clasifican de acuerdo a su disponibilidad, en energías renovables y no renovables. La energía no renovable son las que existen en la naturaleza en una cantidad limitada, entre ellas se tiene : el petróleo, el gas natural y el uranio. Las energías renovables son aquellas cuyo potencial es inagotable, ya que provienen de la energía de la radiación solar o de la atracción gravitatoria de la luna ( Schallenberg et al, 2008).

De Juana, Santos, Crespo, Herrero De Francisco y Fernadez (2008) agregan que las energías renovables, son energías limpias que contribuyen al cuidado del medio ambiente y se convierten en una alternativa frente a los efectos contaminantes y el agotamiento de los combustibles fósiles. Los ejemplos de energía renovables son energía solar, eólica, biomasa, energía geotérmica, energía hidroeléctrica y energía mareomotriz.

### **2.2 BIOMASA CON FINES ENERGÉTICOS**

La biomasa es cualquier material orgánico de origen biológico reciente, y abarca productos de origen vegetal, animal microbiana, aguas residuales y lodos depuradores (San Miguel y Gutierrez, 2015). Al ser de origen reciente se excluyen los materiales biológicos de formaciones geológicas que han sufrido un proceso de mineralización.

La biomasa cuando es utilizada en el proceso de combustión es considerada, según el protocolo de Kyoto como neutral en emisiones de dióxido de carbono. Esto debido a que la cantidad de CO<sub>2</sub> emitido en la combustión es captada por la planta durante su crecimiento. (San Miguel y Gutierrez, 2015).

Desde el punto de vista del aprovechamiento energético, la biomasa tiene al poder calórico el cual depende del tipo de biomasa y de su humedad. Los valores de poder calórico de la biomasa oscila entre los 3500-3000 kcal/kg para los residuos ligno-celulósicos, 2500-2000 kcal/kg para los residuos urbanos y finalmente los 10000 kcal/ kg para los combustibles líquidos provenientes de cultivos energéticos.(Coordinación E.R, 2008).

### **2.2.1 TIPOS DE BIOMASA**

Existen diferentes criterios de clasificación para la biomasa, las que se describen según lo mencionado por los siguientes autores: Cabrera, Carrillo, Prieto, Hernández, Tolosana y Ambrosio (2011), Esteban (2010), San Miguel y Gutierrez (2015), Murillo (2014) y Romanelli, Ruiz y Pasquale (2017).

#### **a. Según su origen**

- Biomasa primaria: Es la formada directamente por los seres fotosintéticos.
- Biomasa secundaria: Es la producida por los seres heterótrofos que utilizan en su nutrición la biomasa primaria.
- Biomasa terciaria: Es la producida por los seres que se alimentan de biomasa secundaria.

#### **b. Según el compuesto o grupo de compuestos predominante**

- Biomasa lignocelulósica: Aquella donde predomina la holocelulosa (celulosa y hemicelulosa) y la lignina. Ejemplo la madera.
- Biomasa amilácea: Aquella donde predominan los hidratos de carbono, aquí se encuentran el polisacárido de reserva como el almidón.
- Biomasa azucarada: Aquí están los componentes hidrocarbonatados constituidos por azúcares (glucosa o fructuosa). De ejemplo se tiene a la betarraga y caña de azúcar.
- Biomasa oleaginosa: Aquellos que contienen abundante cantidad de aceite, por ejemplo las semillas de girasol y aceitunas.

- Biomasa animal: Tiene una proporción de prótido, lípidos e hidratos de carbono diferentes a la biomasa vegetal existiendo una disminución en hidratos de carbono y un aumento en el contenido proteico y lipídico.

**c. Según su fuente de obtención**

- **Biomasa forestal:** Es la que está constituida por residuos de bosques naturales y por bosques plantados. La biomasa forestal se define como el peso de materia orgánica que se encuentra en un ecosistema forestal por encima y por debajo del suelo. Normalmente se cuantifica en toneladas por hectárea de peso verde o seco. Para su manipulación y procesamiento se separan en sus componentes, donde encontramos la masa de las ramas, hojas, corteza, raíces, hojarasca y madera. Su determinación es importante debido a que esta permite determinar los montos de carbono y los elementos químicos existentes en cada uno de sus componentes.
- **Biomasa agrícola:** La biomasa agrícola posee un potencial alimenticio e industrial. Durante el aprovechamiento de los procesos productivos agrícolas queda gran cantidad de residuos que son abandonados en el campo; por ejemplo bagazo de caña y la cascarilla de arroz.
- **Biomasa acuática:** Está compuesta por plantas acuáticas y algas. Poseen generalmente una alta capacidad de crecimiento y propagación
- **Biomasa de cultivos energéticos:** Son especies de tipo herbáceo o leñoso que deben ser cultivados de forma rentable según las condiciones edafoclimáticas de cada zona para un aprovechamiento positivo. Por ejemplo el maíz, trigo y jatropha (*Jatropha curcas*)
- **Biomasa de residuos urbanos:** Son vertimientos biodegradables, como aguas residuales urbanas e industrial y residuos ganaderos. También se puede encontrar en este grupo la basura orgánica de actividades industriales, comerciales y residenciales.

De acuerdo a las clasificaciones dadas la biomasa de *Guadua angustifolia* Kunth es según su origen biomasa primaria, según el compuesto preponderante es biomasa lignocelulósica y según su fuente de obtención biomasa forestal.

## 2.2.2 CARACTERÍSTICAS DE LA BIOMASA VEGETAL

Según Costa (2013) la biomasa debe poseer las siguientes características:

- Ser de fácil obtención, distribución y procesamiento ya que así se minimizaran los costos de producción.
- Ser de crecimiento independiente de factores climáticos.
- Todas sus partes deben ser aprovechables y no debe ser una fuente común de alimento para el hombre.
- De resultado energético positivo, la energía invertida en el proceso y extracción de un biocombustible debe ser menor que la energía que proporciona el biocombustible.

### A) COMPOSICIÓN ELEMENTAL DE LA BIOMASA VEGETAL

Los elementos que conforman la biomasa vegetal son: Carbono con 50 por ciento, oxígeno 43 por ciento, hidrógeno 6 por ciento y otros elementos en forma minoritaria como el nitrógeno, azufre y otros (Romanelli et al, 2017). Serrano, Mejía, Ortiz, Sánchez, Y Zalamea (2017) describen la composición elemental de la biomasa vegetal con los siguientes rangos (Ver Tabla 2).

**Tabla 2: Rangos de la composición química elemental de la biomasa vegetal**

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

*FUENTE: Serrano et al (2017)*

Por otro lado San Miguel y Gutierrez (2015) agregan que los elementos que conforman la biomasa vegetal influyen en las características energéticas, en el proceso de combustión y su utilización puede impactar al medio ambiente. Por ejemplo Arpi y Calderon (2010) describen que la composición química elemental, para el producto pellets, influye en el poder calórico, los gases emitidos en la combustión y la composición de las cenizas. Tomando en cuenta estas influencias Carmona (2015) recomienda conocer las concentraciones de los elementos antes de utilizarlos como biocombustibles, con el objetivo de considerar tratamientos para su uso.

## **B) EFECTOS DE LOS ELEMENTOS SOBRE LA BIOMASA VEGETAL**

Eliseo y Zucolli (2008), Obernberger y Thek (2010), San Miguel y Gutiérrez (2015) describen los efectos de los elementos sobre la biomasa.

- **Elementos que influyen sobre la combustión:** Los elementos son carbono, hidrogeno y oxígeno. El carbono es el que libera el contenido energético, junto con el hidrogeno. El carbono y el hidrogeno desprenden energía al oxidarse completamente, produciendo  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  y 8,07 y 34,09 kcal/ kg respectivamente. La función del oxígeno es ser carburante el cual favorece la combustión completa.
- **Elementos que influyen en la corrosión y/o el medio ambiente:** Los elementos que causan estos daños son el cloro, el nitrógeno y el azufre. El cloro da lugar al ácido clorhídrico el cual puede provocar corrosión en las calderas, también da lugar a la formación de dioxinas las cuales permanecen en el medio ambiente por periodos largos y tienen un efecto negativo sobre la salud humana al dañar al sistema inmunológico. El nitrógeno cuando se presenta en la biomasa en cantidades mayores a 0,6 por ciento causa un efecto negativo al medio ambiente, ya que este se oxida en la combustión dando origen a óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ) que reaccionan con la luz del día y se forma ozono troposférico que es el responsable del smog fotoquímico. El azufre cuando está presente en la biomasa en un contenido superior a 0,1 por ciento causa corrosión en los hornos de combustión. El azufre cuando tiene un contenido superior a 0,2 por ciento se relaciona con emisiones de óxidos de azufre ( $\text{SO}_x$ ) que junto con el vapor de agua se transforma en ácido sulfúrico, produciendo corrosiones de materiales férricos a través de la lluvia ácida.
- **Elementos mayoritarios en las cenizas en la combustión de la biomasa:** Estos elementos son Al, Ca, Fe, K, Mg, Na, P, Se, Si y Ti. El sodio influye en la vitrificación de las cenizas. El potasio disminuye el punto de fusión de las cenizas y aumenta la capacidad de corrosión a altas temperaturas. El magnesio disminuye el punto de fusión de las cenizas y facilita su aglomeración con tóxicos.

## **C) COMPUESTOS ORGÁNICOS DE LA BIOMASA VEGETAL**

San Miguel y Gutiérrez (2015) y Romanelli et al (2017) clasifican a los compuestos orgánicos de la biomasa vegetal en hidratos de carbono, proteínas y lípidos, los cuales se describen a continuación.

a) **Hidratos de carbono:** Son compuestos formados por carbono, hidrogeno y oxígeno. Se clasifican en: azúcares solubles, polisacáridos de reserva y polisacáridos estructurales.

- **Azúcares solubles:** Son aldehídos o cetonas que pueden adoptar formas cíclicas como piranosas o furanosas, aquí se encuentran la glucosa y la fructuosa, estas son utilizadas para la producción de alcoholes por vía fermentativa.
- **Polisacáridos de reserva:** Entre ellos está el almidón que es un polímero de glucosa formado por grupos de moléculas poliméricas. Este polisacárido se encuentra como hidratos de carbono de reserva en el grano de cereales y semillas. Su hidrólisis produce glucosa que al fermentarse con levaduras producirá etanol.
- **Polisacáridos estructurales:** Comprenden la celulosa, las hemicelulosas y la lignina. La Celulosa está formado por cadenas lineales de celobiosa (D-glucopiranosil- $\alpha$ ). La hemicelulosa posee una estructura más variada, su cadena principal puede ser xilanos, glucuronoxilanos, arabinoxilanos, mananos y glucomananos. La lignina es un polímero construido a base de unidades de fenilpropanoides el cual puede tener tres tipos de unidades de cumaril, guacil y siringil. En la tabla 3 se tiene composición química de los polisacaridos de reserva de diferentes tipos de biomasa vegetal.

Mohammad, Abooali, Ashkan y Pourya(2018) describen que los polisacaridos estructurales estan compuestos de la siguiente forma: la celulosa esta compuesta de 48 por ciento de C, 52 por ciento de O y 6 por ciento de H; la lignina de 65 por ciento de C, 30 por ciento de O, y 6 por ciento de H. Los poderes calóricos de los polisacáridos son: para la lignina 27 MJ/kg, los extractivos 35,9 MJ/kg, celulosa 17,3 MJ/kg y hemicelulosa 16,2 MJ/kg. Además encuentro que el poder calórico en las coníferas es mayor a las latifoliadas, ya que estas tienen un mayor contenido de lignina y otros extractivos.

**Tabla 3: Composición química de los polisacáridos de reserva en la biomasa vegetal**

<b>Biomasa</b>	<b>Hemicelulosa (%)</b>	<b>Celulosa (%)</b>	<b>Lignina (%)</b>	<b>Extractivos (%)</b>
<b>Cascara de arroz</b>	18,47	42,20	19,40	-
<b><i>Bambusa sinospinosa</i></b>	14,44	62,33	13,01	2,52
<b>McClure</b>				
<b>Madera de <i>Fagus sp.</i></b>	34,40	40,90	24,80	-
<b>Paja</b>	27,20	34	14,20	
<b>Latifoliadas</b>	15-35	40-44	18-25	
<b>Coníferas</b>	20-32	40-44	25-35	

FUENTE: Bustamante et al (2016)

**b) Proteínas:** Son moléculas complejas formadas a partir de la unión de aminoácidos. Presentan propiedades particulares dependiendo de su estructura. Las fuentes de proteína son soja, maíz y gluten de trigo.

**c) Lípidos:** Son moléculas formadas por condensación del glicerol junto a ácidos grasos saturados o insaturados. Los lípidos tienen una gran variedad dependiendo de los ácidos grasos unidos al glicerol. La fuente de lípidos en las plantas son las semillas, de donde se obtienen aceites mediante el prensado o extracción con solventes.

### 2.2.3 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE UTILIZAR LA BIOMASA VEGETAL

Los estudios de IDAE (2007), Carrasco (2008), Madrid (2012) y Huelmo (2017) señalan las ventajas y desventajas de utilizar biomasa vegetal.

#### a) Ventajas

- Su utilización disminuye las emisiones de contaminantes de azufre, CO, HCl, NO<sub>x</sub> y material particulado. La biomasa no tiene compuestos clorados que producen dioxinas. Si es madera, no tiene o tiene muy poco azufre en su composición evitándose así emitir anhídrido sulfuroso, compuestos que al oxidarse provoca la lluvia ácida.
- El balance de CO<sub>2</sub> emitido es neutro. El CO<sub>2</sub> de la biomasa viva forma parte de un flujo de circulación continua entre la atmósfera y la vegetación. Se evita que exista un incremento de este gas en la atmósfera, si la biomasa utilizada se renueva con la misma velocidad que se degrada. Convirtiéndose así en fuente de energía inagotable y no contaminante.

- La biomasa con fines energéticos convierte un residuo en un recurso.
- La producción de biomasa es descentralizada y puede tener una incidencia social y económica en el mundo rural, fomentándose la creación de puestos de trabajo.
- Disminuye la dependencia de los combustibles fósiles.
- Tiene un coste muy inferior al de la energía convencional.
- Gran variedad de combustibles disponibles aptos para consumo en la misma caldera (independencia de suministro de combustibles).
- La implantación de cultivos energéticos en tierras abandonadas evita la erosión y degradación del suelo.
- Su utilización favorece la regeneración natural de la masa principal, y posibilita el crecimiento del arbolado, disminuye considerablemente el peligro de plagas e incendios.

#### **b) Desventajas**

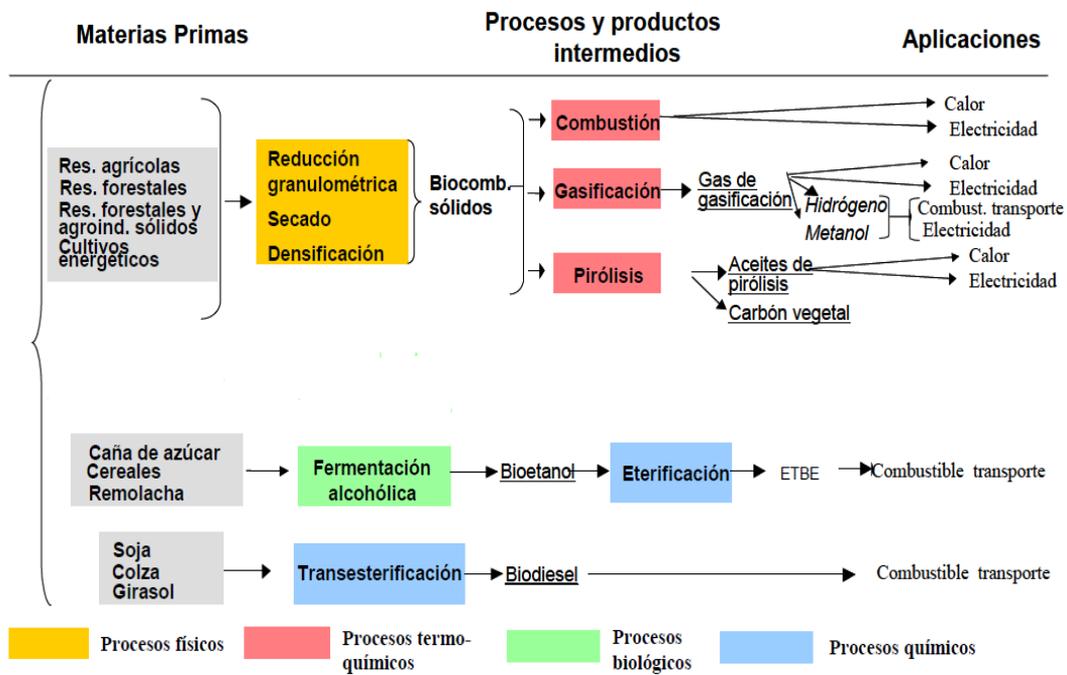
- Tiene un menor rendimiento energético en comparación con los combustibles fósiles.
- La materia prima es de baja densidad energética requiriéndose un mayor volumen y teniéndose problemas de transporte y almacenamiento.
- Es tenaz y fibrosa generándose dificultades para reducir su tamaño.
- Es heterogénea en composición y por contaminación con materiales extraños.
- Los canales de distribución de la biomasa no están tan desarrollados como los de los combustibles fósiles.
- La producción y disponibilidad de biomasa se ve afectada por su dispersión. Existiendo límites para el transporte y abastecimiento. Originándose altos costos de recolección, transporte, almacenamiento y manipulación de la biomasa.
- Algunos combustibles tienen altos contenidos de humedad, entonces se tiene que aplicar un proceso previo.
- Tienen un contenido de cenizas de bajo punto de fusión, los cuales ensucian y corroen los intercambiadores de calor en las calderas.

### **2.3 PROCESOS DE TRANSFORMACIÓN DE LA BIOMASA VEGETAL**

La biomasa para ser aprovechada como energía debe someterse a diferentes procesos, los que se describen a continuación (Carrasco,2008; Patiño, 2014) (Ver figura 4).

- Procesos termoquímicos: Está basada en la descomposición de la biomasa por medio del calor. Por ejemplo combustión, pirolisis y gasificación.

- Procesos de conversión biológica: Es la transformación de la biomasa por acción de microorganismos o enzimas. Por ejemplo la fermentación.
- Procesos químicos: aquí se encuentra la esterificación y modificaciones estructurales químicas.



**Figura 4: Procesos de conversión de la biomasa: materias primas utilizadas y aplicaciones**

FUENTE: Carrasco, 2008

### 3. BIOCOMBUSTIBLES

Los biocombustibles son una fuente de energía renovable, procesada a partir de biomasa, derivada de animales y vegetales. Su propósito final es liberar la energía contenida en sus componentes químicos, mediante una reacción de combustión. Según su apariencia puede encontrarse en estado líquido, sólido o gaseoso (Reyes, Orihuela, Aviña, Pérez, Carrillo y Rutiaga, 2015).

Los biocombustibles sólidos más importantes son los constituidos por material lignocelulósico procedentes del sector agrícola, forestal o de las industrias de transformación que producen residuos. Entre ellos tenemos a los restos de poda, aclareos de masas forestales, corteza, cáscaras de frutos. Mediante la combustión de esta biomasa se obtiene energía que se aprovecha directamente como energía térmica o se transforma en energía eléctrica (Romero, 2010). Por su parte Costa (2013) describe las características de un biocombustible el cual es

ser de origen orgánico, renovable y sostenible. En el siguiente apartado se describe la clasificación de los tipos de combustibles.

### 3.1 CLASIFICACIÓN DE LOS BIOCOMBUSTIBLES SEGÚN SU APARIENCIA FÍSICA

Camps y Marcos (2008) clasifican a los biocombustibles sólidos según su aspecto físico en sólido, líquido y gaseoso. En la tabla 4 se ejemplifica la clasificación

**Tabla 4: Clasificación de los biocombustibles**

<b>Aspectos físicos</b>	<b>Biocombustibles</b>
<b>Sólidos</b>	Leñas y astillas Paja de cereales y biomasa de cardo Biocombustibles sólidos densificados Carbón vegetal
<b>Líquidos</b>	Líquido piroleñoso Líquido de hidrólisis Bioetanol y bioalcoholes Aditivos oxigenados Aceite vegetal Metiléster
<b>Gases</b>	Biogás de origen muy diverso

*FUENTE: Camps y Marcos (2008)*

### 3.2 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS, QUÍMICAS Y FÍSICO-QUÍMICAS DE LOS BIOCOMBUSTIBLES

Según el tipo de biocombustible estos presentaran diferentes características físicas, químicas y físico-químicas las cuales se describen en la tabla 5

**Tabla 5: Características físicas, químicas y fisicoquímicas de biocombustible**

<b>Físicas</b>	1. Forma	-
	2. Aspecto (color, brillo)	-
	3. Densidades	kg/dm <sup>3</sup>
	4. Peso del estéreo <sup>(1)</sup>	kg/estéreo
	5. Humedades	%
	6. Superficie especifica <sup>(1)</sup>	Cm <sup>2</sup> /dm <sup>3</sup>
	7. Porcentaje de corteza <sup>(2)</sup>	%
	8. Friabilidad	Índices
	9. Resistencia a la comprensión	Kg/cm <sup>2</sup>
	10. Viscosidad <sup>(3)</sup>	Poise
	11. Índice de Kuop <sup>(3)</sup>	Índice Kuop
	12. Temperatura de ebullición <sup>(3)</sup>	°C
	13. Otros índices físicos exclusivos de combustibles líquidos y gaseosos	Índices
<b>Químicas</b>	1. Composición química elemental	%
	2. Composición química por compuestos	%
	3. Composición química de cenizas	%
	4. Composición química de los gases de escape	%
	5. Poder caloríficos	kJ/kg, kcal/kg
	6. Índice de yodo <sup>(3)</sup>	Índice de yodo
	7. Índice de octano y cetano <sup>(3)</sup>	Índice
<b>Físico-químicas</b>	1. Coeficiente de conductividad térmica	W/m.s
	2. Combustibilidad : temperaturas y tiempos de combustión	°C,
	3. Inflamabilidad: Temperatura y tiempo de inflamación. Temperatura máxima de la llama	°C
	4. Potencia calorífica	W/s
	5. Densidad energética y energía del estéreo <sup>(1)</sup>	kJ/dm <sup>3</sup> , kJ/ est

FUENTE: *Camps y Marcos (2008)*

1 Solo en biocombustibles solidos;

2 Solo en las leñas, podría emplearse en biocombustibles solidos densificados

3 Solo en biocombustibles líquidos

### 3.3 BIOCOMBUSTIBLES SÓLIDOS

Los biocombustibles sólidos son de naturaleza lignocelulósica cuyos componentes mayoritarios son celulosa, hemicelulosa y lignina (Fernández, 2006).

Su aprovechamiento se da de manera directa en procesos de conversión energética pero antes se realizan transformaciones físicas como el astillado, molienda y secado (Goche, Domínguez y Montiel; Palacios y Hernández 2015). Luego con la tecnología apropiada se utilizaran para producir calor y/o electricidad, aunque una mayor parte es utilizada directamente como leña para los hogares (Sánchez, 2012).

#### 3.3.1 TIPOS DE BIOCOMBUSTIBLES SÓLIDOS

En el figura 5 se presentan los diferentes tipos de biocombustibles sólidos propuestos por Goche et al (2015) y Clarke, Eng y Preto (2011), en la tabla 6 se comparan las características de los biocombustibles sólidos y en la tabla 7 se comparan las ventajas y desventajas de los mismos.



**Figura 5: Tipos de biocombustibles solidos**

(1) Leña;(2) Astillas;(3) Carbón vegetal;(4) Briquetas (5) Pellets

*FUENTE: Goche et al (2015) Clarke et al (2011)*

**Tabla 6: Comparación de las características de los biocombustibles**

<b>CARACTERÍSTICAS</b>	<b>ASTILLAS</b>	<b>LEÑA</b>	<b>BRIQUETAS</b>	<b>PELLETS</b>
<b>Tamaño típico de las partículas (mm)</b>	<sup>2</sup> Clase 1: Dimensión mayor <31,5 <hr/> <sup>2</sup> Clase2: dimensión mayor <63	<sup>2</sup> Longitud 100-1000	<sup>2</sup> Diámetro >25	<sup>2</sup> Diámetro <25
<b>Poder Calórico Inferior (Kcal/kg)</b>	3300-3700 <sup>2</sup>	2500-3800 <sup>2</sup>	3000-4300 <sup>22</sup>	3000-4300 <sup>2</sup>
<b>Contenido de humedad (%)</b>	=<20-30 <sup>2</sup>	<=20 <sup>2</sup>	<20 <sup>2</sup>	8-12 <sup>1</sup>
<b>Densidad aparente (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	328 <sup>1</sup>	445* <sup>1</sup>	1000 <sup>2</sup>	620-650 <sup>1</sup>
<b>Contenido de Cenizas (%)</b>	1-2,8 <sup>3</sup>	0,72 <sup>4</sup>	0,7 <sup>2</sup>	<0,4 <sup>5</sup>

\*kg/m3 apilado

FUENTE: (1) *Eliseo et al 2008*, (2) *IDAE 2009*, (3).*Fernández et al (2014)*; (4) *García y Pañi (2013)*; (5) *Enplus (2011)*

**Tabla 7: Comparación de las ventajas y desventajas de los biocombustibles**

<b>Biocombustibles</b>	<b>Homogeneidad del producto</b>	<b>Almacenamiento</b>	<b>Transporte</b>	<b>Alimentación de combustibles</b>
<b>Pellets</b>	Producto estandarizado. Propiedades uniformes. Baja humedad.	Poco espacio de acopio.  Almacenamiento aislado y seco.	Costos bajos debido a su alta densidad.	Por su forma cilíndrica, lisa y tamaño pequeño, es de fácil movimiento y carga para los equipos de combustión.
<b>Briquetas</b>	Producto estandarizado Propiedades uniformes. Baja humedad.	Poco espacio de acopio.  Almacenamiento aislado y seco.	Costos bajos debido a su densidad.	La alimentación al equipo de combustión es de manera manual.
<b>Leña</b>	Producto heterogéneo. Contenido de humedad diverso.	Almacenamiento techado	Uso intensivo de transporte.	Carga manual.
<b>Astillas</b>	Composición variable. Grado medio de estandarización.	Grandes espacio por su baja densidad. El almacenamiento aireado.	Uso intensivo de debido a su baja densidad.	Automatizada.

*FUENTE: IDEA (2009) Fredes (2014) y CENER (2015)*

<b>Biocombustible</b>	<b>Proceso productivo</b>	<b>Impactos</b>	<b>Usos alternativos</b>
<b>Pellets</b>	Su elaboración comprende operaciones de trituración, secado, tamizado, pelletizado, enfriado, envasado y almacenamiento.  Requiere maquinaria de alto costo inicial	Su fabricación no ejerce presión sobre el medioambiente al ser elaborados en base a residuos.	Ninguno, solo generación de calor y electricidad
<b>Briquetas</b>	El proceso consiste en trituración, secado, briqueteado, enfriado, envasado y almacenado. Requiere de maquinaria de alto costo inicial	Su elaboración favorece la limpieza y el cuidado del medioambiente.	Ninguno, solo generación de calor y electricidad
<b>Leña</b>	Las etapas de producción son trozado, desrame, transporte, fraccionamiento y secado al aire libre.  Posee menor costo producción.	Su extracción no regulada ejerce presión sobre los bosques y ecosistemas. El uso de la leña favorece la generación de material particulado y contaminación atmosférica.	Generación de calor y fabricación de carbón
<b>Astillas</b>	Proviene del corte y aserrado de madera.  Tiene un menor costo de producción por lo menores procesos que se realizan	Su uso previene problemas ambientales como contaminación de suelos y cursos de agua, además de riesgos de incendios y autocombustión	Carbón, briquetas, pellets, ladrillos para la construcción, paneles aglomerados y MDF. Sustrato para el suelo y medio de cultivo de algunos hongos comestibles.

FUENTE: IDEA (2009) Fredes (2014) y CENER et al (2015)

## **4. PELLETS**

Los pellets son biocombustibles sólidos de forma cilíndrica hechos de aserrín, viruta o polvo de madera y se obtienen, densificando a la madera, mediante un prensado con equipos especiales. Estos deben cumplir con características establecidas de acuerdo a normas de calidad, para ser usadas como combustible domiciliario, comercial o industrial (Segura, 2015).

Camps y Marcos (2008) señalan que los pellets se caracterizan por tener un bajo contenido de humedad, alta densidad energética, ser de forma cilíndrica con diámetros comprendidos entre 7 y 22 mm y longitudes de 35 a 65 mm. Su fabricación se realiza con alta presión, sin la necesidad de utilizar algún tipo de adhesivo. Otra de las características que tienen los pellets es tener un contenido de humedad menor a 10 por ciento y una durabilidad mecánica mayor a 97 por ciento (CENER., 2015).

### **4.1 PRETRATAMIENTOS ANTES DE SU PRODUCCIÓN**

Con el objetivo de optimizar el pelletizado se debe realizar algunos pretratamientos. Esto se realiza porque la biomasa proviene de residuos, siendo estos heterogéneos en humedad y granulometría. Al tener esta variabilidad se debe aplicar diferentes pretratamientos que ayudaran a obtener un tamaño de granulometría y contenido de humedad adecuado. Cancho (2015) describe que si bien los pretratamientos representan un costo estos ayudaran a añadir y garantizar un valor al producto. A continuación se describen los pretratamientos.

#### **4.1.1 ASTILLADO DE LA BIOMASA**

El astillado es un proceso físico que consiste en reducir el tamaño de las partículas, permitiendo mejorar las actividades de almacenamiento, carga y transporte (Lerma, 2015). La obtención de partículas pequeñas dependerá de la fuerza de tracción de la madera, de la flexibilidad del material por astillar, de la velocidad de alimentación, de los revoluciones por minuto, del número y filo de las cuchillas. Características que se debe tener presente al momento de utilizar una astilladora (Correa et al, 2013).

#### **4.1.2 SECADO**

La biomasa tiene un contenido de humedad que va de 5 a 100 por ciento (base seca), debido a esta variabilidad de humedad se requiere un secado previo para su posterior utilización (Pérez , Renedo, Ortiz y Mañana ,2008). Cancho (2015) menciona que el secado es un

pretratamiento para reducir la humedad además ayuda a mejorar la eficacia del transporte y eficiencia en el proceso de conversión térmica.

Los tipos de secado son el natural y el artificial. En el secado natural se aprovechan las condiciones ambientales. Su eficiencia se ve influenciada por las características climáticas, la forma de la pila, el tamaño de los residuos y la propia naturaleza del material a secar. El secado artificial se utiliza cuando la biomasa tiene un contenido de humedad superior al 50 por ciento lo cual generara problemas en el transporte y una baja eficiencia en el proceso de conversión térmica. Los equipos para realizar el secado artificial son secadores de neumáticos o rotatorios (Cancho, 2015).

#### **4.1.3 MOLIENDA Y TAMIZADO**

Estas operaciones se realizan después del astillado para obtener productos más finos como tener un tamaño de partícula inferior a 5 mm. Los equipos utilizados para la molienda son molino de martillo o molino de bolas (Cancho, 2015).

El tamizaje es la operación que permite homogenizar el tamaño de las partículas contribuyendo a mejorar la calidad de las partículas y eliminar fracciones indeseadas (Ngangyo, Foroughbak, Carrillo y Salas, 2015). El tamizaje brinda la posibilidad de aprovechar las distintas fracciones granulométricas (Cancho, 2015).

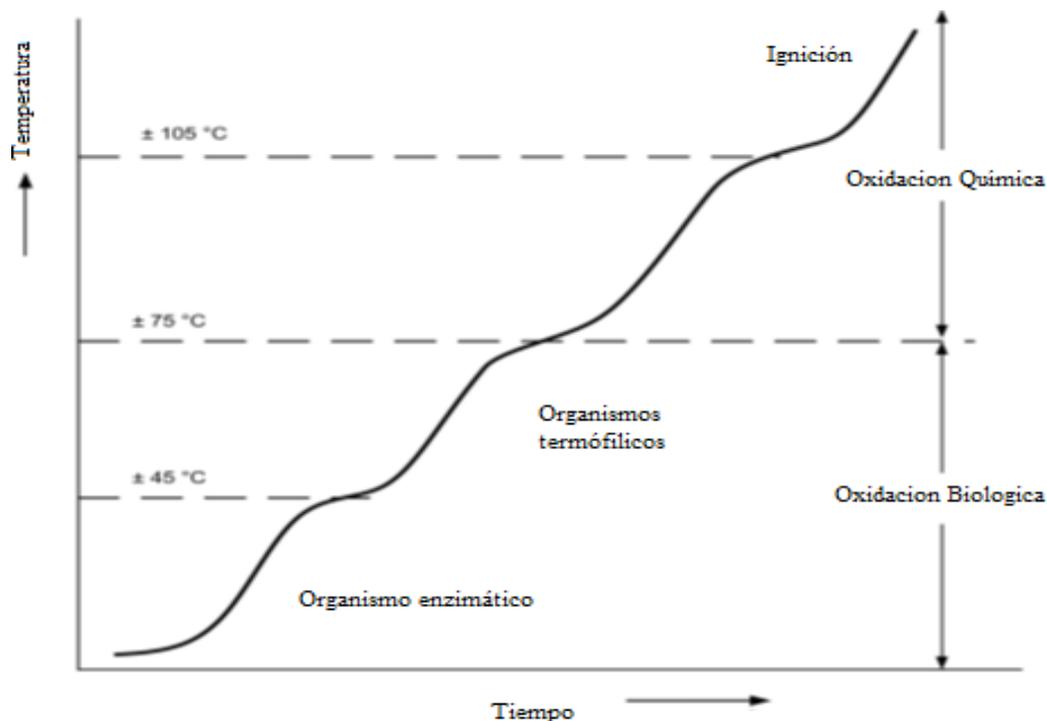
#### **4.2 VARIABLES EN LA OBTENCIÓN DE PELLETS**

Las variables que influyen en la calidad de los pellets son: el tamaño de partícula, el contenido de humedad, la presión, la temperatura y los aglomerantes (Tumuluru, Wright, Hess y Kenney, 2011) las cuales se mencionan a continuación.

##### **4.2.1 TAMAÑO DE PARTÍCULAS**

El tamaño de partículas influye en la durabilidad mecánica de los pellets (Kaliyan y Morey, 2009). Por ejemplo Kaliyan y Morey (2009) señalan que al utilizar partículas finas (<1mm) se tiene mayor durabilidad, en comparación con partículas grandes (>1mm). Esto debido a que existe una mayor superficie de contacto. Obernberger y Thek (2010) señalan otro tamaño de partícula para producir pellets, recomendando utilizar partículas con un tamaño menor a 5 mm.

Con respecto a una desventaja al utilizar las partículas finas Lehtikangas (2001) menciona que estas pueden perturbar los sistemas de alimentación, contribuir a generar fuego y riesgo de explosión durante la manipulación y almacenamiento. Para aclarar cómo se generarían los riesgos de explosión Sjaak y Koppejan (2008) lo ejemplifican con la figura 6 describiendo que el almacenamiento de partículas finas con un contenido de humedad entre 20 y 30 por ciento permite la degradación biológica y química. Estas degradaciones dan como resultado el desarrollo de calor causando así la auto-inflamación.



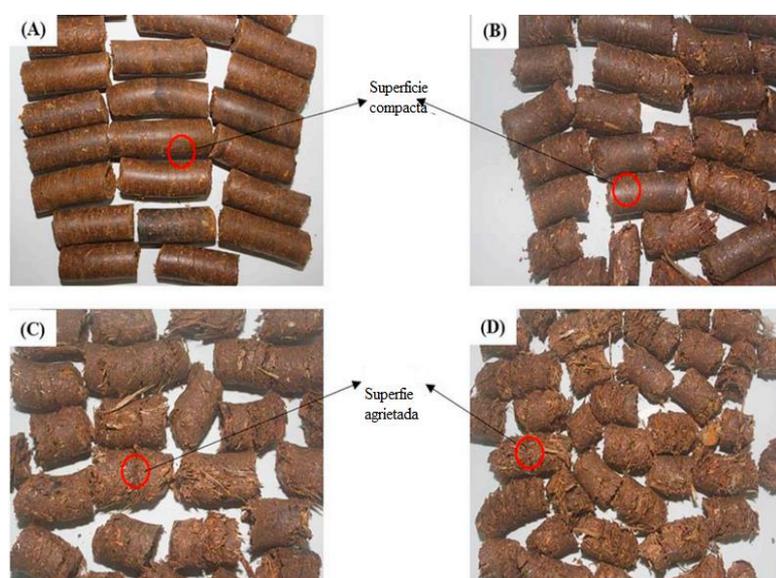
**Figura 6: Desarrollo de la temperatura y procesos responsables del autocalentamiento de la biomasa**

*FUENTE: Sjaak y Koppejan (2008)*

Lehtikangas (2001) señala que las partículas finas son más higroscópicas y tienen una mayor área superficial lo cual permite el crecimiento microbiano. Por otro lado la desventaja de utilizar partículas grandes es que están generan puntos de fisuras en los pellets; disminuyendo la calidad del producto (Kaliyan y Morey, 2009).

#### 4.2.2 CONTENIDO DE HUMEDAD

El contenido de humedad influye en el proceso de pelletizado, ya que este actúa como un aglomerante y lubricante (Mani, Tabil y Sokhansanj 2003 y Kaliyan y Morey, 2009). El agua como aglomerante fortalece las uniones; ayuda a desarrollar fuerzas de Van der Waals, aumentando así el área de contacto entre ellas (Grover y Mishra, 1996). El agua como lubricante disminuye la fricción que se genera en la matriz de la pelletizadora, lo cual permite una disminución en el consumo de energía (Mani et al, 2003 y Kaliyan y Morey, 2009). Las fuentes para describir cómo actúa el agua en los pellets y en el proceso se argumenta con los siguientes investigadores: Mani et al (2003) obtuvo pellets fuertes y libres de grietas con un contenido de humedad de 8 a 10 por ciento. Anh, Chang, Lee, Choi, Cho, Han y Yang (2014) encontraron que al elaborar pellets con un contenido de humedad superior a 10 por ciento el producto es débil en durabilidad mecánica y el proceso de fabricación se vuelve errático. Otro ejemplo del porque el densificado se dificulta con contenidos de humedad alto lo encontró Zapata (2016), describiendo que este problema se da debido a la incompresibilidad del agua, ya que existe mucha humedad atrapada dentro de las partículas, evitando el aplastamiento completo del producto en la pelletizadora. Entonces el elegir el contenido de humedad correcto favorecerá a que se desarrollen propiedades de auto- unión en las sustancias lignocelulosicas (Mani et al, 2003) (ver figura 7).



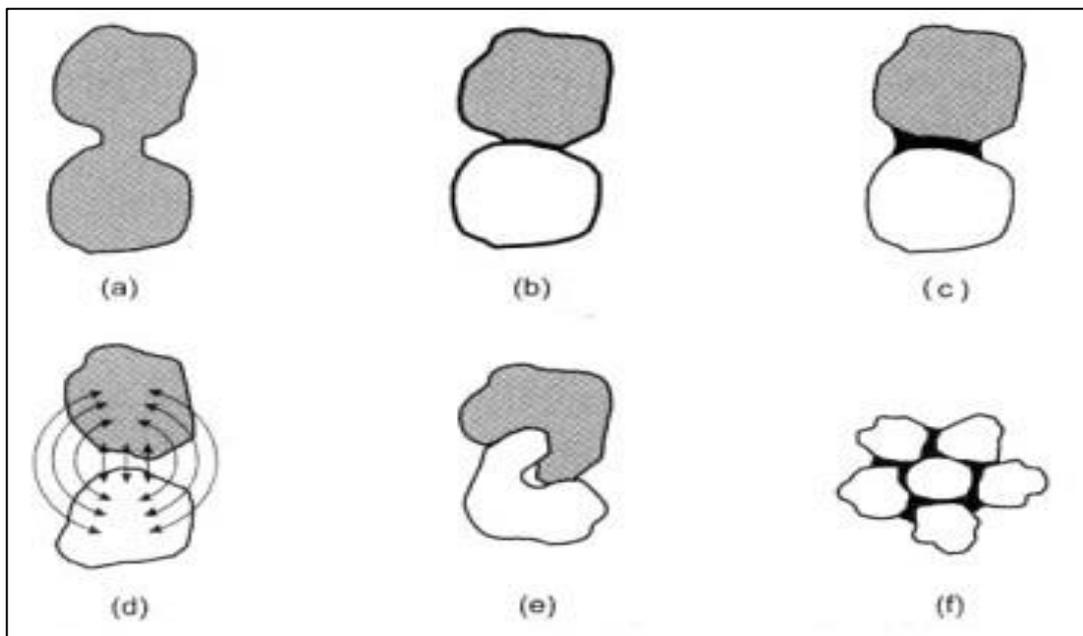
**Figura 7: Pellet con diferentes contenido de humedad:** (A)  $5 \pm 1$  %; (B)  $15 \pm 1$ , (C)  $25 \pm 2$ % y (D)  $35 \pm 2$ %

*FUENTE: Priyabrata, Mahajani y Arora (2018)*

### 4.2.3 PRESIÓN

Uno de los objetivos de realizar el pelletizado es el de aumentar la densidad, esto se logra a través de la presión ejercida por la pelletizadora. La presión ejercida es la encargada de compactar la biomasa, reducir los espacios y promover la aglomeración de las partículas (Zapata, 2016). Las presiones utilizadas para obtener pellets de calidad van de 100 a 160 Mpa (Kaliyan y Morey 2009). Las altas presiones aplicadas generan aglomeración en las partículas a través de deformaciones elásticas y plásticas. Ambas deformaciones logran aumentar el tamaño de la partícula, haciendo que estas estén más cerca y favoreciendo la formación de fuerzas y enlaces (Mani et al, 2003).

Las fuerzas de unión que actúan en las partículas individuales en los productos densificados se clasifican en 5 grupos principales. Puentes sólidos, fuerzas de adhesión (unen superficies de distintas sustancias) y cohesión (fuerzas que actúan dentro de una misma sustancia), tensión superficial y presión capilar, fuerzas de atracción entre sólidos, matriz de aglomerantes (Pietsch ,2002) En la figura 8 se observa la representación de los mecanismos de aglomeración.



**Figura 8: Representación de los principales mecanismos de aglomeración**  
a) **Puente sólidos; b) fuerzas de adhesión y cohesión; c) tensión superficial y presión capilar; d) fuerza de atracción entre sólidos; e) enlaces mecánicos; f) Matriz de aglomerantes**

*FUENTE: Pietsch (2002)*

#### **4.2.4 TEMPERATURA**

La temperatura aplicada en el proceso de pelletizado activa la acción aglomerante y promueve la deformación plástica de las partículas. El calor transmitido durante el proceso hacia los pellets puede ser por fricción, flujo de calor (resistencia o aceite) o acondicionamiento con vapor (Kaliyan y Morey, 2009). En el caso de la biomasa vegetal el calentamiento asegura que el contenido de lignina se libere, contribuyendo a aumentar la unión de las partículas y así formar un buen producto. (Ngangyo et al, 2015).

La lignina actúa como un aglomerante natural conforme se va incrementando la temperatura en el proceso de pelletizado, ella pasa de un estado sólido a líquido al aumentarse la temperatura y cuando se enfría pasa del estado líquido al sólido. Este cambio realizado por la lignina permite una mayor adhesión entre las partículas (Ngangyo et al, 2015). Sin embargo, el reblandecimiento de la lignina solo tiene lugar si el material que lo contiene se encuentra con un contenido de humedad adecuado (Enders, Hanley, Whitman, Joseph y Lehmann, 2012).

#### **4.2.5 AGLOMERANTES**

Los aglomerantes son usados para favorecer el proceso de adhesión y cuando el pellets no cumple con los requisitos de comercialización con respecto a la resistencia y durabilidad de los pellets (Ngangyo et al, 2015). Estos se utilizan en la cantidad de 0,5 a 5 por ciento respecto al peso de los pellets (Tabil, 1996).

Ahn et al (2014) y Mani et al (2003) señalan algunos ejemplos de aglomerantes: proteínas, aceites, lignosulfatos (subproductos de la industria del papel) celulosa modificada, melaza y almidón. Si bien el utilizar aglomerantes favorecerá la adhesión en los pellets, también se debe tener presente que al utilizarlos aumentaran los costos y algunos pueden ser contaminantes (Ngangyo et al, 2015).

### **4.3 PROPIEDADES FISICAS DE LOS PELLETS**

#### **4.3.1 DIMENSIONES DE LOS PELLETS**

Los pellets son de forma cilíndrica y tienen un tamaño menor que las briquetas. Con respecto al diámetro los pellets no debe superar los 25 mm, y sus dimensiones van de 5 mm a 25 mm. La longitud de los pellets es variables, y puede tener valores que oscilan entre los 10 a 30 mm, hasta a alcanzar longitudes de 70 mm. (Arpi y Calderón, 2010). Por

otro lado la norma ENPLUS EN-16 127 detalla cuales deben ser las medidas adecuadas para tener pellets de calidad, dando dimensiones para el diámetro entre 6 y 8 mm y para la longitud valores entre 3,15 mm a 40 mm.

Lehtikangas (2001) describe que la longitud es un parámetro que permite describir la sensibilidad a la rotura durante el almacenamiento. Los pellets tienen una menor resistencia mecánica cuando tienen una mayor longitud, sufriendo rupturas, partiéndose y generando finos, los cuales pueden bloquear los sistemas de alimentación (Palacios y Hernández, 2015). Respecto a cómo se establece el diámetro y la longitud en la producción de pellets, el diámetro depende del tamaño de la boquilla de la pelletizadora, y la longitud depende de la distancia donde es colocada la cuchilla que rompe los pellets salidos por la boquilla (Oberberger y Thek, 2010). Por otro lado, el conocer la forma y el tamaño del combustible servirá para elegir la tecnología de alimentación y el tipo de horno de combustión; al tener un biocombustible grande, los aparatos de alimentación tienen que ser más robustos. (Oberberger y Thek, 2010).

#### **4.3.2 CONTENIDO DE HUMEDAD**

El contenido de humedad describe la cantidad de agua libre contenida en el combustible. Este parámetro condiciona el comportamiento del combustible, ya que determina la energía que se puede obtener por medio de la combustión. Ya que al quemar el pellets, primero se necesita evaporar el agua, antes que el calor esté disponible, obteniéndose un poder calorífico menor con un contenido de humedad alto. Además un alto contenido de humedad reduce la temperatura de combustión por debajo del óptimo dando lugar a una combustión incompleta, generando problemas en las calderas debido a escorias y exceso de producción de humos. (Exposito, 2015 y Lehtikangas, 2000)

Otra característica referente a la humedad es que los materiales biomásicos interactúan con el medio ambiente, es decir adsorben y liberan humedad. Esta característica de higroscopicidad se limita en los pellets con las superficie dura que la rodea; la cual es originada por las altas presiones recibidas; sin embargo los extremos de los pellets no tienen un superficie dura lo cual los hace susceptible a ganar o perder humedad por los extremos. (Lehtikangas, 2000)

### **4.3.3 DENSIDAD**

La densidad es la cantidad de materia que contiene una unidad de volumen. Para un material sólido, la unidad de volumen que se toma como referencia puede variar en función de si se consideran o no los espacios interparticulares e intraparticulares. En función de esto, se tienen diferentes valores de densidades (San Miguel y Gutiérrez, 2015).

- Densidad aparente o densidad a granel: es la que describe la cantidad de materia en una unidad bruta de volumen (incluyendo espacios inter e intraparticulares). Este parámetro es de interés para los suministros de combustibles en base a volumen.
- Densidad real: describe la densidad de un material sin tener en cuenta los espacios interparticulares, el valor final no depende de su granulometría.
- Densidad absoluta: describe la densidad del material sin tener en cuenta los espacios interparticulares ni los poros internos de las partículas.
- Densidad energética: La densidad energética representa la cantidad de energía por unidad de volumen que contiene el combustible. La determinación de este valor requiere conocer el poder calorífico y la densidad másica del combustible.

Los factores que influyen en la densidad del pellets son: la materia prima empleada; ya que a mayor densidad de la materia prima mayor será la densidad del producto final, la presión ejercida por la prensa en el proceso de fabricación, el contenido de humedad; ya que si el contenido de humedad aumenta la densidad de los pellets disminuye y el tamaño de las partículas (Camps y Marcos, 2008). Ngangyo et al (2015) describen que la biomasa al ser pelletizada incrementa su densidad aparente de unos 100-250 kg/m<sup>3</sup> a valores de 600-800 kg/m<sup>3</sup>; haciendo que los costos de transporte y almacenamiento disminuyan. Por ejemplo Mani, Tabil y Sokhansanj (2006) confirman que si se tiene una densidad mayor a 600 kg/m<sup>3</sup> el transporte y almacenamiento del producto será eficiente.

### **4.3.4 FRIABILIDAD Y DURABILIDAD**

La friabilidad y la durabilidad se definen como la capacidad de un cuerpo de permanecer intacto o de resistir al choque y/o fricción (Vinterback, 2004). Esta resistencia depende de la eficacia de los enlaces entre las partículas de los pellets. Los cuales se ven influenciados por el tipo de materia prima, tamaño y distribución de las partículas, el contenido de humedad, el acondicionamiento de vapor o precalentamiento en la alimentación, la presión ejercida y la adición de aglutinantes (Kaliyan y Morey, 2009 y Ahn et al, 2014).

La susceptibilidad al desgaste mecánico trae consigo inconvenientes como la generación de finos o polvo. Estas partículas pequeñas al generarse en el transporte y almacenaje pueden causar alteraciones y perturbaciones en los sistemas de alimentación de las calderas, contribuir al riesgo de auto ignición y generar combustiones no homogéneas (Lehtikangas, 2000 y Termmerman, Rabier, Jensen, Hartmann y Bohn 2006).

Existen diferentes manera de evaluar la friabilidad de los pellets pero todas tiene en común el mismo objetivo, obtener un pellets con un calidad aceptable (Zapata, 2016). Ahora para elegir una evaluación es necesario conocer los tipos de movimientos y cargas a los que serán sometidos los pellets porque existen diferentes tipos de ruptura; las rupturas son: volumétrica y superficial. La ruptura volumétrica es cuando el pellets se rompe por completo a lo largo de una zona de debilidad en parte más pequeña. La ruptura superficial es cuando se forman pequeños fragmentos y estos se desprenden de la superficie del pellets debido a la abrasión (Zapata 2016 cita a Teo et al 1991).

#### **4.4 PROPIEDADES QUÍMICAS DE LOS PELLETS**

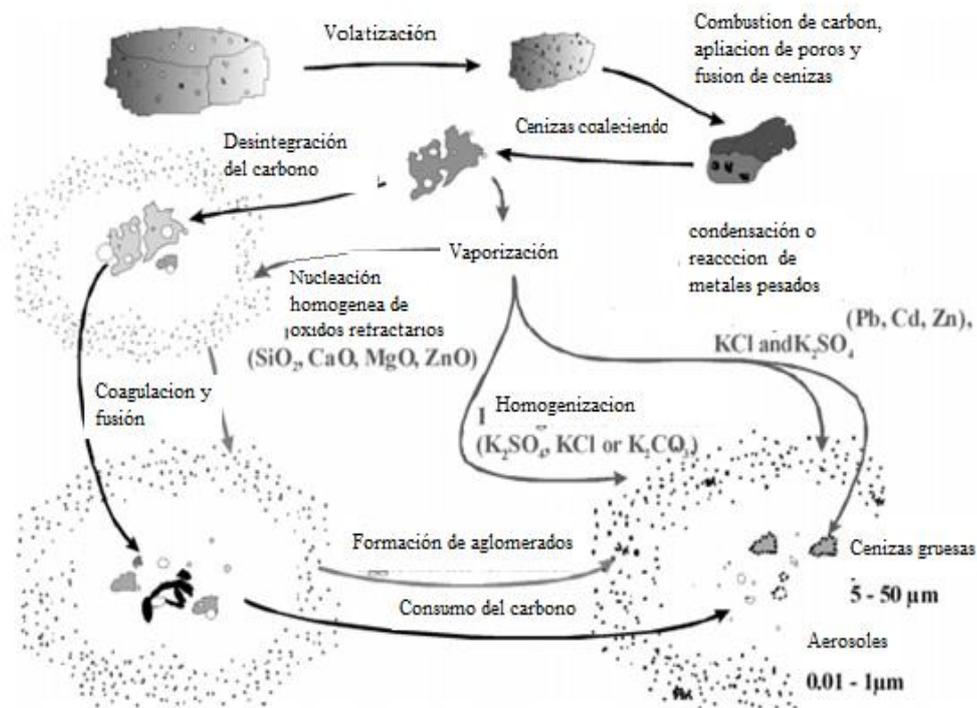
##### **4.4.1 PODER CALÓRICO**

El poder calórico es la cantidad de energía desprendida por un kilogramo de combustible al quemarse (Vega-Nieva, Fernández, Ortiz, y Corral-Rivas, 2015). Pérez et al (2008) indican que el poder calórico depende de la composición química del combustible y tiene una disminución proporcional con el contenido de humedad. Rodríguez (2009) señala que se tendrá un alto poder calórico si los pellets son hechos de especies que presentan un alto contenido de lignina y extractivos. Vega –Nieva et al (2015) describen los dos tipos de poder calórico

- **Poder calórico superior:** es el calor desprendido en una combustión completa, con presión constante y temperatura de 25°C cuando toda el agua inicialmente presente en estado condensado al estado líquido.
- **Poder calórico inferior:** es el calor desprendido en su combustión total, en las condiciones de presión constante y 25°C de temperatura, aquí se deduce el calor de vaporización del agua contenida en la muestra o formada por oxidación.

#### 4.4.2 CONTENIDO DE CENIZAS

El contenido de cenizas es la cantidad de material sólido no combustionado por kilogramo de material. Figura 9 podemos observar la formación de las cenizas en la combustión de la biomasa. El contenido de cenizas es un parámetro que ayuda a predecir problemas en la combustión dentro de las calderas (Pérez et al, 2008). Problemas que representan un alto riesgo de corrosión y formación de escorias que limitan el funcionamiento de la caldera al presentar sinterizados (Vega-Nieva et al ,2015).



**Figura 9: Mecanismos implicados en la formación de cenizas en la combustión de la biomasa**

FUENTE: Sjaak, V. L., & Koppejan, J. (2008) basado en CHRISTENSEN, K. A., (1995).

La concentración de cenizas es muy variable y depende de muchos factores, como las condiciones de desarrollo de las plantas, la ubicación geográfica, la radiación y la calidad del suelo (Vassilev, Andersen y Vassileva, 2013). Si la concentración de ceniza es alta, esto se puede corregir con pretratamientos tal como lo señalan Vassilev *et al*, (2013) como el utilizar combustibles con bajo nivel de sílice, reducir la temperatura de combustión, enfriar con agua las zonas de combustión, y agitar regularmente las cenizas.

Otro factor que influye en el contenido de cenizas es el tamaño de partículas ya que Rodríguez (2017) encontró diferencias significativas entre los contenidos de cenizas de astillas cribadas con mallas de 16 mm y 8 mm siendo más favorables el primer tamaño de

mallá, disminuyéndose el contenido de cenizas al incluir un menor porcentaje de fracción fina.

En cuanto al porcentaje de cenizas si este supera el 4 por ciento puede conducir a la corrosión de los quemadores o calderas y causar el desgaste de los equipos por abrasión (Mande, 2009)

#### 4.4.3 MATERIAL VOLÁTIL

El material volátil es la combinación de carbono, hidrogeno y compuestos gaseosos originados por la ruptura de los enlaces químicos en la descomposición del material (Castell, Cadavid, Campos, Flotats, Garcia, Gaya y Velo, 2005). El contenido del material volátil depende de la velocidad de combustión, ya que un combustible rico en volátiles se desprenderá más rápidamente, originando una disminución de masa y formación de alquitranes y gases. La cantidad de material volátil para la biomasa se encuentra entre 70 y 86 por ciento (Sjaak y Koppejan, 2008).

### 4.5 PROPIEDADES FISICO-QUIMICAS

#### 4.5.1 TERMOGRAVIMETRÍA

Sierra, Gomez, Pérez y Morante (2010) definen a la termogravimetría como una técnica de análisis térmico en la que se determina la pérdida o ganancia de masa de una muestra en función de la temperatura.

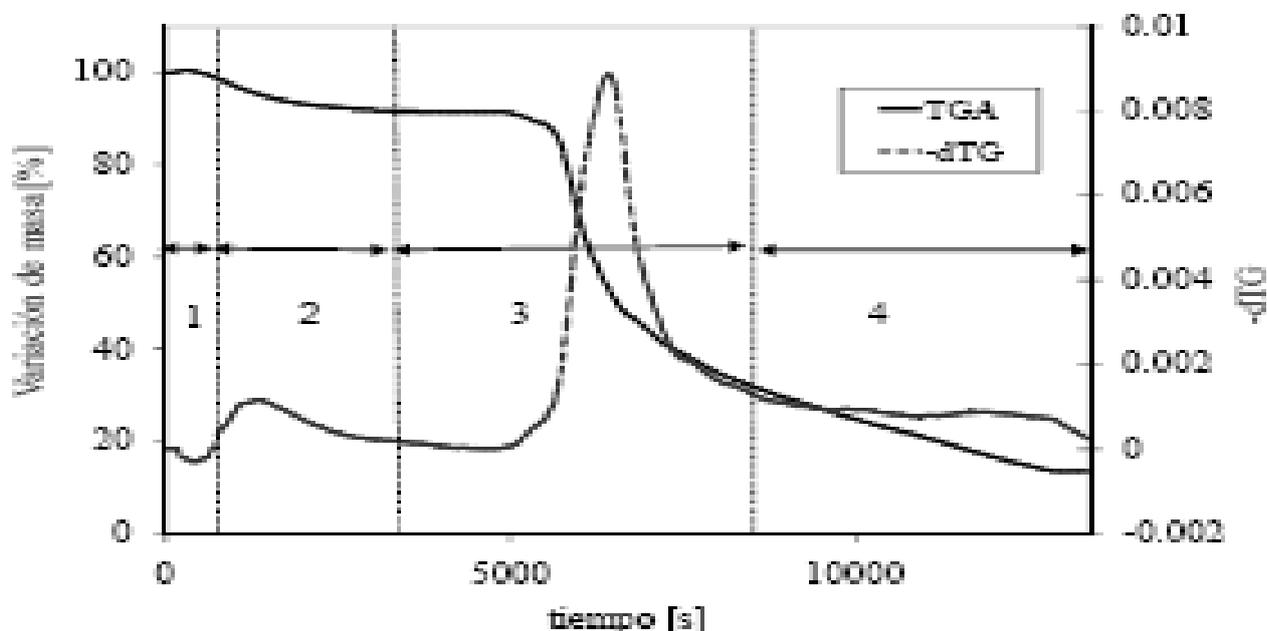


Figura 10: Curva termogravimétrica para una muestra de biomasa

- (1) Secado; (2) descomposición térmica; (3) combustión de gases volátiles (4) combustión de fracción carbonizada.

FUENTE: Melgar, Borge y Pérez (2008)

En la figura 10 se muestra un termograma, conocido también como curva de descomposición térmica. Mediante esta grafica se representa la variación de la masa en función de la temperatura o el tiempo.

A partir de las gráficas termogravimétricas podemos reconocer las fases de la combustión de la biomasa tal como lo describe San Miguel y Gutiérrez (2015).

Primero se debe identificar a la biomasa ya que está conformada por distintos componentes orgánicos e inorgánicos. Componentes que presentan una compleja estructura y diferentes comportamientos químicos y térmicos, haciendo que el proceso de combustión no sea homogéneo. En el proceso de combustión de biomasa lignocelulosa se suelen distinguir cuatro etapas, cada una de las etapas tiene lugar en un rango de temperatura determinada, las cuales se describen a continuación.

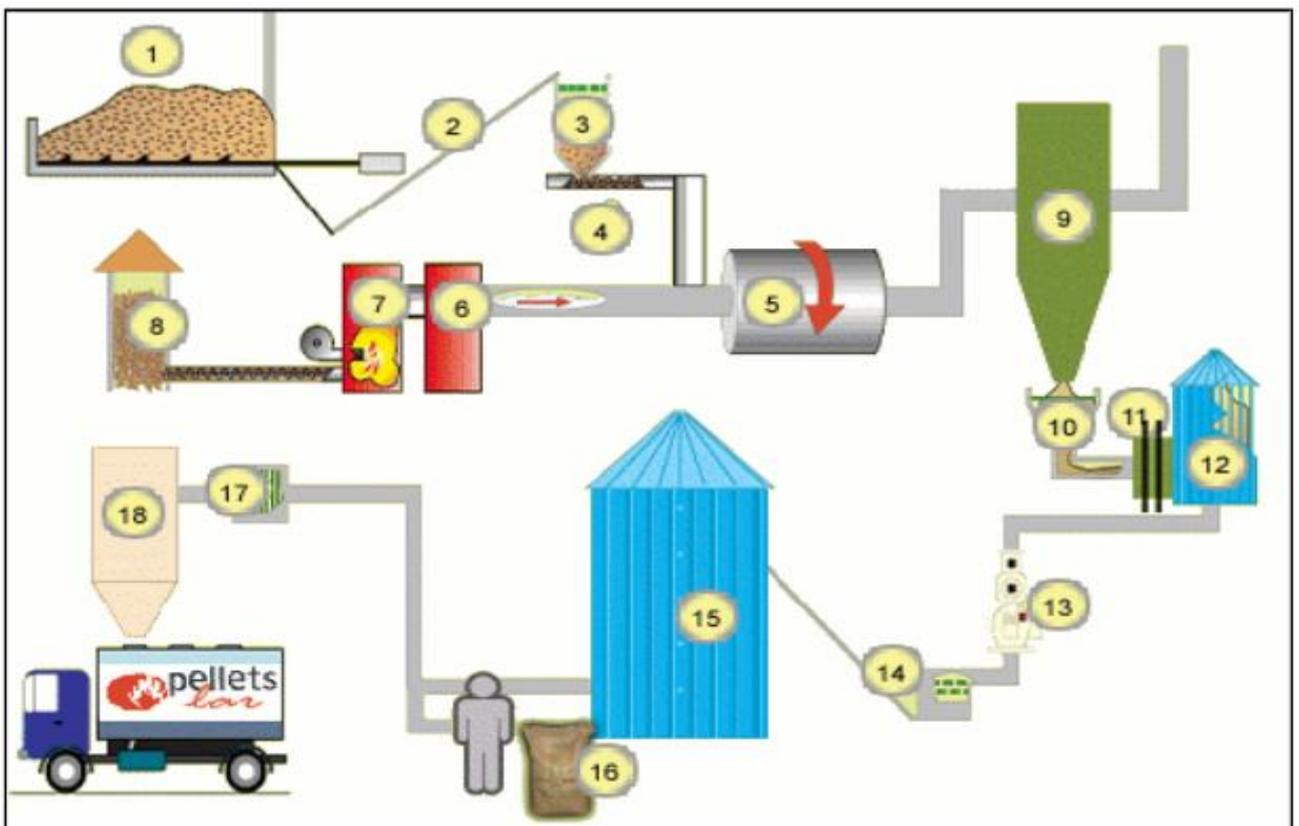
- **Etapa 1 secado:** es la etapa que implica la evaporación del agua libre presente en la biomasa. Esta etapa es endotérmica debido a la elevada entalpia de evaporación del agua ( $\Delta H_{VAP} = 2257 \text{ kJ/kg}$ ) es por ello que la presencia de humedad en el combustible implica una reducción en la temperatura de combustión, lo que puede incidir en una mayor formación de compuestos parcialmente oxidados como el  $\text{CO}_2$  y partículas. Estos compuestos son contaminantes y su formación supone una reducción en la eficiencia energética del proceso.
- **Etapa 2 de descomposición térmica y pirolítica:** la descomposición térmica de los polímeros que conforman la biomasa lignocelulosa (celulosa, hemicelulosa y lignina) tienen lugar a temperaturas entre 200 y 600 °C. Esta etapa se registra en la curva TG como una pérdida de peso que inicia sobre los 200°C. Durante la etapa pirolítica, la biomasa se transforma en un residuo carbonizado, una fracción de compuestos orgánicos volátiles y una mezcla de gases permanentes.
- **Etapa 3 de combustión de gases y volátiles:** al tener una temperatura elevada y un aporte suficiente de oxígeno los compuestos volátiles generados en la etapa de descomposición térmica entran en combustión. Si la combustión es perfecta los reactivos se quemarán completamente para dar lugar a  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$ . Si las condiciones de oxidación no son ideales se emitirán compuestos parcialmente oxidados que actúan como contaminantes atmosféricos.

- **Etapa 4 de combustión de la fracción carbonizada:** la fracción carbonizada que se produce en la etapa pirolítica entra en combustión por reacción del oxígeno del aire a temperaturas superiores a los 400°C. La figura 10 se muestra como la etapa pirolítica se solapa con la combustión de la fracción carbonizada, que queda reflejada como una pérdida de masa de la muestra a temperaturas superiores a los 400°C y un máximo en la curva derivada a 478 °C. Esta etapa de combustión se completa a 525°C, cuando se ha consumido toda la fracción carbonizada.

#### 4.6 PROCESOS DE PRODUCCIÓN INDUSTRIAL DE PELLETS

La figura 11 muestra como es el proceso a gran escala de la producción de los pellets (Santos, 2018).

Las operaciones o partes se describen en la figura 11.



**Figura 11: Proceso de fabricación de los pellets**

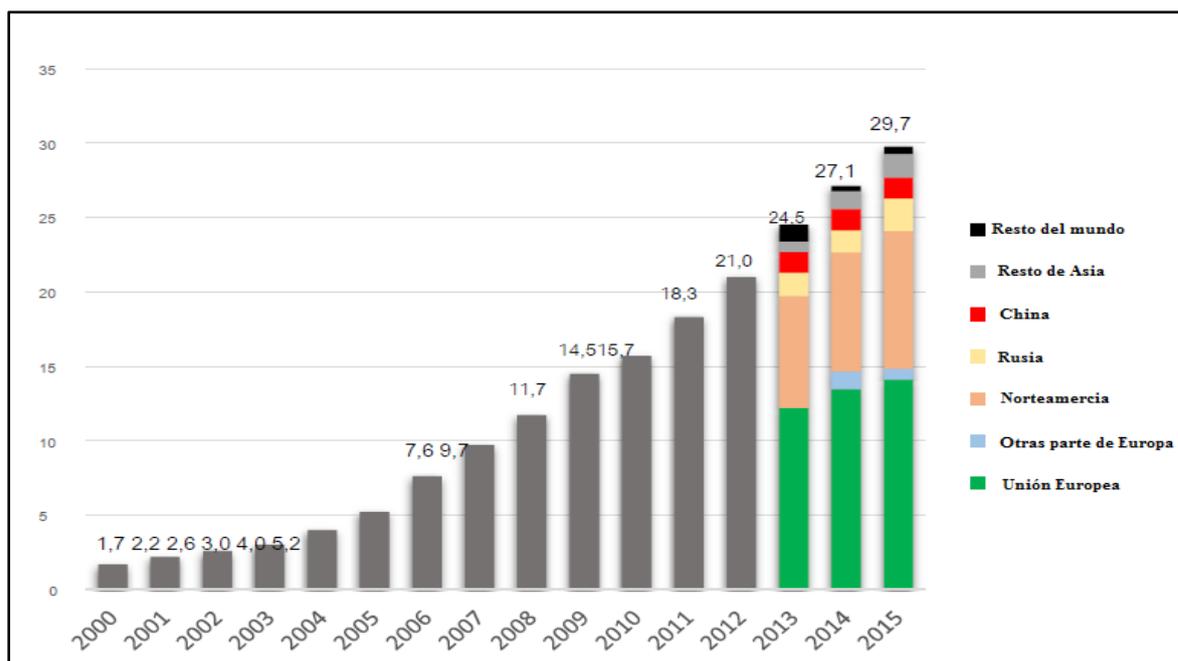
Etapas en la fabricación de pellets.

1. Recepción de la materia prima
2. Transportador de correas, para que el material sea llevado a un silo.

3. Limpieza primaria, se retiran las impurezas y objetos extraños que pueden estar mezclados con la materia prima.
4. Regulador de la cantidad de la materia prima, el cual será transportada al secador.
5. Secador se utiliza para que la humedad de la materia prima tenga un contenido de humedad de 10 a 12 por ciento (esta es la etapa que consume más energía).
6. Recuperador de cenizas de la quema de combustible, fase en que ocurre la remoción de pequeñas cantidades de cenizas generadas por la combustión de la madera.
7. Generación de calor para secar la materia prima, por medio de la combustión de los residuos.
8. Silo, se utiliza para que se acumulen los residuos y partículas geométrica irregulares que luego serán quemadas en la estufa de secado.
9. Ciclones o separadores de vapor, lugar donde ocurre el ajuste de humedad, de modo que se deja todas las partículas con un mismo contenido de humedad.
10. Realización de la limpieza secundaria de la materia prima con la finalidad de garantizar una mejor calidad de los pellets. En esta etapa, los residuos son retirados del proceso.
11. Redimensionado de la materia prima: fase en donde ocurre la homogenización y estabilización de la materia prima a ser compactada y que tiene por finalidad garantizar un producto con características uniformes. En esta etapa el material es triturado y reducido a partículas con un tamaño máximo de 2mm, por medio de un triturador de partículas.
12. Estanque de material homogenizado, en humedad y tamaño deseado.
13. Pelletización proceso de prensado del material y formación de los pellets. Por medio de las prensas granuladas, la materia prima es compactado en condiciones de alta temperatura y presión.
14. Enfriamiento los pellets porque estos salen con una temperatura de 95°C y deben llegar lentamente a una temperatura ambiente, para no interferir en las propiedades mecánicas del producto.
15. Silo de pellets, local donde son almacenados los productos finalizados para luego salir a la venta.
16. El producto es embalado y dispuesto para ser distribuido.

## 5. PRODUCCIÓN Y CONSUMO MUNDIAL DE PELLETS

Gauthier, Jossart y Calderon (2016) señalan que la producción mundial de los pellets ha ido aumentando con el tiempo, tal como se observa en la figura 12, donde a partir de un tiempo de 15 años la producción se incrementó en 28 millones de toneladas de pellets. Para el año 2015 se tuvo una producción de 29,7 millones de toneladas de pellets, siendo el productor principal la Unión Europea con un 47,48 por ciento de pellets producidos para el mismo año.



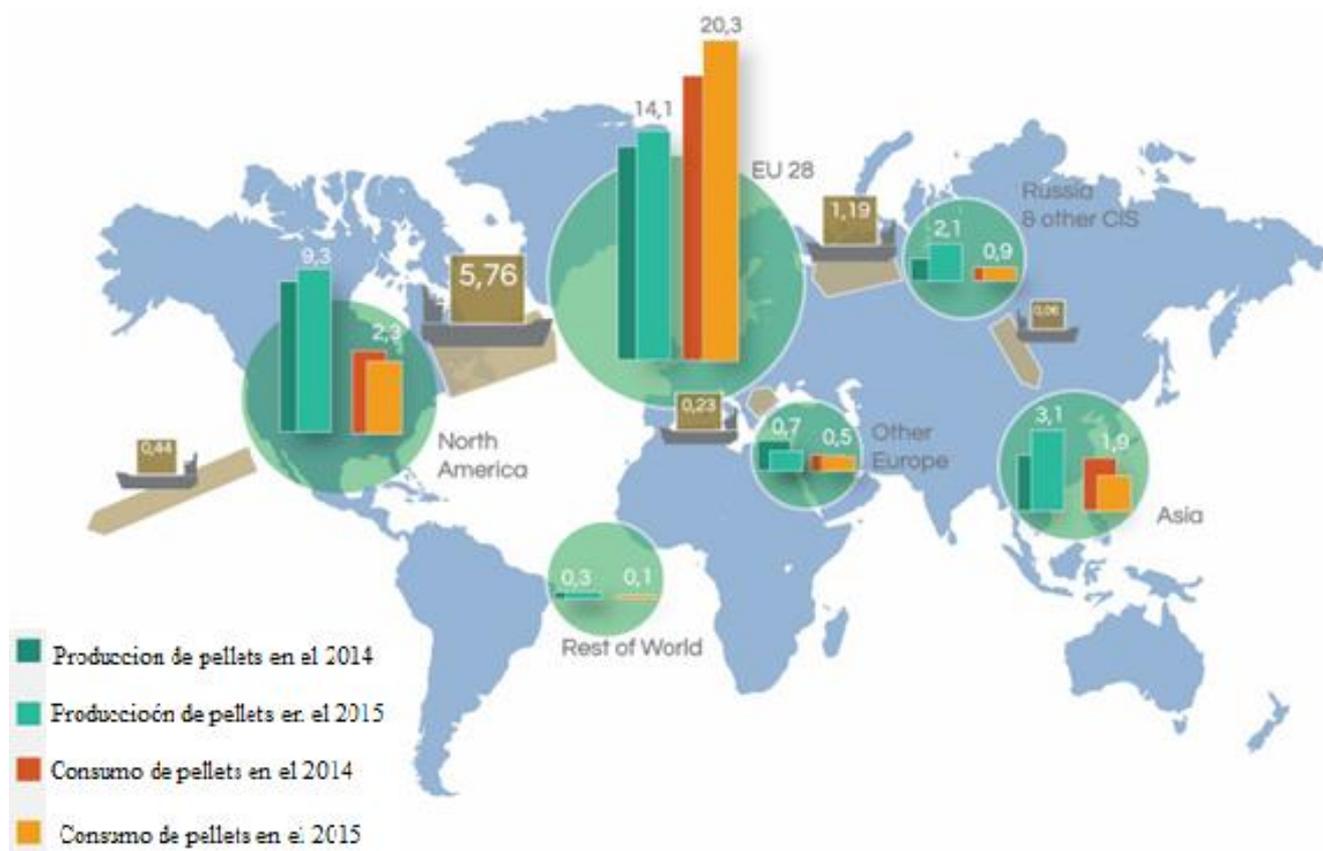
**Figura 12: Producción mundial de pellets para los años 2000-2015 en millones de toneladas**

FUENTE: *Gautier et al (2016)*

Los países que conforman la Unión Europea, productores de pellets, tienen el siguiente orden:

Alemania ocupa el primer lugar en producción con 2 millones de toneladas, seguido por Suecia con 1,6 millones de toneladas, en tercer lugar esta Letonia con una producción de 1,5 millones de toneladas, luego le sigue Estonia y Austria ocupando el 4º y 5º lugar para el año de 2015 (Gautier et al ,2016).

Con respecto al consumo de pellets, Gautier et al (2016) señalan que el consumo mundial de pellets para el 2015 fue de 26 millones de toneladas. Donde el 78 por ciento de la producción es consumido por la Unión Europea para la producción de generación de calor a partir de la utilización de aparatos domésticos y comerciales o para la cogeneración en centrales eléctricas. Los países consumidores de pellets son: Reino Unido con un consumo de 5,9 millones de toneladas, siendo el primer consumidor de pellets, seguido por Italia con 3,1 millones de toneladas, el tercer lugar es para Dinamarca con 2,3 millones de toneladas, luego le sigue Alemania y Estados Unidos con 2,2 y 2 millones de toneladas respectivamente. A través de la figura 13 se puede observar la producción y consumo mundial de pellets para el año 2014 y 2015.



**Figura 13: Mapa mundial de la producción y consumo de pellets (millones de toneladas) años 2014-2015**

FUENTE: *Elaborado por Gautier et al (2016) en base Eurostat, Hawkins Wright, FAO*

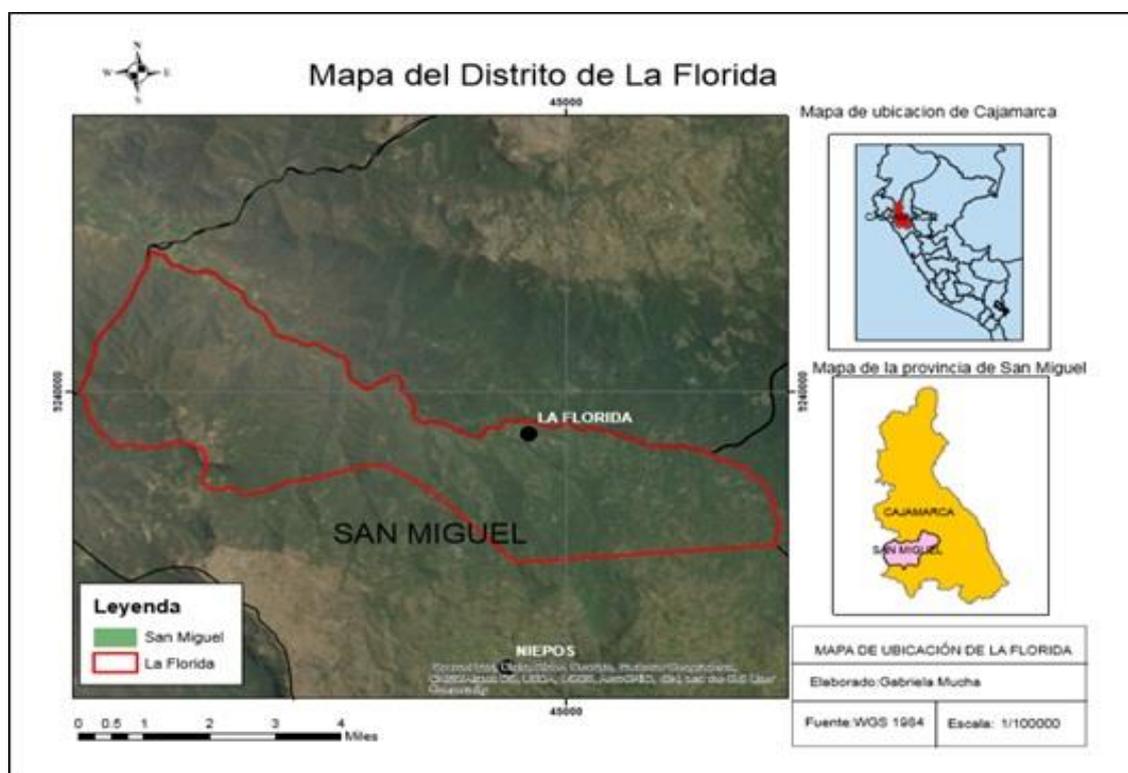
Con respecto a la perspectiva del consumo global para los siguientes años Pöyry (2009) señala que para el año 2020 se tendrán los siguientes consumos: Norte América consumirá 5,6 millones de toneladas, Unión Europea 23,8 millones toneladas y el resto de Europa 0,8 millones de toneladas, China un consumo de 10 millones de toneladas, Japón y Corea 5,5 millones de toneladas y para Sur América 0,20 toneladas. De los datos anteriores el consumo y producción de pellets para Sur América es bajo o casi nulo, pero Thrän, Peetz y Schaubach (2017) agrega que existen países potenciales como Brasil y Chile para la producción de pellets. El primero es uno de los países con grandes cantidades de residuos agrícolas con potencial para pellets. Dentro de este país existen 13 plantas pelletizadoras que han producido 75 000 toneladas de pellets de pino y eucalipto. El otro país, Chile es un país exportador de productos forestales y cuenta con numerosas empresas de transformación maderera así como empresas de pellets que en el 2015 produjeron 30 000 toneladas de pellets, destinadas al mercado nacional. Por último los pellets pueden ser comercializados de la siguiente manera: a granel en camiones de 20000 kg, medio camión o un cuarto de camión. A granel en sacos de material y tamaño variable, por ejemplo en sacos de plásticos que pueden contener desde 15 hasta 35 kg de pellets (Zapata, 2016).

### III. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 1. LUGARES DE ESTUDIO

La recolección de la materia prima se llevó a cabo en el taller de laminado de Circulo de Investigación de la Cadena de Bambú, de la UNALM, donde se procesaron cañas de *Guadua angustifolia* Kunth, procedentes del distrito de La Florida, provincia de San Miguel en el departamento de Cajamarca; en figura la 14 se observa el mapa de ubicación del lugar de colección de cañas.

La obtención de pellets, conforme a las variables de estudio y los ensayos de pruebas físicas se realizaron en el Laboratorio de transformación química del Departamento de Industrias Forestales y, los ensayos químicos y comportamiento térmico se llevaron a cabo en el Laboratorio de Energías Renovables, ambos en la Universidad Nacional Agraria La Molina



**Figura 14:** Mapa de ubicación de la materia prima en el distrito de la Florida, provincia de San Miguel, departamento de Cajamarca.

## **2. MATERIALES Y EQUIPOS**

### **2.1 MATERIALES**

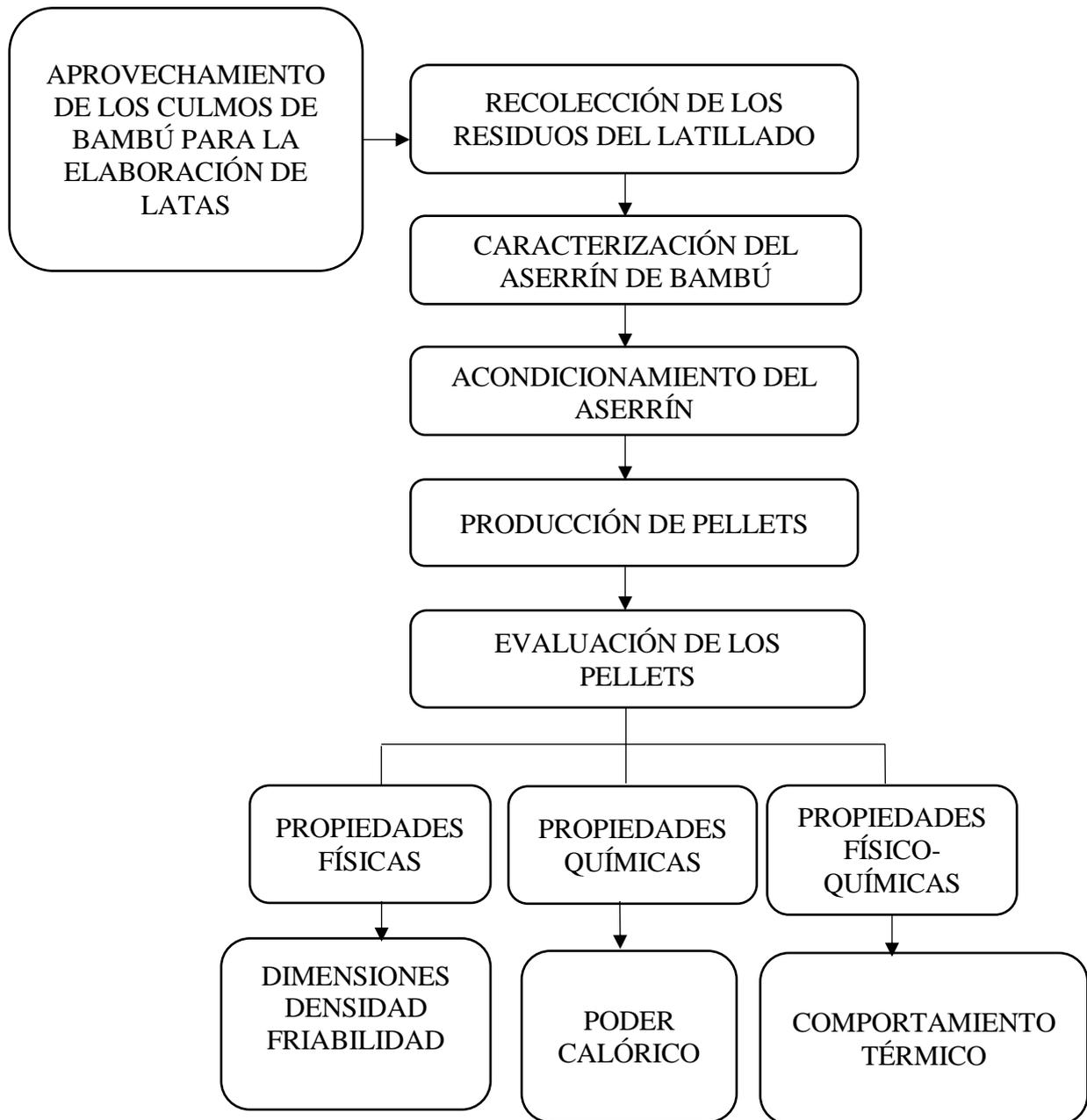
- Partículas: Obtenidas de los residuos de la línea de aserrado del bambú
- Bolsas de polietileno de cierre hermético
- Papel aluminio
- Cajas
- Plumones indelebles
- Etiquetas
- Matraz
- Desecador de silica gel
- Lápices y libreta

### **2.2 EQUIPOS**

- Pelletizadora manual IKA werke C2, dimensiones a formar del pellet 13 mm de diámetro
- Torquimetro, rango de 0 a 20 m/kg
- Agitador orbital KS250 basic, frecuencia 550 rpm
- Balanza analítica Henkel de 250 g de capacidad y 0,1 mg de precisión
- Balanza digital Camry de 5kg de capacidad y 0,1 g de precisión
- Zaranda vibratoria Maccionix de 1700 rpm y tamices ASTM 20,30, 40 ,50 con fondo y tapa
- Vernier digital Mitutoyo de 0,02 mm de precisión
- Bomba calorimétrica LECO AC600
- Analizador termogravimétrico LECO TG701
- Higrómetro de pinnes, rango de humedad de 0 a 50 %, precisión de +- 1%
- Computadora

### 3 METODOLOGÍA

Las etapas para la obtención de pellets y su evaluación, se realizaron en diversas etapas, descritas en los puntos siguientes. Un resumen de las etapas realizadas se presenta en un diagrama, en la figura 15.



**Figura 15: Diagrama de flujo de la metodología a seguir para la obtención de los pellets de bambú**

### 3.1 APROVECHAMIENTO DE LOS CULMOS DE BAMBÚ PARA LA ELABORACIÓN DE LATAS

La recolección se realizó durante la transformación de cañas de *Guadua angustifolia* Kunth para la elaboración de latas. Las muestras que se recolectaron corresponden a la transformación obtenidas con la sierra circular. Ver figura 16

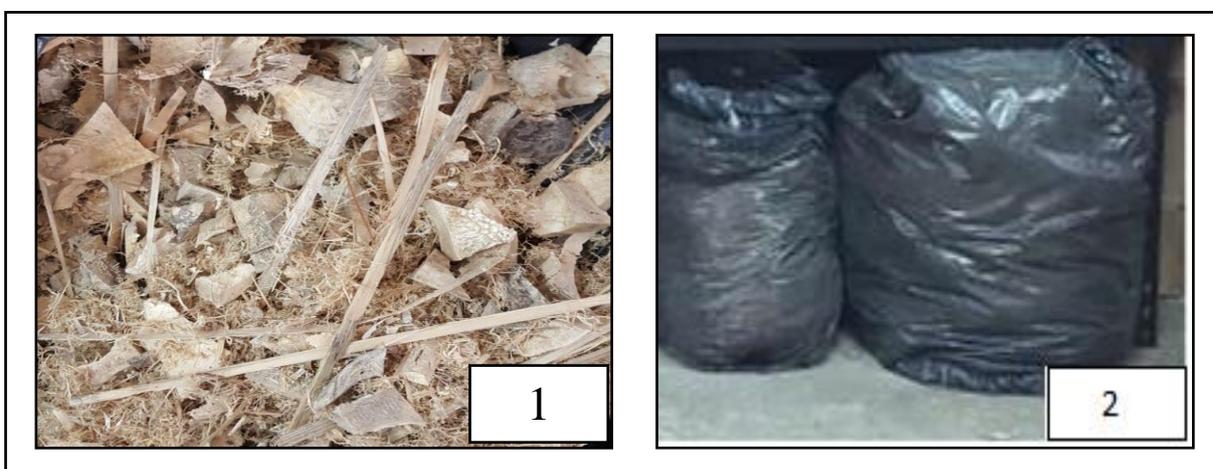


**Figura 16: Aprovechamiento de las cañas de bambú para la elaboración de latas :** (1)Sierra circular; (2) Corte longitudinal de la lata; (3) Corte longitudinal para la obtención de octavos; (4) Denudado; (5); vista transversal del listón; (6) vista longitudinal del listón

FUENTE: López. (2018)

### 3.2 RECOLECCIÓN DE LOS RESIDUOS DEL LATILLADO

Durante la etapa del aserrío, se recolecto el aserrín originado por los cortes de la sierra circular guardándolas en bolsas, cuidando que no se mezclen con otro tipo de residuos de otras máquinas. Ver figura 17.



**Figura 17: Residuos de bambú originados por la sierra circular**

(1)Residuos acumulados (2) Residuos recolectados

Se realizó mediante el análisis elemental (determinación del contenido de hidrogeno, oxígeno, nitrógeno y azufre), poder calorífico, contenido de cenizas y contenido de humedad.

- a) Para el análisis elemental: Se realizaron las pruebas de análisis elemental según las siguientes normas , para los elementos de carbono, hidrogeno, nitrógeno y oxígeno se determinó con la Norma ASTM D5373
- b) Para la determinación del elemento azufre con la Norma ASTM D 4239
- c) Para la determinación del potencial calorífico: se determinó mediante la Norma ASTM D5865
- d) Para el contenido de humedad: Se determinó mediante método descrito en la Norma UNE-CEN/TS 14774-3:2010.

### 3.4 ACONDICIONAMIENTO DEL ASERRÍN

En esta etapa se calculó la densidad de las partículas y distribución del tamaño de partículas, el primero para conocer el volumen que ocupa el biocombustible antes de ser pelletizado y el segundo para conocer el porcentaje de partículas de los residuos, luego se procedió a calcular el contenido de humedad. Los procedimientos se describen a continuación.

- a) Densidad a granel de las partículas: Se determinó con la siguiente norma UNE-CEN/TS 15103: 2010. Utilizando un cilindro de volumen y peso conocido, el cual se llenó con

las partículas y se registró el peso. La densidad a granel se calculó con la siguiente ecuación.

**Ecuación 1. Densidad a granel de la muestra de biocombustible**

$$BD = \frac{Mi - Mr}{V}$$

**Donde:**

BD: Densidad a granel

Mi: Masa del recipiente con las partículas

Mr: Masa del recipiente

V: Volumen del recipiente.

**b) Acondicionamiento:** consistió en homogenizar el tamaño de las partículas, y obtener dos contenidos de humedad. La realización se describe a continuación:

Homogenización del tamaño de partículas del aserrín: se sometió la materia prima elegida, en su forma y tamaño original, a un cribado a través de tamices vibrantes, como lo describe la norma UNE-CEN/TS 15149-1:2011, para el ensayo se utilizaron 4 tamices: ASTM -20/+30, -30/+40, -40/+50 y -50

Control de humedad de las partículas: las partículas tamizadas tenían un contenido de humedad de 8 por ciento. Para aumentar el contenido de humedad de las partículas, se mantuvieron en una estufa y se colocaron recipientes con agua por varios días hasta lograr la humedad deseada, la cual se midió con el higrómetro (ver figura 18). Luego las partículas se guardaron en bolsas de polietileno clasificadas según el contenido de humedad y granulometría.



**Figura 18: Humectación y control del contenido de humedad de las partículas**

(1) Humedecimiento de las partículas (2) Control de la humedad con el higrómetro

### 3.5 PRODUCCIÓN DE PELLETS

Los pellets se produjeron con un contenido de humedad de 8 y 14 por ciento y una clasificación de partículas de acuerdo a las mallas mesh -20/+30, -30/+40, -40/+50 y -50; luego se pesó un gramo en la balanza analítica para después colocarlo en el cilindro de formación de la pelletizadora. Posteriormente se aplicó presión hasta compactarlo y formar el pellets. Las partes de la pelletizadora se observan en la figura 19 y el proceso de elaboración de pellets se observa en la figura 20.

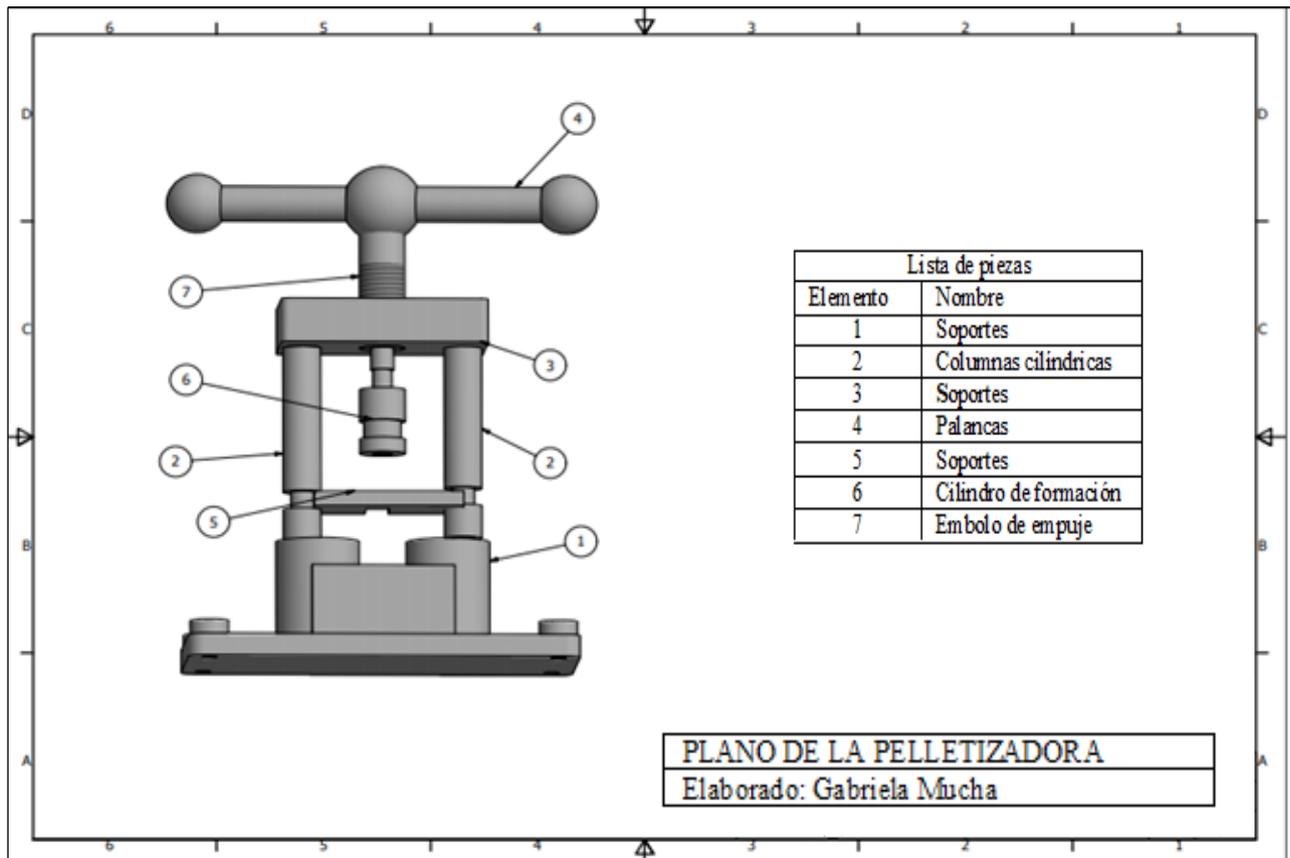
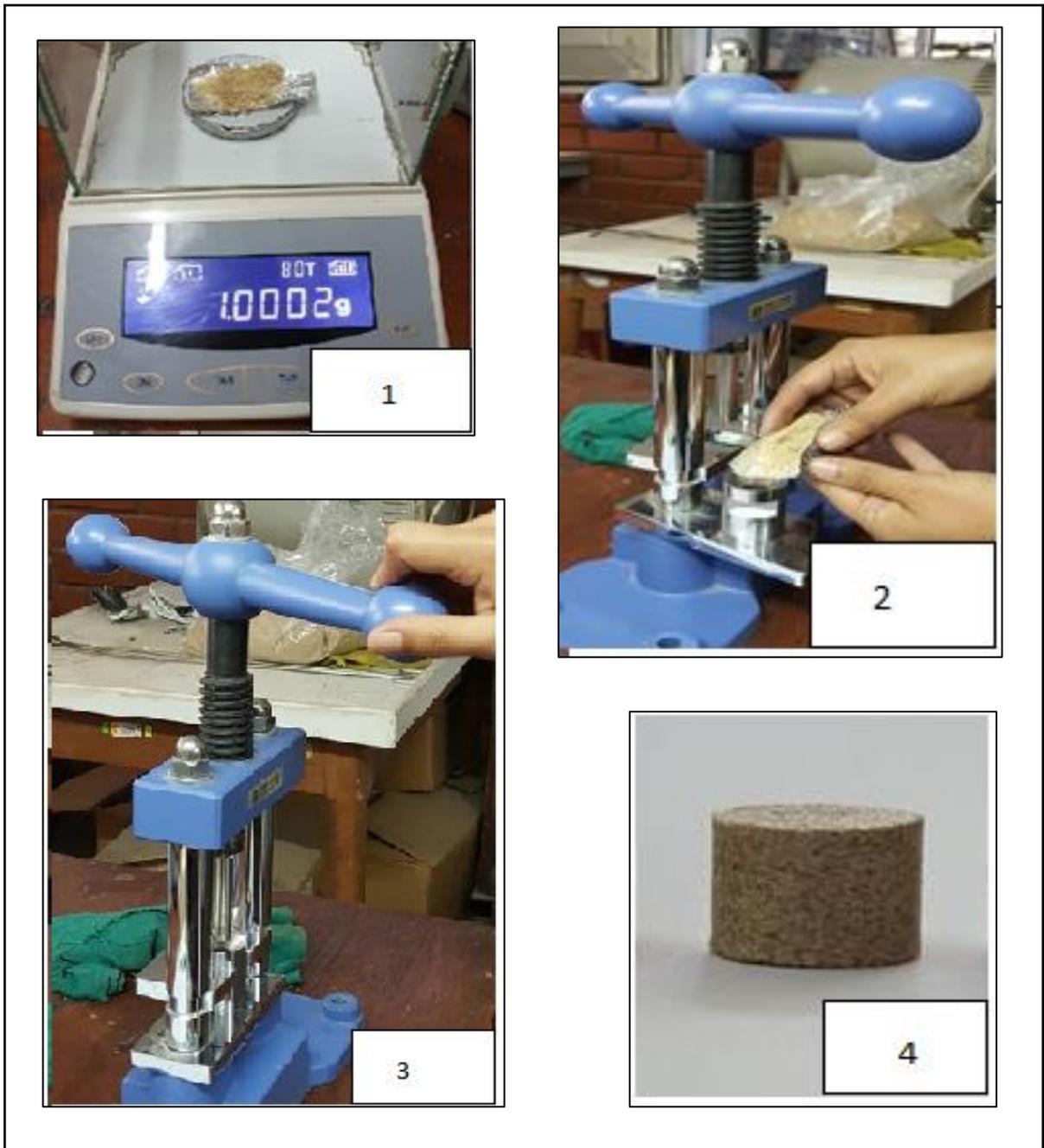


Figura 19: Pelletizadora y sus partes



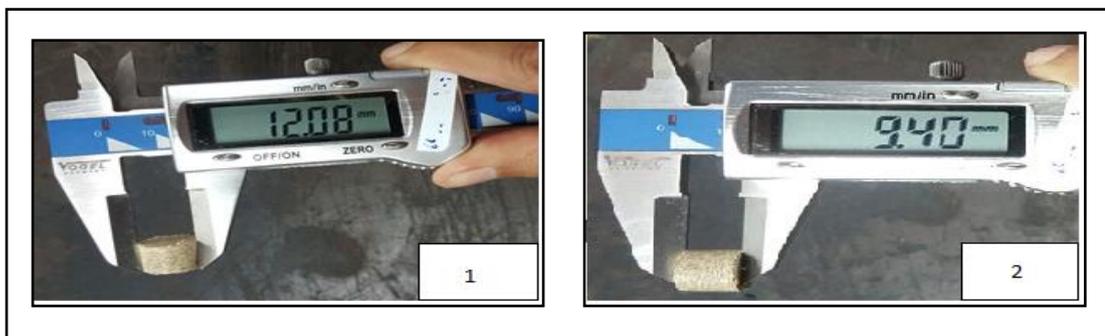
**Figura 20: Producción de pellets**

(1) Pesado de las partículas; (2) Vaciado a la pelletizadora; (3) Aplicación de la presión; (4) pellets

### 3.6 DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES

#### a) Propiedades físicas

- Dimensiones: En base a la norma UNE-EN ISO 17829:2016 se midió el diámetro y la longitud de los pellets utilizando un vernier digital, tal como se muestra en la figura 21.



**Figura 21: Forma de medición del diámetro y longitud de los pellets**

(1) Medición del diámetro (2) Medición de la longitud

- Densidad del pellets ( $\rho_u$ ) : se determinó con la norma NTP 251.014, donde se calculó la masa y el volumen de los pellets

#### **Ecuación 2: Volumen del pellets**

$$V_u = \frac{\pi}{4d^2} l$$

#### **Ecuación 3: Densidad del pellets**

$$\rho_u = \frac{m_u}{V_u}$$

Donde

$V_u$ : Volumen del pellets

$d$ : Diámetro del pellets

$l$ : Longitud del pellets

$m_u$ : masa del pellets

$\rho_u$ : Densidad del pellets

- Friabilidad: se determinó siguiendo la metodología de Ferreira y Otavio (1991). Los pellets fueron llevados a un agitador orbital por 15 minutos con una velocidad de rotación de 350 rpm (Ver figura 22). La friabilidad se presentó como el porcentaje obtenido por la diferencia entre la masa inicial y la masa que quedó al final con la siguiente ecuación

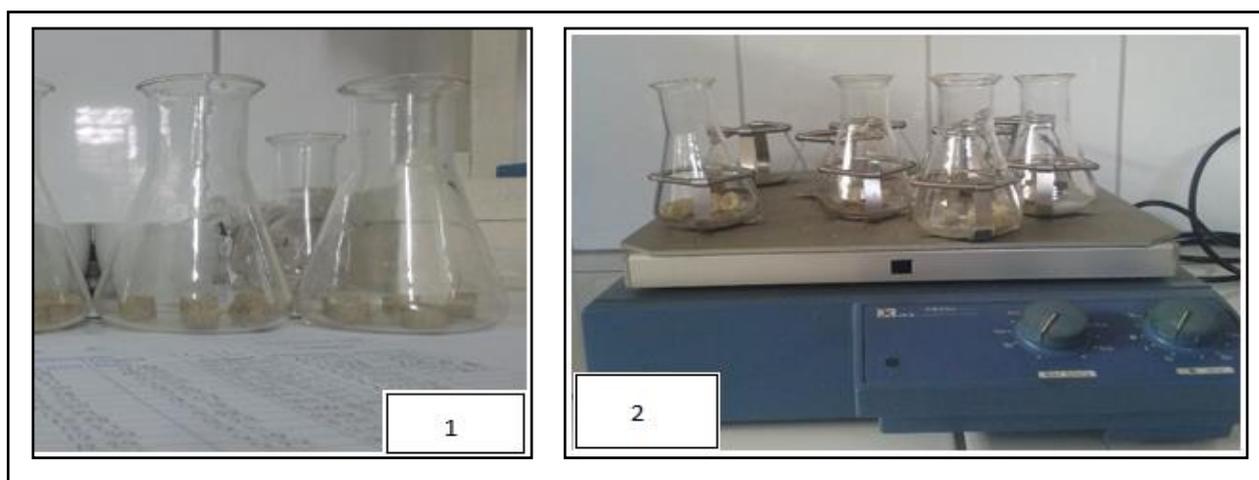
**Ecuación 4: Friabilidad de los pellets**

$$Fr = \frac{mi - mf}{mi} \times 100$$

*Fr*= Friabilidad en porcentaje

*mi*=Masa inicial de los pellets

*mf*= Masa final de los pellets



**Figura 22: Determinación de friabilidad**

(1)Agrupación de pellets (2) Pellets sometidos a una velocidad de 350 rpm en el agitador orbital

**b) Propiedades químicas**

Para la evaluación de poder calórico se utilizó la Norma ASTM D5865.

**c) Propiedades físico-químicas:** la evaluación del comportamiento térmico de los pellets de *Guadua angustifolia* Kunth se realizó con un analizador termogravimétrico. La prueba se realizó en base a la norma ASTM D7582. Este análisis permitió calcular el contenido de cenizas, el contenido de humedad y el contenido de volátiles de los pellets.

### 3.7 EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE LOS PELLETS

En la tabla 8 se muestra la clasificación de las calidades de los combustibles en base a norma UNE-CEN/TS 14961-2:2012. Biocombustibles Sólidos. Especificaciones y clases de combustibles. Parte 2: Pellets de madera para uso no industrial

**Tabla 8: Clases de calidad de los combustibles y las especificaciones de los pellets**

Clase/propiedad s/métodos de análisis	Unidades	Enplus-A1	Enplus-A2	Enplus B
<b>Origen y fuente EN 14961-1</b>		1.1.3 Fuste 1.2.1 Residuos de madera no tratada químicamente	1.1.1 Árboles enteros con raíces	1.1 Bosque, plantaciones y otra madera virgen 1.2 Subproductos y residuos de la industria de procesado de la madera 1.3 Madera usada
<b>Diámetro D</b>	mm	6-8	6-8	6-8
<b>Longitud L</b>	mm	3.15-40.0	3.15-40.0	3.15-40.0
<b>Humedad M</b>	% base húmeda	$M \leq 10$	$M \leq 10$	$M \leq 10$
<b>Cenizas, A</b>	% en masa base húmeda	$\leq 0.7$	$\leq 1.5$	$\leq 3.0$
<b>Durabilidad mecánica</b>	% masa base húmeda	$\geq 97.5$	$\geq 97.5$	$\geq 96.5$
<b>Finos</b>		$\leq 1.0$	$\leq 1.0$	$\leq 1.0$
<b>Aditivos</b>	% en masa en base seca	$\leq 2$	$\leq 2$	$\leq 2$
<b>Poder calorífico inferior</b>	mJ/kg	$16,5 \leq Q \leq 19$	$16,3 \leq Q \leq 19$	$16 \leq Q \leq 19$
<b>Densidad a granel BD</b>	kg/m <sup>3</sup>	$BD \geq 600$	$BD \geq 600$	$BD \geq 600$
<b>Nitrógeno, N</b>	% en masa en base seca	$N \leq 0.3$	$N \leq 0.5$	$N \leq 1.0$
<b>Azufre, S</b>	% en masa en base seca	$S \leq 0.03$	$S \leq 0.03$	$S \leq 0.04$

### 3.8 DISEÑO EXPERIMENTAL

Las variables independientes que se evaluaron fueron el contenido de humedad y granulometría. Para el caso del contenido de humedad se estudió dos niveles el 8 y 14 por ciento. Mientras que para la granulometría fueron cuatro niveles de malla de tamaño (20, 30, 40 y 50) (ver Tabla 9). Las variables dependientes evaluadas fueron: Densidad, poder calórico, friabilidad y contenido de cenizas. Para finalizar se realizó un análisis ANVA factorial y pruebas turkey con un nivel de significancia de 95 por ciento.

El modelo estadístico utilizado fue el diseño completamente al azar (DCA) en arreglo factorial de 2x4 (contenido de humedad y granulometría).

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \epsilon_{ijk}$$

Donde:

$Y_{ijk}$ : Valor observado de la variable dependiente en estudio para la unidad experimental del bloque k sujeto al tratamiento j.

$\mu$ : media general

$\alpha_i$ : efecto i-esimo contenido de humedad

$\beta_j$ : efecto la j-esimo granulometría

$(\alpha\beta)_{ij}$ : efecto de la interacción del contenido de humedad y granulometría

$\epsilon_{ijk}$ : efecto del error aleatorio de contenido de humedad y granulometría

**Tabla 9 : Diseño experimental de los tratamientos utilizados para el análisis estadístico**

Variables		Propiedades a evaluar						
Contenido de humedad (%)	Granulometría	Tratamiento	Diámetro	Longitud	Densidad	Friabilidad	Poder calórico	Contenido de cenizas
	<b>8</b>		-20/+30	C820	X	X	X	X
	-30/+40	C830	X	X	X	X	X	X
	-40/+50	C840	X	X	X	X	X	X
	-50	C850	X	X	X	X	X	X
<b>14</b>	-20/+30	C1420	X	X	X	X	X	X
	-30/+40	C1430	X	X	X	X	X	X
	-40/+50	C1440	X	X	X	X	X	X
	-50	C1450	X	X	X	X	X	X

## IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 1. PROPIEDADES QUÍMICAS Y FÍSICAS DE LAS PARTICULAS DE GUADUA ANGUSTIFOLIA KUNTH

#### 1.1 CONTENIDO ELEMENTAL

La evaluación química elemental del residuo de *Guadua angustifolia* Kunth presento los siguientes resultados mostrados en la tabla 10.

**Tabla 10: Análisis elemental de los residuos de *Guadua angustifolia* Kunth**

<b>Carbono (%)</b>	<b>Hidrogeno (%)</b>	<b>Nitrógeno (%)</b>	<b>Azufre (%)</b>	<b>Oxigeno (%)</b>
<b>42,5</b>	6,4	0,34	0,10	42.02

Se observa que el porcentaje de carbono para la biomasa de *Guadua angustifolia* Kunth fue de 42,54 por ciento, resultado que se encuentra dentro de los valores propuestos por Stevens y Brown (2011), ya que ellos señalan que el contenido de carbono en la biomasa oscila entre 30 y 60 por ciento.

Con respecto al porcentaje de hidrogeno en la biomasa se encontró un contenido de 6,4 por ciento, valor que es superior a los obtenidos por Stevens y Brown (2011). Otro componente es el oxígeno cuyo contenido fue de 42,02 por ciento, valor que también es superior a los rangos encontrados por Stevens y Brown (2011) para la biomasa.

De acuerdo a los siguientes autores Romanelli et al (2017), Stevens y Brown (2011) la biomasa contiene otros elementos diferentes al C, H, y O con un porcentaje menor al 1 por ciento. Para el análisis realizado se encontró un porcentaje de 0,34 y 0,1 para el nitrógeno y el azufre respectivamente, valores que sumados no sobrepasan el 1 por ciento de contenido de otros elementos. Con respecto a lo señalado por Obernberger y Thek (2010), quienes describen que un contenido de nitrógeno mayor a 0,6 por ciento, tiene un efecto

negativo sobre el medio ambiente, para la materia prima analizada se obtuvo un contenido menor a 0,6 por ciento. Para el azufre Obernberger y Thek (2010) dan dos rangos de porcentajes con diferentes efectos. Uno cuando el valor es superior a 0,2 por ciento el cual produce emisiones de óxidos de azufre y el otro cuando el valor es superior a 0,1 por ciento lo cual genera corrosiones a los hornos de combustión. De lo analizado para el azufre, el valor no es superior a ninguno de los valores establecidos para darse un efecto negativo en su utilización, lo cual asegura que la presencia de nitrógeno y azufre son muy bajos, y al momento de utilizar el residuo de *Guadua angustifolia* Kunth la emisiones de SO<sub>x</sub> y NO<sub>x</sub> serán insignificantes durante su combustión.

## 1.2 PODER CALÓRICO DE LOS RESIDUOS

El poder calórico superior del residuo de *G. angustifolia* Kunth es de 4368,87 kcal/kg y el poder calórico inferior de 3988,25 kcal/kg con un contenido de humedad de 8,7 por ciento. En la tabla 11 se presenta el poder calórico de la *Guadua angustifolia* Kunth comparados con otros residuos biomásicos que también pueden ser usados como biocombustibles.

**Tabla 11: Poder calórico superior de residuos biomásicos**

<b>Residuo</b>	<b>Poder calórico superior</b> kcal/kg	<b>Contenido de humedad (%)</b>	<b>Referencia</b>
<b>Residuos de <i>Bertholletia excelsa</i> cáscara y tegumento)</b>	2130,09	13,19	Andrade et al (2017)
<b>Residuos forestales de la industria del papel y celulosa (eucalipto)</b>	4370,87 a 5039,64	25,8 a 14,3	Pena. (2014)
<b>Residuos de cosecha de <i>pino radiata</i></b>	3319,95	25	Vega et al (2015)
<b>Residuos de <i>Guadua angustifolia</i> Kunth</b>	4368,87	8,7	Presente estudio

Las especies de comparación mencionadas en la tabla 11 son aprovechadas intensivamente y generan diferentes tipos de residuos.

Los residuos son: cascara de castaña, tegumento de castaña, hoja, corteza, astillas, lodos orgánicos por parte de los residuos de forestales de la industria del papel y los residuos de cosecha de pino. Estos residuos tienen un contenido de humedad alto y presentan un poder calórico superior semejante al poder calórico de la *G. angustifolia* Kunth. Al comparar los residuos *G. angustifolia* con los otros residuos, este tiene la ventaja de encontrarse astillado ya que proviene de un proceso de aserrado y tiene un contenido de humedad de 8,7 por ciento el cual es adecuado para la realización de los pellets. Estas ventajas harán que los costos de producción disminuyan ya que no se requerirá un secado ni astillado al utilizar residuos de *Guadua angustifolia* Kunth.

### **1.3 CONTENIDO DE HUMEDAD**

El contenido de humedad de la materia prima fue 8,7 por ciento. Este valor de contenido de humedad es adecuado porque está dentro del parámetro propuesto por la norma UNE-CEN/TS 14961-2:2012, la cual recomienda tener un contenido de humedad menor a 10 por ciento.

Mani et al (2003) señala que se obtienen pellet fuertes y libres de grietas cuando el contenido de humedad es menor a 10 por ciento, y en el caso se trabaje con un contenido de humedad superior a 10 por ciento, se obtendrán pellets débiles en durabilidad mecánica, y un proceso errático en la producción de los mismos, ya que a mayor presencia de agua en las partículas ira disminuyendo la compresibilidad (Anh et al, 2014).

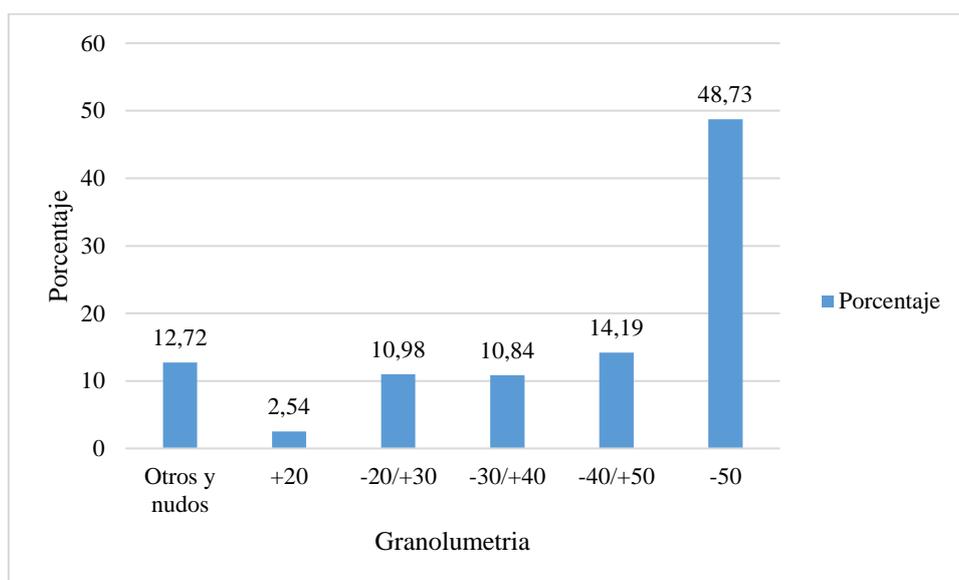
Por su parte Mani et al (2003) señalan que se debe elegir el contenido de humedad correcto, ya que cada especie desarrolla la propiedad de auto-uniión dependiendo del contenido de sustancias lignocelulosicas presentes. Por ejemplo Mohammad et al (2018) describen los contenidos de humedad óptimos para realizar pellets con las siguientes especies: Alfalfa 10 por ciento de contenido de humedad, rastrojos de maíz 5 a 10 por ciento de contenido de humedad, viruta de madera 8 por ciento, corteza de madera 8 por ciento. Estos valores de contenidos de humedad óptimos variaran dependiendo de la especie y su contenido de lignina, ya que en combinación con el agua este compuesto reblandecerá a determinado contenido de humedad y permitirá la auto-uniión (Enders et al, 2012). Entonces debido a que cada especie tiene un contenido de humedad óptimo se elaboraron pellets con dos contenidos de humedad 8 y 14 por ciento para conocer la influencia de la misma y determinar el contenido de humedad adecuado.

#### 1.4 CLASIFICACIÓN DE LA PARTÍCULAS

Los aserrines fueron tamizados con las mallas de -10/+20, -20/+30, -30/+40, -40/+50,-50. Posteriormente se obtuvo una relación porcentual entre cada tamaño de partícula con respecto al total de aserrín a partir del peso, obteniendo así el rendimiento. A continuación los valores de las partículas ya tamizadas presentan la siguiente distribución granulométría. Ver tabla 12 y figura 23.

**Tabla 12 : Distribución de las partículas según su tamaño**

Granulometría	Rango de tamaño de partículas (mm)	Peso total de partículas (kg)	Rendimiento (%)
-10/+20	0,850 [	0,95	2,54
-20/+30	[ 0,850-0,600[	4,10	10,98
-30/+40	[0,600-0,450 [	4,05	10,84
-40/+50	[0,450-0,300[	5,30	14,19
-50	0,300 ]	18,20	48,73
Nudo y otros	Nudo y otros	4,75	12,72



**Figura 23: Distribución granulométrica de las partículas de la Guadua angustifolia Kunth**

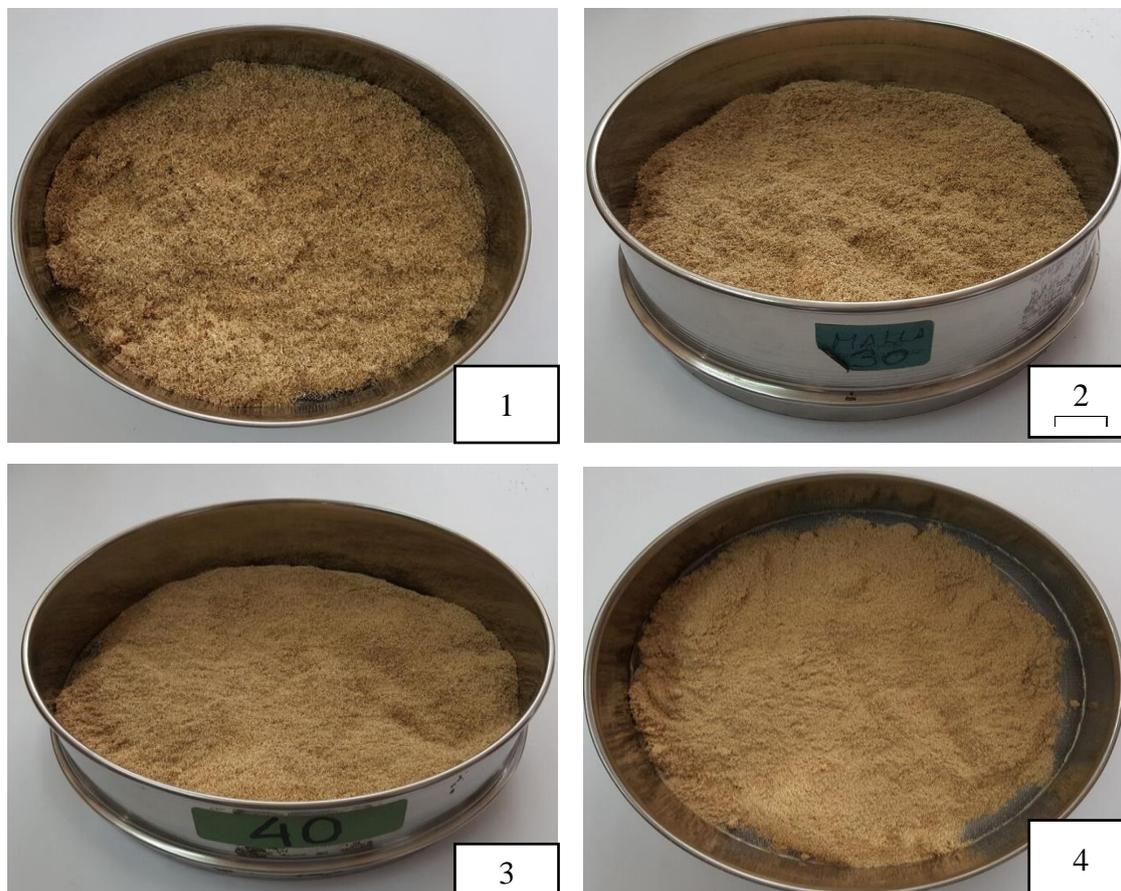
De acuerdo a los resultados obtenidos en la figura 23 y tabla 12, se tiene un valor de 48,73 por ciento de partículas menores a 0,300 mm con respecto a las otras mallas. Esto es debido a que la materia prima proviene del aserrío con sierra circular, máquina que tiene un tamaño de disco de 10 pulgadas y pasó de diente específico que hace que se generen partículas de

menor tamaño. Por su parte Correa et al (2003) explica que el hecho de que se produzcan partículas grandes depende las fuerzas de atracción y flexión del material, la velocidad de alimentación, las revoluciones por minuto, número de dientes y filo de las cuchillas así como la cantidad de minerales ya que se obtendrán partículas grandes porque las cuchillas se desgastan. Correa et al (2003) obtuvieron un 53 por ciento de partículas para pellets con una sierra principal de 5 pulgadas de ancho, calibre 17, ancho de dientes de 3,175 mm, y en caso de un taller secundario se obtuvo 66,82 por ciento de partículas aptas para realizar pellets con una sierra cinta de 2 pulgadas de ancho y 6,27 m de longitud ambos para la especie de *Pinus leiophylla*. Los residuos provenientes de la sierra circular sirven para la producción de pellets, lo cual hará que se reduzcan los costos de astillado y molienda.

Respecto a los tamaños de partículas obtenidas, todas las clasificaciones cumplen con los tamaños establecidos para obtener pellets de calidad, ya que Kaliyan y Morey (2009), Obernberger y Thek (2010) señalan que se deben utilizar partículas menores a 1 mm, ya que con este tamaño se genera una mayor área de contacto.

En cuanto al valor de reutilización de los residuos de *G. angustifolia* es 87,28 por ciento ya que estos tienen un tamaño menor a 1 mm para la realización de los pellets. El otro valor restante es 12,72 por ciento que son nudos, partículas más grandes y fracciones indeseadas. Al encontrar una gran cantidad disponible de partículas aptas para la realización de los pellets ya no se requerirá inversiones para la reducción granulométrica.

En la figura 24 se observan las partículas ya tamizadas, homogenizadas y sin fracciones indeseadas. Esta actividad permite la utilización de las diferentes granulometrías y mejora la calidad de la materia prima para su posterior pelletizado.



**Figura 24: Tamaño de las partículas de *Guadua angustifolia***

**Kunth**

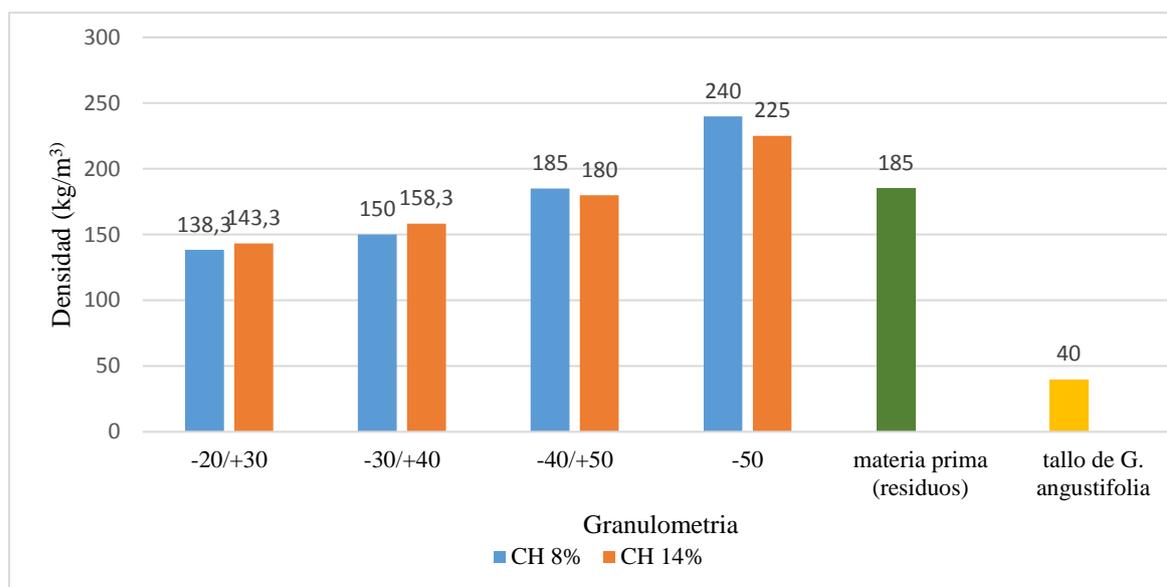
(1) Tamiz con partículas 0,850-0,600 mm (2) Tamiz con partículas 0,600-0,450 mm (3) Tamiz con partículas 0,450-0,300 mm (4) Tamiz con partículas 0,300mm

### **1.5 DENSIDAD APARENTE DE LAS PARTÍCULAS DE GUADUA ANGUSTIFOLIA KUNTH**

La densidad aparente del residuo de *G. angustifolia* Kunth es de  $185 \text{ kg/m}^3$ , al compararlas con las densidades de los biocombustibles sólidos, como las astillas con una densidad aparente de  $328 \text{ kg/m}^3$ , leña cuya densidad aparente es de  $445 \text{ kg/m}^3$ , briqueta cuya densidad aparente es  $1000 \text{ kg/m}^3$  y el pellets que tiene una densidad de  $620$  a  $650 \text{ kg/m}^3$ , el resultado obtenido es una densidad muy baja para el residuo de *G. angustifolia* Kunth, lo cual imposibilita su utilización inmediata ya que existen mejores biocombustibles con mayores densidades. El valor de densidad del residuo que no ha recibido tratamiento se

encuentra dentro del rango propuesto por Ngangyo et al (2015), cuyos valores van de 100 a 250 kg/m<sup>3</sup> para los residuos biomásicos.

En la figura 25 se presentan las densidades aparentes de las partículas ya tamizadas; con granulometrías homogéneas; se observa que la mayor densidad aparente promedio es para la granulometría de -50 con contenido de humedad de 8 por ciento



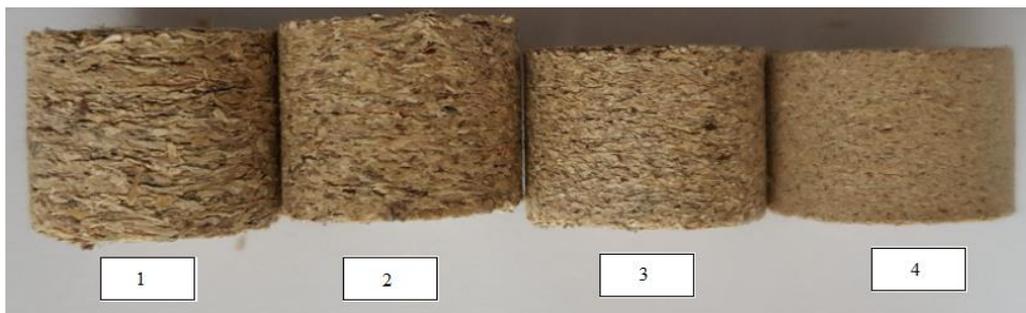
**Figura 25: Densidad aparente de las partículas homogenizadas**

En la figura 25 se observan las densidades de las partículas, tienen valores que van de 138,3 kg/m<sup>3</sup>, siendo este el más bajo para la partícula de malla -20/+30; a valores de 225 kg/m<sup>3</sup>, siendo este el valor máximo para la malla -50. Todos los valores de densidad obtenidos se encuentran en el rango densidad de 100 a 250 kg/m<sup>3</sup> según lo establecido por Ngangyo et al (2015) para los residuos biomásicos.

Los valores de densidad aparente para las diferentes tamaño de partículas siguen siendo menores a la densidad aparente de los biocombustibles sólidos, y para el caso de las partículas de tamaño -20/+30 y -30/+40 tienen valores menores a la densidad inicial de la materia prima. Los valores de densidad aparente para las partículas de *Guadua angustifolia* Kunth, son bajos y se convierten en una limitación para utilizarlos como fuente de energía, ya que al tener una menor densidad dificultaran el transporte y el almacenamiento. Lo mismo sucedería si se aprovecharía los tallos de *G. angustifolia* ya que su densidad en estado natural y densidad básica es 44,58 kg/m<sup>3</sup> y 40, 70 kg/m<sup>3</sup> respectivamente, (Angeles,

2014), se debe tener en cuenta que al transformar directamente los tallos de Guadua a pellets se generara un mayor costo, ya que si se utilizaría el tallo del bambú se tendría que astillar, moler y secar; además de que el tallo de Guadua tiene mejores propiedades y un mejor precio en el mercado como tallo que pellets. Pero que en su transformación se genera una gran cantidad de residuos que va de 24,44 t/ha/año, los cuales pueden ser reaprovechados en forma de pellets.

Posteriormente se realizaron los pellets, los cuales se observan en la figura 26



**Figura 26: Pellets realizados**

(1) Malla -20/+30; (2) Malla -30/+40-; (3) Malla -40/+50 (4) Malla -50.

## **2. EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS PELLETS**

En la tabla 13 se presentan los valores del análisis de varianza (ANVA) de las propiedades físicas de diámetro, longitud, densidad y friabilidad, evaluados para todos los tratamientos.

**Tabla 13: Valores del análisis de varianza (ANVA) de las propiedades físicas de diámetro, longitud, densidad y friabilidad.**

Fuente de variabilidad	G. L	Diámetro			Longitud			Densidad			Friabilidad		
		F	p-valor	Significancia	F	p-valor	Significancia	F	p-valor	Significancia	F	p-valor	Significancia
<b>Humedad</b>	1	8,463	0,004	Muy significativo	1320,129	0,000	Muy significativo	832,327	0,000	Muy significativo	9,528	0,000	Muy significativo
<b>Granulometría</b>	3	2,975	0,031	Muy significativo	699,181	0,000	Muy significativo	1047,009	0,000	Muy significativo	14,549	0,001	Muy significativo
<b>Humedad x granulometría</b>	3	6,443	0,000	Muy significativo	26,306	0,000	Muy significativo	48,957	0,000	Muy significativo	20,636	0,000	Muy significativo

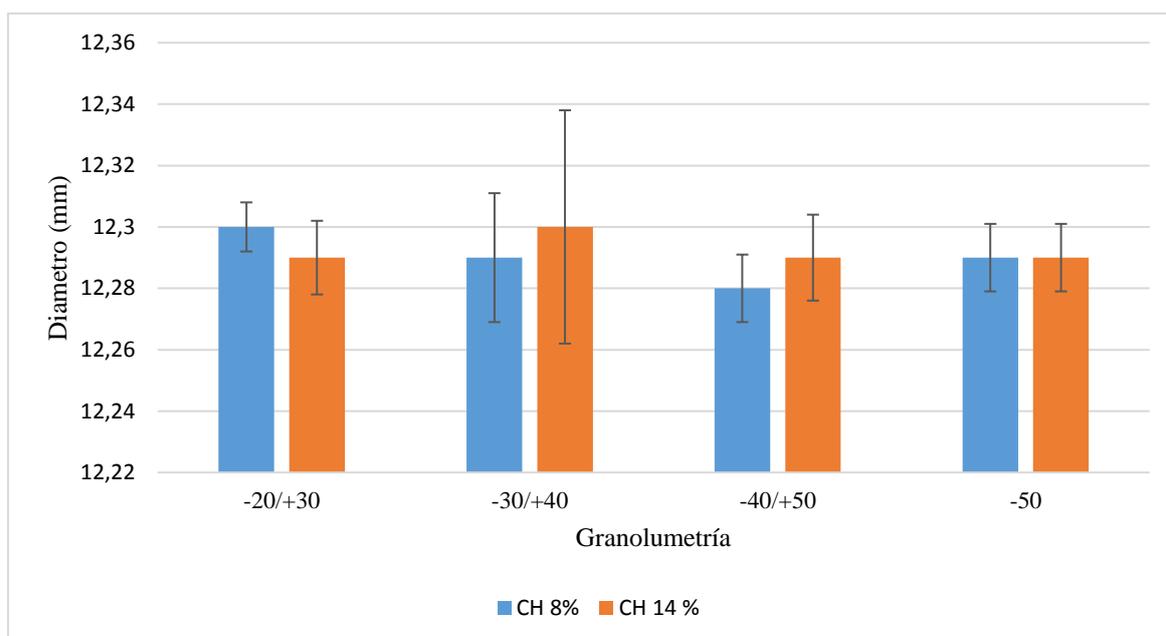
p<0.05 significativo, p<0,01 muy significativo

**Tabla 14: Valores promedios de las propiedades físicas de diámetro, longitud, densidad y friabilidad de los pellets con los diferentes tratamientos.**

Tratamiento	Diámetro		Longitud		Densidad		Friabilidad	
	Promedio (mm)	Desviación estándar	Promedio (mm)	Desviación Standard	Promedio	Desviación estándar	Promedio	Desviación estándar
<b>C820</b>	12,30 <sup>a</sup>	0,008	9,86 <sup>e</sup>	0,190	860,90 <sup>a</sup>	15,010	1,31 <sup>a</sup>	0,310
<b>C830</b>	12,29 <sup>b</sup>	0,021	9,59 <sup>d</sup>	0,190	880,89 <sup>b</sup>	14,190	1,23 <sup>a</sup>	0,280
<b>C840</b>	12,28 <sup>b</sup>	0,011	9,08 <sup>b</sup>	0,170	939,88 <sup>e</sup>	15,930	0,76 <sup>b</sup>	0,380
<b>C850</b>	12,29 <sup>b</sup>	0,011	8,69 <sup>a</sup>	0,180	970,72 <sup>f</sup>	21,690	0,41 <sup>c</sup>	0,230
<b>C1420</b>	12,29 <sup>a b</sup>	0,012	10,6 <sup>g</sup>	0,200	820,42 <sup>d</sup>	11,440	0,64 <sup>b</sup>	0,180
<b>C1430</b>	12,30 <sup>a</sup>	0,038	10,00 <sup>f</sup>	0,230	865,60 <sup>a</sup>	16,690	0,63 <sup>b</sup>	0,510
<b>C1440</b>	12,29 <sup>a b</sup>	0,014	9,92 <sup>e f</sup>	0,220	876,12 <sup>b</sup>	16,040	0,64 <sup>b</sup>	0,200
<b>C1450</b>	12,29 <sup>a b</sup>	0,011	9,99 <sup>c</sup>	0,290	925,59 <sup>c</sup>	17,300	0,72 <sup>b</sup>	0,280

## 2.1 DIÁMETRO

Los pellets presentaron los siguientes diámetros promedios: 12,28 mm para el pellets de tratamiento C840; 12,29 mm para los pellets de tratamientos C830, C850, C1420, C1440 y C1450; por último se obtuvo un diámetro promedio de 12,30 mm para los pellets de código C820 y C1430. En la figura 27 se representa los valores promedios de diámetro obtenido con los diferentes tratamientos.



**Figura 27: Diámetros promedios de los pellets**

En análisis de varianza (ANVA) para el diámetro (tabla 13) indica que la variable granulometría, contenido de humedad y la interacción de humedad\*granulometría presentaron una influencia muy significativa.

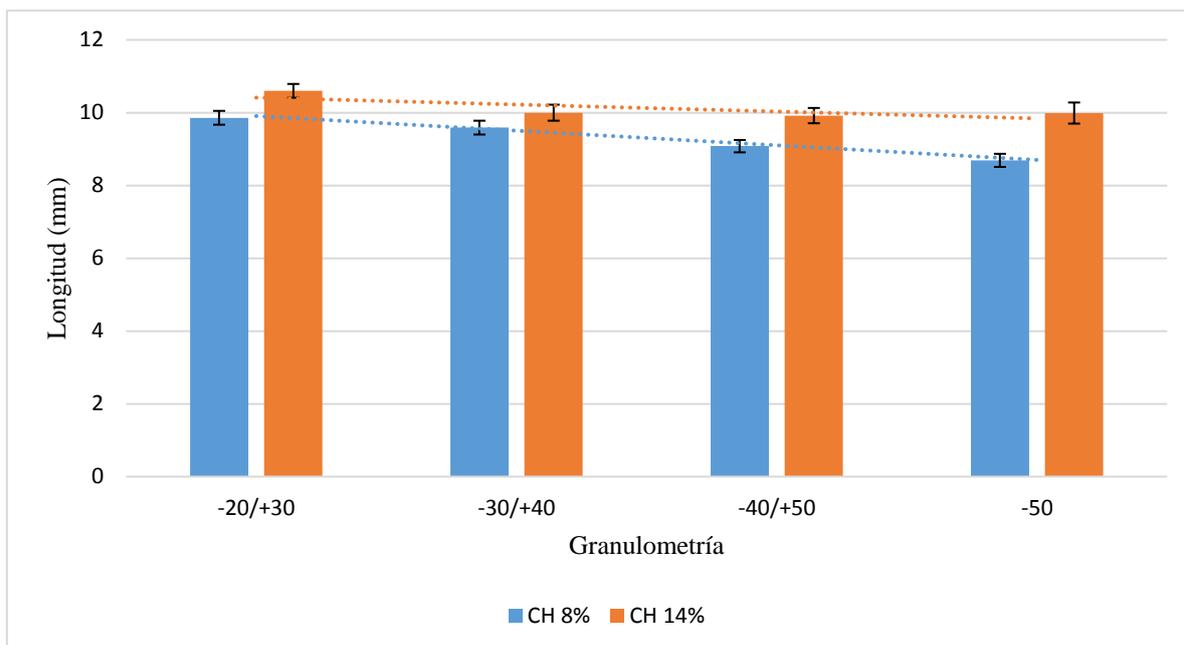
La prueba de t student indico que el tratamiento con mejor combinación de variable fue C840, presentado el valor más bajo de diámetro entre todas las interacciones y este fue estadísticamente similar a los tratamientos C830, C840, C850, C1420, C1440 y C1450.

Con respecto a los valores de diámetros obtenidos, estos se encuentran dentro de las dimensiones propuestas por Arpi y Calderón (2010) entre el rango de 5 a 22 mm, pero para la norma EN ENPLUS 16-127 los valores son mayores a lo establecido, ya que la norma establece diámetros de 6 a 8 mm. Una alternativa para obtener pellets con diámetros de 6 a 8 mm, es elegir el tamaño adecuado de orificio que es una característica fija propia de cada pelletizadora tal como lo describe Obernberger y Thek (2010). Por otra parte se debe tener presente que el tamaño de los rodillos y el diámetro de los agujeros de la matriz tiene un

efecto en el proceso de pelletizado, porque influye en la fuerza con el que el material granulado entra y se comprime.

## 2.2 LONGITUD

Las longitudes promedio obtenidas para los pellets fueron 9,86 mm para C820; 9,59 mm para C830; 9,08 mm para C840; 8,69 mm para C850; 10,6 mm para C1420; 10 mm para C1430; 9,92 mm para C1440 y 9,99 mm para C1450. En la figura 28 se representa los valores promedio de longitud obtenido con los diferentes tratamientos



**Figura 28: Longitud promedio de los pellets**

En el análisis de varianza (ANVA) para la longitud (tabla 13), se aprecia que la variable granulometría, contenido de humedad y la interacción de humedad\*granulometría presentaron una influencia muy significativa.

La prueba de t student indico que el tratamiento con mejor combinación de variable fue C850, presentado el valor más bajo para la longitud entre todas las interacciones y no presenta ningún valor semejante con los otros tratamientos.

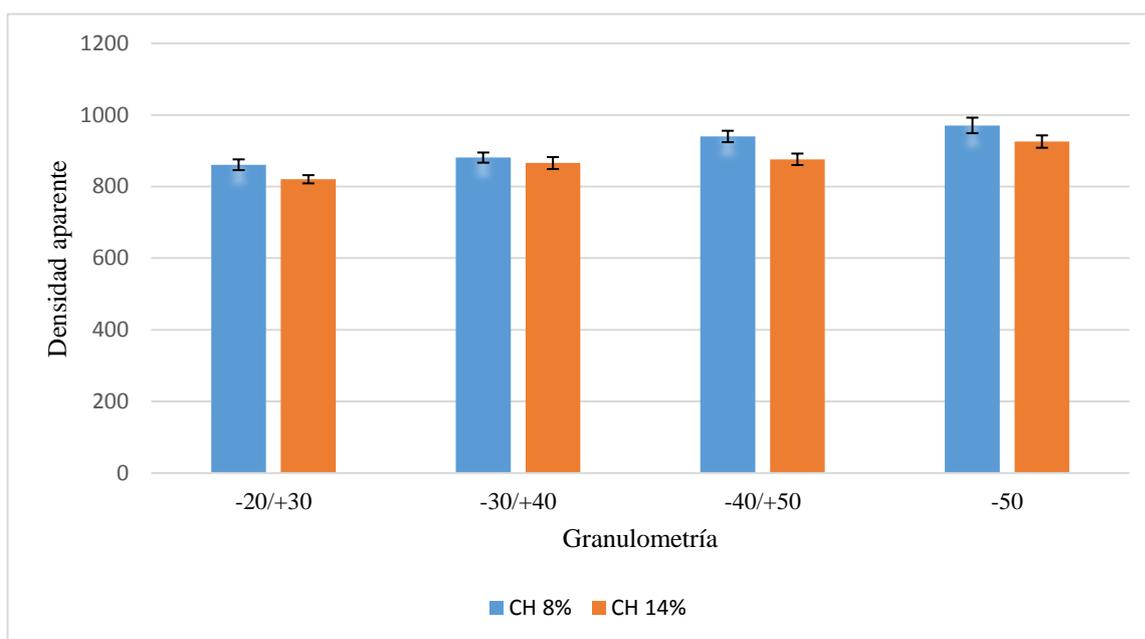
De las medidas obtenidas de longitud solo las de código C1420 y C1430 cumplen con las medidas establecidas por Arpi y Calderón (2010), porque se encuentran dentro del rango de 10 a 30 mm, en cambio para la norma ENPLUS EN 16-127 todos los valores de longitudes obtenidos cumplen con los dimensiones establecidos de 3,15 a 40,0 mm de longitud.

Respecto a la influencia de la humedad en la longitud, en la figura 28 se observa que la longitud aumento al incrementarse el contenido de humedad. Esto concuerda con lo dicho

por Zapata (2016) que describe que, aun aplicando una misma presión a partículas con contenido de humedad alto, esta fuerza no será capaz de compactar a las partículas, debido a que el agua presente en las partículas evita el aplastamiento y compactación de las mismas. Por otro lado, al relacionar el diámetro y longitud (Tabla 14) podemos notar que los pellets obtenidos no son esbeltos; ya que el diámetro es mayor a la longitud. Esta relación hará que los pellets sean más resistentes según lo señala Lehtinkangas (2011). El autor describe que los pellets esbeltos tienen una mayor sensibilidad a la rotura y menor resistencia mecánica.

### 2.3 DENSIDAD APARENTE

La densidad aparente promedio obtenida para los pellets fueron  $860,90 \text{ kg/m}^3$  para C820;  $880,89 \text{ kg/m}^3$  para C830;  $939,88 \text{ kg/m}^3$  para C840;  $970,72 \text{ kg/m}^3$  para C850;  $820,42 \text{ kg/m}^3$  para C1420;  $865,60 \text{ kg/m}^3$  para C1430;  $876,12 \text{ kg/m}^3$  para C1440 y  $925,59 \text{ kg/m}^3$  para C1450. En la figura 29 se representa los valores promedios de densidad aparente obtenido con los diferentes tratamientos



**Figura 29: Densidad aparente de los pellets**

En análisis de varianza (ANVA) para la densidad (tabla 13) indico que la variable granulometría, contenido de humedad y la interacción de granulometria\* contenido de humedad presentaron una influencia muy significativa.

La prueba de t student indico que el tratamiento con mejor combinación de variable fue C850, presentado el valor más alto para la densidad entre todas las interacciones y no presenta ningún valor semejante con los otros tratamientos.

Los resultados obtenidos en este trabajo, son iguales a los obtenidos por Mani et al (2006), ver tabla 15, y lo que describe es que las densidades aparentes de los pellets aumentan cuando se tiene un menor tamaño de partículas, esto debido a que las partículas pequeñas tienen un menor volumen.

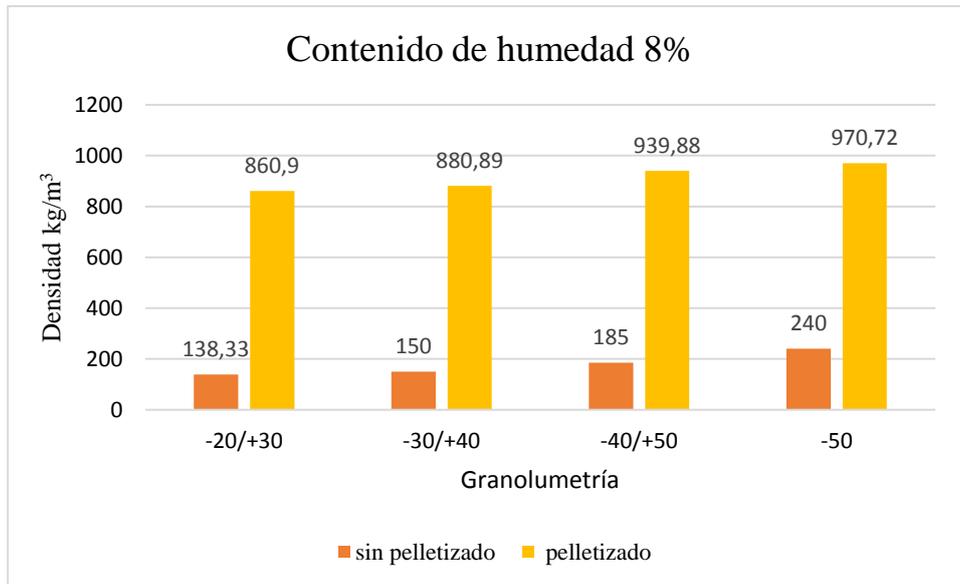
Con respecto al contenido de humedad se tiene que a mayor contenido de humedad menor será la densidad aparente tal como lo señala Mani et al (2006) quienes obtuvieron una disminución en la densidad de los pellets cuando el contenido de humedad aumenta de 12 a 15 por ciento.

**Tabla 15: Comparación de densidades con el tamaño de partícula**

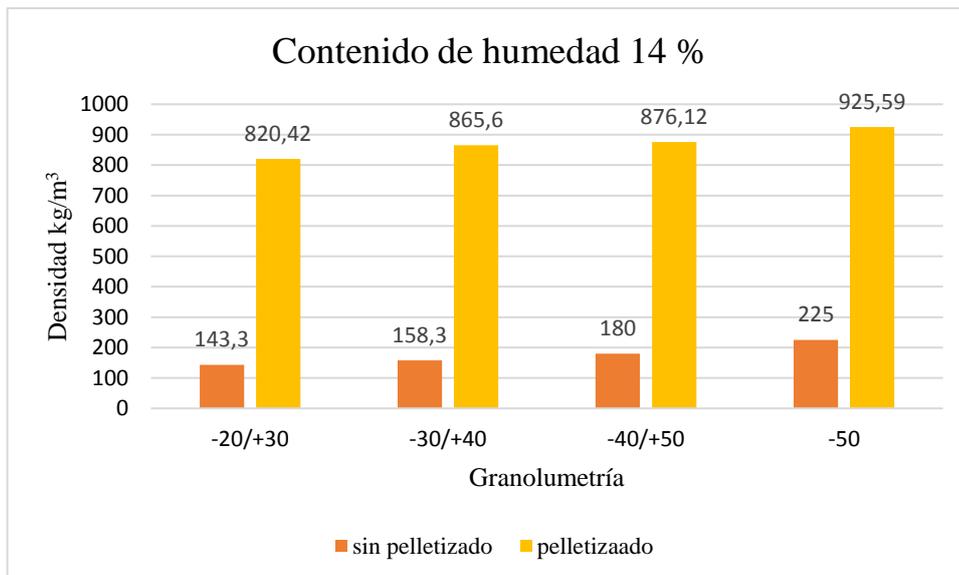
<b>Pellets</b>	<b>Contenido de humedad (%)</b>	<b>Tamaño de partícula(mm)</b>	<b>Densidad (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Referencia</b>
<b>Paja de trigo</b>	8,3	3,2	1026,57	Mani et al (2006)
		1,6	1258,45	
		0,8	1344,07	
<b>Paja de cebada</b>	6,98	3,2	887,34	
		1,6	1178,05	
		0,8	1245,36	
<b>Guadua angustifolia</b>	8,4	0,850-0,600	860,90	Presente estudio
		0,600-0,450	889,89	
		0,450-0,300	939,88	
		0,300	970,72	
	14	0,850-0,600	820,42	
		0,600-0,450	865,60	
		0,450-0,300	876,12	
		0,300	925,59	

En la figura 29 la densidad aparente disminuirá al tener un mayor contenido de humedad esto es debido a que el agua ocupa un lugar adhiriéndose a las partículas y reducen el aplastamiento debido a la incompresibilidad del agua, haciendo que la longitud y por lo tanto el volumen aumente.

En las figuras 30 y 31 se presentan las diferencias en las densidades aparentes entre las partículas con tamaño de malla -20/+30, -30/+40, -40/+50,-50 y la densidad de los pellets utilizando las mismas partículas. En las figuras se nota el incremento de las densidades aparentes de un residuo tamizado a un producto final (pellets), demostrando que el realizar el pelletizado aumenta la densidad aparente.



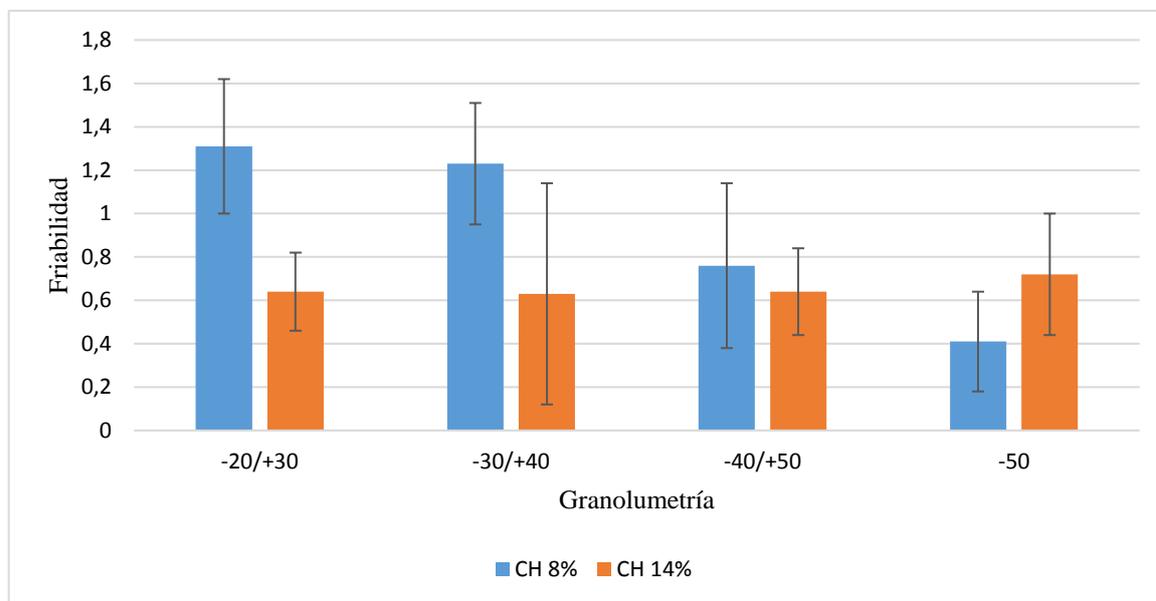
**Figura 30: Densidad aparente de las partículas y los pellets con CH de 8 por ciento**



**Figura 31: Densidad aparente de las partículas y los pellets con CH de 14 por ciento**

## 2.3 FRIABILIDAD

Los valores de friabilidad promedio obtenido para los pellets fueron 1,31 para C820; 1,23 para C830; 0,76 para C840; 0,41 para C850; 0,64 para C1420; 0,63 para C1430; 0,64 para C1440 y 0,72 para C1450. En la figura 32 se representa los valores promedios de friabilidad obtenido con los diferentes tratamientos.



**Figura 32: Friabilidad promedio de los pellets**

En análisis de varianza (ANVA) para la friabilidad (tabla 13) indico que la variable granulometría, contenido de humedad y la interacción granulometría\*contenido de humedad presentaron una influencia muy significativa.

La prueba de t student indico que el tratamiento con mejor combinación de variable fue C850, presentado el valor más bajo de friabilidad entre todas las interacciones y no presenta ningún valor semejante con los otros tratamientos.

El tamaño de partícula influye de manera importante en la durabilidad de los pellets Lee, Anh B, Choi, Han, Jeong, Anh S, y Yang (2013) elaboraron pellets de alerce y tulipwood, encontrando que los tamaños de partículas <1,41 mm fueron más durables que los fabricados con tamaños de partícula entre 1,41 y 3,17 mm, describiendo que la alta durabilidad se debe a que las partículas finas tienen una mayor área de superficie y tienen mayores enlaces entre las partículas. Kaliyan y Morey (2009) señala que al utilizar partículas finas (<1mm) se tiene mayor durabilidad e higroscopicidad, en comparación con partículas grandes (>1mm), esto debido a que existe una mayor superficie de contacto. Obernberger y Thek (2010) señalan

otro tamaño de partículas para producir pellets, recomendando utilizar partículas con un tamaño menor a 5 mm.

Por su parte Kaliyan y Morey (2009) señalan que a medida que la materia se comprima y la distancia entre partículas se reduzca, las fuerzas atractivas intermoleculares desempeñarán un papel en la unión de las partículas, como fuerzas de atracciones de valencia (intercambio de electrones), enlaces de hidrogeno y fuerza de Van de Waals. Diciendo que esta última fuerza es la que contribuye más a la unión entre partículas y que están iridisminuyendo a medida que aumente el tamaño de partícula.

Mediante la figura 30 se observa que los pellets con contenido de humedad de 8 por ciento tienen una friabilidad muy variable. Esto se debe a que la friabilidad se ve influenciada por el contenido de humedad, ya que el agua ayuda a desarrollar fuerzas de Van der Waals (Kaliyan y Morey, 2009 y Ahn et al, 2014). Si bien ellos encontraron que los pellets con contenido de humedad entre los 8 y 10 por ciento dan pellets fuertes y libres de grietas, esto no se cumple para los pellets de código C820 y C830 cuyo contenido de humedad fue 8 por ciento y tienen una friabilidad superior a 1 por ciento.

Fasina (2008) menciona que la humedad de las partículas al momento de pelletizar fortalece los enlaces entre las partículas, pero cuando la humedad no es apropiada disminuye la fuerza capilar entre las partículas, lo que da como resultado poca unión en la estructura del pellets generando grietas. Tenorio, Moya, Valaert y Tomazello (2015) realizaron pellets de *Tectona grandis* obteniendo que pellets con un 14 por ciento de humedad se encontraban desmoronados y que la friabilidad fue menor para los pellets con contenido de 12,06 en comparación con los pellets de 7,5 por ciento de humedad. De acuerdo a los diferentes autores podemos notar que el contenido de humedad óptimo abarcan un rango amplio para las diferentes especies y para el caso de la *G. angustifolia* Kunth los contenidos de humedad de 8 y 10 por ciento son óptimos pero no cuando se tiene un tamaño de partícula de 0,450 a 0,850 mm.

### 3. PROPIEDADES QUÍMICAS DE LOS PELLETS

#### 3.1 PODER CALÓRICO

En la tabla 16 se presentan los resultados promedio del poder calórico superior e inferior de los pellets.

**Tabla 16: Valores del poder calórico de los pellets**

Humedad inicial (%)	Granulometría	PCS (kcal.kg <sup>-1</sup> )	PCI (kcal.kg <sup>-1</sup> )	Contenido de Humedad final (%)
8	-20/+30	4144,47	3757	9,35
8	-30/+40	4155,3	3765,67	9,37
8	-40/+50	4083,53	3697	9,47
8	-50	4078,9	3684,67	9,67
14	-20/+30	4069,03	3625,33	10,91
14	-30/+40	4148,93	3694,33	10,96
14	-40/+50	3998,1	3541	11,43
14	-50	3996,1	3545,33	11,28

En la tabla 16 se tiene que los pellets con contenido de humedad de 8 por ciento tiene un poder calórico superior que va de 4144,47 kcal.kg<sup>-1</sup> a 4078,9 kcal.kg<sup>-1</sup>. Para los pellets con contenido de humedad de 14 por ciento el poder calórico va de 4069,03 kcal.kg<sup>-1</sup> a 3996,1 kcal.kg<sup>-1</sup>, A través de estos valores se ve cómo influye el contenido de humedad en el poder calórico, haciendo que este disminuya al tener un contenido de humedad mayor, concordando por lo dicho por Pérez et al (2008) quienes indican que el contenido de poder calórico disminuye proporcionalmente con el contenido de humedad.

Al comparar los pellets elaborados con *Bambusa vulgaris* cuyo poder calórico superior es de 4662,9 kcal.kg<sup>-1</sup>, *Dendrocalamus asper* cuyo poder calórico superior es 4526,2 kcal.kg<sup>-1</sup> y *Bambusa tuldoies* cuyo poder calórico superior es 4515,1 kcal.kg<sup>-1</sup> y contenido de humedad se encuentran entre 7,5 a 7,9 por ciento, estas especies, las cuales pertenecen a la misma familia tiene un mayor poder calórico que la especie estudiada. Comparándola con latifoliada y una conífera *Eucayptus globulus* cuyo poder calórico superior es 46201,17 kcal.kg<sup>-1</sup> y para el *pino radiata* 4941,20 kcal.kg<sup>-1</sup>. Vega-Nieva et al (2015), los poderes calóricos de la *Guadua angustifolia* Kunth son diferentes para las latifoliadas y coníferas debido a que estas tienen una composición química diferentes, sea en contenido de celulosa hemicelulosa, lignina y extractivos.

Lozada (2012) describe que existe una variación en la composición química de la *G. angustifolia* Kunth en su capa externa, capa interna y porción de nudo, ver tabla 1. En el presente trabajo se utilizaron una combinación de todas sus partes, ya que se utilizaron residuos, esto no influirá en el poder calórico ya que según Rodrigues, Da Silva, Vieira y Moutinho (2017) no existe una diferencia estadística cuando analizaron el poder calórico para la especie *Dipterix odorata* con diferentes tipos de madera joven, adulta y de reacción/tracción. Indicando que los residuos independientemente de la posición de la que se encuentren o sean aprovechadas tendrán un desempeño semejante cuando sean sometidos a combustión.

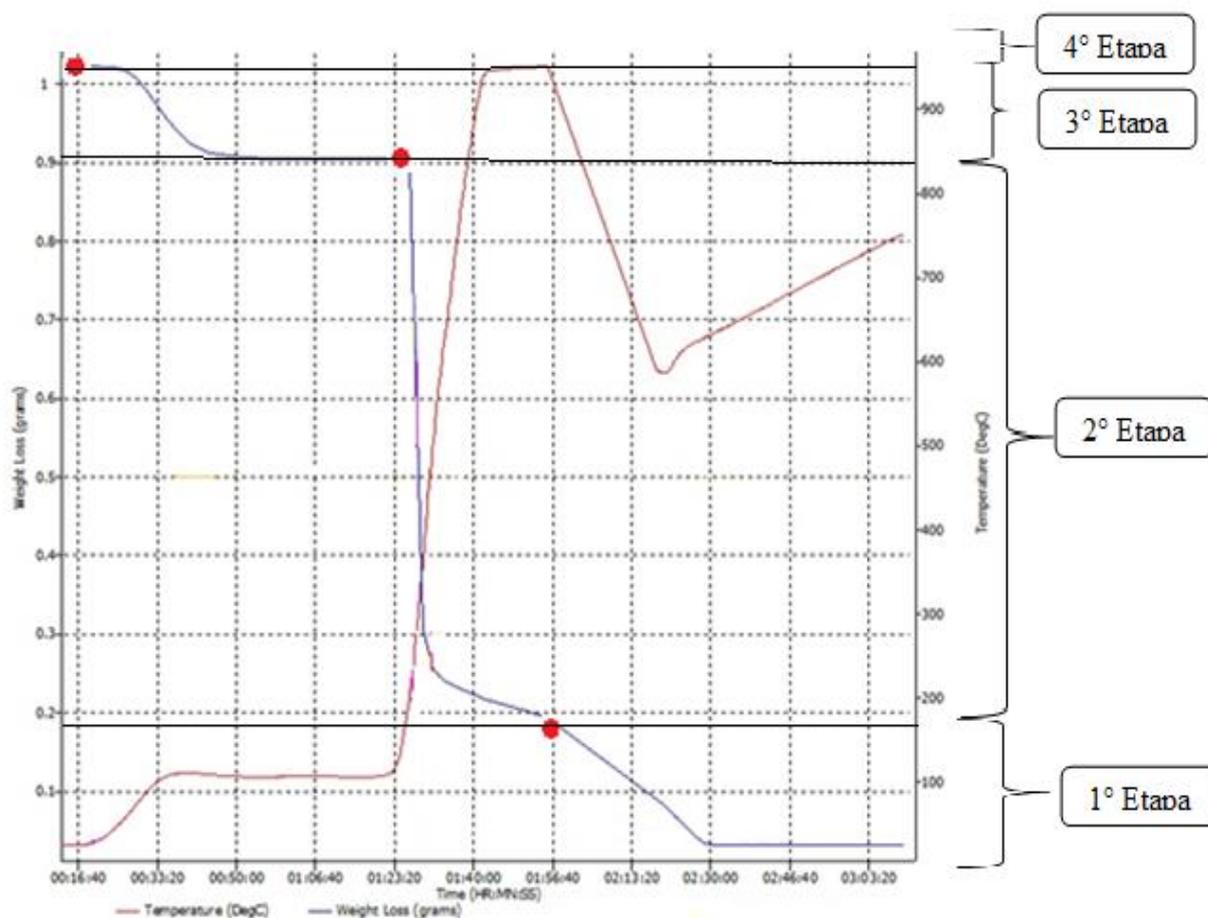
Por otro lado comparando los valores obtenidos en la tabla 16 con la tabla 6; que muestra las propiedades de los diferentes biocombustibles sólidos; el poder calórico de los pellets de Guadua solo es mayor para las astillas y leña y menor para las briquetas y pellets.

En cuanto al potencial energético, al comparar 1 kilo de pellets de *Guadua angustifolia* Kunth comparándolo con un combustible (gas natural) se tiene que 1 kilo de pellets de *Guadua angustifolia* Kunth equivale a 0,44 m<sup>3</sup> de gas natural.

Teniendo presente cual es la producción de residuos de *Guadua angustifolia* Kunth 24,44 t/ha/ año de guadua (Gonzales, 2005) y el porcentaje que se puede aprovechar para realizar pellets (87,28%) se tiene un equivalencia de producción de gas natural de 81665,60 m<sup>3</sup> de gas natural, por cada hectárea al año aprovechada de *Guadua angustifolia* Kunth.

#### 4 PROPIEDADES FISICO QUIMICAS DE LOS PELLETS

A continuación se muestran las curvas del análisis termogravimétricos para el pellets con contenido de humedad 14 y granulometría -50; ver figura 33



**Figura 33: Curvas termogravimétricas del pellets con contenido de humedad 14 y granulometría -50**

En la figura 33 se observan 4 etapas y como es la disminución del peso a través de la combustión. En la etapa 1 o etapa de secado en donde la materia pierde 9,35 por ciento de su peso inicial al llegar a los 168°C. Luego a partir de la temperatura 168°C comienza la etapa 2 o etapa de descomposición, donde la materia pierde el 77,25 por ciento de su masa inicial, lo cual correspondió a la liberación de materiales volátiles. La etapa 3 empezó con una temperatura de 837 °C donde se da la ignición de los carbonos fijos, los cuales representan el 9,20 por ciento de la masa. Por último, la etapa 4 empieza a los 856°C hasta 950°C donde se estabiliza la temperatura y se da la formación de las cenizas con un valor de 3,69 por ciento.

**Tabla 17: Resultados promedios del contenido de humedad, material volátil, carbono fijo y contenido de cenizas con sus correspondientes temperaturas para los pellets**

<b>Humedad</b>	<b>Granulometría</b>	<b>Contenido de Humedad final (%)</b>	<b>Fase 1 (°C)</b>	<b>Material volátil (%)</b>	<b>Fase 2 (°C)</b>	<b>Carbono fijo (%)</b>	<b>Fase 3 (°C)</b>	<b>Cenizas (%)</b>	<b>Fase 4 (°C)</b>
<b>8</b>	-20/+30	9,35	18-111	77,25	111-858	9,75	858-882	3,69	882-958
<b>8</b>	-30/+40	9,37	18-107	77,69	107-157	9,78	157-885	3,28	885-957
<b>8</b>	-40/+50	9,47	18-115	78,13	115-862	9,62	862-868	3,3	868-950
<b>8</b>	-50	9,67	18-175	77,13	175-850	8,97	843-850	3,12	850-956
<b>14</b>	-20/+30	10,91	18-116	75,47	116-875	8,74	875-883	3,57	883-966
<b>14</b>	-30/+40	10,96	18-108	76,25	108-866	8,94	866-883	3,48	883-965
<b>14</b>	-40/+50	11,43	18-126	75,94	126-860	9,90	860-866	3,14	866-960
<b>14</b>	-50	11,28	18-168	76,16	168- 837	9,20	837-856	3,15	856- 950

A través del análisis físico-químico a los pellets se obtuvieron los valores de contenido de humedad, material volátil, carbón fijo y contenido de cenizas. (Ver tabla 17).

Con respecto al comportamiento de los pellets de *Guadua angustifolia* Kunth en la combustión, estos tienen los siguientes rangos de temperaturas según cada etapa. Para la etapa 1 o etapa de secado los rangos van de 18°C a 175° C; la etapa 2 o etapa de descomposición térmica va de 107 ° a 875 ° C, aquí se observa en la figura 33 que es la etapa donde se registra una mayor pérdida de masa, tal como lo señala Madrid (2012). Luego le sigue la etapa de combustión de gases que van de 857°C a 885°C, aquí es donde los materiales volátiles liberados en la etapa anterior entran en descomposición, por último le sigue la etapa de la combustión carbonizada con rangos alcanzados entre 850°C a 966 °C.

En la tabla 17 se presenta el contenido de humedad final para cada pellets, cuyos valores no son iguales al contenido de humedad inicial, esto es debido a que la biomasa con tamaño menores a 1 mm son mucho más higroscópicas según lo menciona Kaliyan y Morey (2009). Entonces los valores finales del contenido de humedad se deben a que los pellets interactúan con el medio y han ganado humedad para el caso del contenido de humedad de 8 por ciento y perdido humedad para el caso de 14 por ciento. Esta ganancia o pérdida de humedad en los pellets se da por los extremos como lo señalan Lehtikangas, 2000 quienes destacan que si bien el pellets tiene una superficie dura que lo rodea esta no está presente en los extremos del pellets, lugar por donde se ganara o perderá humedad.

El contenido de material volátil para los pellets de *Guadua angustifolia* Kunth descrito en la tabla 17, tienen valores entre los 75, 94 y 77,25 por ciento, los cuales están compuestos según Castell et al (2005) por carbono, hidrogeno y compuestos gaseosos. Este rango obtenido concuerda con el rango propuesto por Sjaak y Koppejan, (2008) el cual va de 70 a 86 por ciento. Comparando el contenido de material volátil para pellets de bambú como *Bambusa vulgaris*, *Dendrocalamus asper*, *Bambusa tuldooides*, el porcentaje es de 74,7; 75 y 75,2 respectivamente valores similares a los pellets de *Guadua angustifolia* Kunth. Lo contrario sucede al comparar el contenido de carbono fijo ya que para *Bambusa vulgaris*, *Dendrocalamus asper*, *Bambusa tuldooides* tienen un porcentaje de 22,8; 23; 21,8 respectivamente, valores mayores a los obtenido por los pellets de *Guadua angustifolia* Kunth cuyos valores van de 8,74 a 9,90 por ciento.

Con respecto al contenido de cenizas los valores obtenidos van de 3,12 a 3,69 por ciento, valores que se encuentran por encima de los requisitos de la norma UNE-CEN/TS 14961-2:2012. Al utilizar los pellets con ese contenido de cenizas se ocasionaran problemas de obstrucción en los hornos.

**Tabla 18: Comparación de pellets de *Guadua angustifolia* Kunth con la norma EN 14961-2**

Propiedades	Unidades	Valores	Datos de los pellets de <i>Guadua angustifolia</i> Kunth							
			C820	C830	C840	C850	C1420	C1430	C1440	C1450
Código			<b>-20/+30</b>	<b>30/+40</b>	<b>-40/+50</b>	<b>-50</b>	<b>-20/+30</b>	<b>30/+40</b>	<b>-40/+50</b>	<b>-50</b>
Granulometría										
Contenido de humedad inicial			8%	8%	8%	8%	14 %	14 %	14 %	14 %
Diámetro D	mm	6-8	12,30	12,29	12,28	12,29	12,29	12,30	12,29	12,29
			No	No	No	No	No	No	No	No
Longitud L	mm	3.15-40.0	9,86	9,59	9,08	8,69	10,6	10,00	9,92	9,99
			Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
Humedad M	% base húmeda	M≤10	9.35	9.37	9.47	9.67	10.91	10.96	11.43	11.28
			Si	Si	Si	Si	No	No	No	No
Cenizas, A	% en masa base húmeda	≤3.0	3.69	3.28	3.3	3.12	3.57	3.48	3.14	3.15
			No	No	No	No	No	No	No	No
Finos		≤1.0	1,31	1,23	0,76	0,41	0,64	0,63	0,64	0,72
			No	No	Si	Si	Si	Si	Si	Si



Mediante la información leída, se conoce cuáles son los mercados de producción y consumo de pellets. Encontrándose que los consumidores y productores son los países pertenecientes a Europa, los cuales se han unificado y establecido una sola norma de evaluación de código EN 14961-2 la cual regula las características y calidad de los pellets para su utilización. En la tabla 8 se describen las propiedades y los rangos que la norma establece además de la clasificación que da de acuerdo de donde proviene la materia prima, teniendo tres categorías Enplus-A1, Enplus-A2 y Enplus B. La clasificación para los pellets de *Guadua angustifolia* Kunth se encuentran en la categoría Enplus B ya que la materia prima se originó a partir de residuos de la industria de la madera (proceso de transformación de culmos a latillas)

En la tabla 18 se presentan las características físicas, químicas y físicas-químicas y se comparan con los pellets de diferentes granulometría y contenido de humedad. Teniendo que el diámetro no concuerda con lo establecido por la norma; esto se puede cambiar utilizando las dimensiones adecuadas de los orificios de la pelletizadora. Lo contrario sucede con la longitud ya que presenta valores que si concuerdan con la norma. Para el contenido de finos los valores obtenidos cumplen con la norma excepto los de código C820, C830 ya que tiene una friabilidad superior a 1 por ciento. Para el caso de la densidad el resultado obtenido si cumple con el rango establecido por la norma, obteniéndose densidades mayores a 600 kg/m<sup>3</sup>.

Para el contenido de humedad de los pellet de código C820, C830, C840, C850 que tienen una humedad inicial de 8 por ciento si cumplen con lo fijado por la norma es cual es un contenido menor a 10 por ciento, lo contrario sucede para los pellets de código C1420, C1430, C1440 Y C1450 que tiene un contenido de humedad superior a 10 por ciento.

Con respecto al contenido de ceniza, contenido de nitrógeno y contenido de azufre las cantidades de los pellets son superior a lo establecido por la norma. En la comparación del poder calórico inferior, las cantidades obtenidas para los pellets es mucho menor

Habiendo comparado las propiedades evaluadas para los pellets de *Guadua angustifolia* Kunth con los diferentes tipos de granulometría y humedad, ninguno de los pellets cumple en su totalidad con lo que propone la norma.

## V. CONCLUSIONES

- Los residuos provenientes del laminado de *Guadua angustifolia* Kunth tienen un tamaño y contenido de humedad adecuado lo cual hace factible su utilización para producir pellets ya que con el proceso de pelletizado se logra aumentar la baja densidad aparente de los residuos.
- El volumen de reutilización de los residuos de *G. angustifolia* con tamaño menor a 1mm es 87,28 por ciento debido a la disponibilidad aptas para la realización de pellets que no requerirán de una reducción granulométrica. El otro volumen restante es 12,72 por ciento corresponde a nudos, partículas más grandes y fracciones indeseadas.
- La humedad y granulometría afectan significativamente las propiedades físicas, químicas y físico-químicas de los pellets.

## **VI. RECOMENDACIONES**

- Se recomienda realizar pretratamientos a la biomasa de *Guadua angustifolia* Kunth, como la torrefacción y agregación de aglomerantes con el objetivo de conocer su influencia en las propiedades de friabilidad y poder calórico.
- Se recomienda realizar estudios sobre viabilidad económica para la producción de pellets.

## VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahn, B.; Chang, H.; Lee, S.; Choi, D.; Cho, S.; Han, G.; Yang, S. (2014). Effect of binders on the durability of wood pellets fabricated from *Larix kaemferi* C. and *Liriodendron tulipifera* L. sawdust. *Renewable Energy*. 62, 18-23.
- Aguirre, JA.; Mendez, J; Paez, G.; Soto, J.; Sandoval, J. (2000). Evaluación económica y ambiental de residuos forestales en aserraderos de Costa Rica. *Revista forestal Centroamericana* N° 30:303
- Álvarez, J.; Días, S.; Alessandrini, M. (2001). Convenios mundiales sobre los bosques: Utilización racional de los residuos forestales. *Unalylva* N°256. Disponible en: <http://www.fao.org/forestry/unasylva>
- Andrade, F.; Nobre, L.; Da Silva, J.; Moutinho, V.(2017). Potencial energético da biomassa e carvão vegetal de resíduos de castanha-do-pará (*bertholletia excelsa* bonpl.)III. CBCTEM. Congresso Brasileiro de Ciencia e tecnologia da Madeira. Florianópolis. 8p.
- Angeles, F. (2014). Propiedades físicas y mecánicas de la *Guadua angustifolia* con fines estructurales. (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de Cajamarca. Cajamarca, Perú.
- Añazco, M. & Rojas, S. (2015). Estudio de la cadena desde la producción al consumo del Bambú con énfasis en la especie (*Guadua angustifolia*) en Ecuador. Quito, EC.
- Arpi, J. & Calderón, J. (2010). Diseño de una maquinaria pelletizadora en base a la disponibilidad de residuos madereros de la ciudad de cuenca para su aprovechamiento energético. (Tesis de pregrado). Universidad Politécnica Salesiana. Cuenca, Ecuador. Recuperado de <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/83>
- ASTM D7582 Standard Test Methods for Proximate Analysis of Coal and Coke by Macro Thermogravimetric Analysis
- ASTM D5865 Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and coke

ASTM D5373 Determination of Carbon,Hydrogen and Nitrogen in Analysis Samples of Coal and Carbon in Analysis Samples of coal and Coke

ASTM D4239 Standad Test Method for Sulfur in the Analysis Sample of Coal and Coke

Becerra, J. (2013). Análisis energético y ambiental en la producción de tableros de esterillas de Guadua laminada. (Tesis de pregrado). Universidad tecnológica de Pereira. Pereira, Colombia. Recuperado de <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/handle/11059/4196>

Bobadilla, B. & Cobian, J. (2016). Plan de manejo de residuos sólidos del proceso de producción de una empresa maderera. 2016. (Trabajo de pregrado). Universidad Nacional Agraria La Molina.Lima. Perú.

Bustamante, V.; Carrillo, A.; Prieto, J.; Corral, J.; Hernández, J. (2016). Química de la biomasa vegetal y su efecto en el rendimiento durante la torrefacción. Revista Mexicana de Ciencias Forestales. Vol. 7(38) 5-24.

Cabrera, M.; Vera, A.; Cornejo,J.; Ordas, I.; Tolosana, E.; Ambrosio, Y.; Martínez, I.; Vignote, S.; Hotait,N.; Lafarga,A; .Garraza,J.(2011). Evaluación del potencial de energía de la biomasa. Estudio técnico PER 2011-2020.Madrid. ES.

Camps, M.& Marcos, F. (2008). Los biocombustibles. 2ed.Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, ES.

Camargo, J.; Arango, A.; Amezquita, M. (2012). Evaluación de la oferta de residuo de biomasa de guadua para propósitos energéticos en el eje Cafetero de Colombia. Recursos Naturales y Ambiente N° 65-66: 90-94.

Cancho, D. (2015).Estudio de los parámetros de pelletizado de residuos biomasicos en pelletizadora semi-industrial. (Tesis de Pregrado). Universidad de Extremadura .Badajoz. España. Recuperado de <https://docplayer.es/75378456-Estudio-de-los-parametros-de-pelletizado-de-residuos-biomasicos-en-pelletizadora-semi-industrial.html>

- Carmona, R. (2015). Caracterización física, química y energética de biomasa leñosa como materia prima biocombustible. (Tesis doctoral). Universidad de Córdoba. Córdoba, España. Recuperado de <https://helvia.uco.es/xmlui/bitstream/handle/10396/13089/2015000001202.pdf?sequence=1>
- Carrasco, J. (2008). Modulo: Biomasa. Introducción a la biomasa como recurso energético. EOI. ES. 35p.
- Carrasco, J. (2008). Combustión directa de la biomasa. Modulo: Biomasa. EOI.ES 30p
- Castells, X.; Cadavid, C.; Campos, P.; Flotats, R.; García, M.; Gaya, F.; Velo, G. (2005). Tratamiento y valorización energética de residuos. España.
- CENER. Centro Nacional de Energías renovables. ADEMAN, Asociación de Empresarios de la Madera de Navarra, FORESNA. Asociación forestal de Navarra. ANAFONCA. Asociación de empresas de fontanería, calefacción, climatización, gas, prevención de incendios y afines de Navarra. (2015). Combustibles de biomasa Tipos y características. III Plan energético de Navarra horizonte 2020. 14p.
- Charpentier, G. (2014). Manejo integrado del bambú (*Guadua angustifolia*).SEPSA.C. Rica.
- CNE Comisión Nacional de Energía. Instituto forestal (INFOR) Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ).(2007).Disponibilidad de residuos madereros. Residuos de la industria primaria de la madera, Disponibilidad para uso energético. ByB impresores. Santiago de Chile, Chile.
- Clarke, S.; Eng, P.; Preto, F. (2011). Biomass densification for energy production. Factsheet. Order N° 11-035.
- Coordinación de Energías Renovables. Dirección Nacional de Promoción Subsecretaria de Energía Eléctrica. (2008). Energías Renovables. Energía Biomasa. Secretaria de energía. Argentina.
- Correa, F.; Carrillo, A.; Guadalupe, J.; Márquez, F.; Gonzales, H.; Jurado, E.; Garza, F. (2013). Distribución granulométrica en subproductos de aserrío para su posible uso en pellets y briquetas. Revista mexicana de ciencias forestales. Vol.5 Numero25.

- Costa, A. (2013). Biomasa y Biocombustibles. Una vision completa de las tecnologias empleadas en la transformacion de la biomasa en biocombustible. AMV-EDICIONES.Madrid, España.
- Cruz,H.(2009).Bambu-Guadua: Guadua angustifolia Kunth. Bosques Naturales en Colombia y Plantaciones comerciales en Mexico. 1 ed. Pereira,Risaralda,Colombia.
- De Juana, J.;Santos,F.;Crespo,A.; Herrero,M.; De Francisco,A.; Fernandez,J. (2008). Energias renovables para el desarrollo. Thomson ediciones. Madrid, ES. 311 p.
- De Navas, E. (2011). Aplicaciones estructurales de la guadua (*Guadua angustifolia* kunth): Proyecto de estructura modular multifuncional en Colombia. (Tesis de pregrado). Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, España. Recuperado de [http://oa.upm.es/13719/1/PFC\\_Elvira\\_de\\_Navas\\_Gutierrez.pdf](http://oa.upm.es/13719/1/PFC_Elvira_de_Navas_Gutierrez.pdf)
- ENPlus, (2011). Pellets calidad europea. <http://www.pelletenplus.es/>
- Enders, A.; Hanley, K.; Whitman, T.; Joseph, S.; Lehmann, J. (2012). Characterization of biochars to evaluate recalcitrance and agronomic performance. Bioresour Technol 114:644-53.
- Eliseo, V. & Zucolli, L. (2008). Manual de combustibles de madera. Producción, Requisitos de calidad, comercialización. Graficas Germinal, S. y Gutiérrez C.L.82 p.
- Esteban, L. (2010). Fuentes y Evaluación de recursos. Ing. G.-G.D Sebastián. Energía de la biomasa. Zaragoza ES. Prensas Universitarias de Zaragoza. 557p
- Exposito, S. (2015).Determinación del contenido de humedad en biocombustibles solidos de origen forestal mediante tecnología microondas. (Tesis de maestría). Universidad de Oviedo. Oviedo, España. Recuperado de <http://digibuo.uniovi.es/dspace/handle/10651/33177>
- Fasina, O. (2008). Physical properties of peanut hull pellets. Bioresource Technology. Volumen.99.1259-1266 p
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación).(2001). Utilización racional de los residuos forestales. Recuperado de <http://www.fao.org/docrep/003/y1237s/y1237s10.htm>

- Fernández, J. (2006). Materias primas para producción de biocombustibles sólidos. 5<sup>as</sup> Jornadas Ambulenses de Energías Renovables. Ávila, ES .50 Diapositivas
- Fernández, H.; Oliver, J.; Valiente, M.; Verdu, S.; Albert, N. (2014).Desarrollo de pellets a partir de tres especies leñosas bajo condiciones mediterráneas. Madera y Bosque.Vol 20,Num 2:97-111
- Ferreira, W. (2002). Utilização energética de resíduos vegetais. Laboratorio de productos florestais LPF/IBAMA.
- Ferreira, W. & Otavio, J. (1991). Características e índice de combustão de briquetes de carvão vegetal. Trabalho extraído da Dissertação de mestrado apresentada à ESALQ/USP para obtenção do título de mestre em Ciências Florestais do 1º autor.
- Fredes, M. (2014). Evaluación técnica y económica de una planta de producción de combustibles sólidos a partir de biomasa forestal en la región de los Lagos. (Tesis de pregrado). Universidad de Chile. Santiago, Chile. Recuperado de <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/116613>
- Gauthier, G.; Jossart, Calderon, C. (2016). Pellets market overview. Aebiom statistical report. European Biomass Association. Bruselas, Bélgica.
- Gonzales, H. (2005).Elaboración de una propuesta para el aprovechamiento y la transformación del bambú en el ámbito de PRODAPP (Puerto Inca-Oxapampa).122p.
- Gonzales, P. (2006). Disponibilidad de residuos madereros provenientes de la industria primaria de la madera para usos energético XI región de Aysen. Seminario Hacia una política Nacional de Bioenergía región de Aysen. Coyhaique.CL.37 diapositivas
- González, J. (2009). Energías renovables. Reverte S.A. Barcelona. ES. 656 p.
- Goche, J.; Domínguez, P.; Montiel, E.; Palacios.L (2015). Capitulo1. Biocombustibles sólidos, una opción sustentable para la producción de energía. Biocombustibles sólidos. 1ed. Universidad autónoma de Nuevo León. Monterrey.Mexico.
- Grover, P. & Mishra,S. (1996). Biomass Briquetting: Technology and Practices. Fiel document N° 46. Bangkok, Tailandia.

- Gutiérrez, G. (2015). Caracterización de los productos obtenidos por destilación seca del bambú (*Guadua angustifolia* Kunth) procedentes del distrito de la Florida, San Miguel, Cajamarca. (Tesis de pregrado). Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima, Perú.
- Huelmo, D. (2017). Biomasa. Definición y características. Introducción a los procesos tecnológicos industriales. 127 diapositivas. Recuperado de <https://docplayer.es/25868498-Biomasa-definicion-y-caracteristicas.html>
- IDAE. Instituto para la diversificación y ahorro de la energía. Guía técnica. Instalaciones de biomasa térmica en edificios. (2009). Madrid, España.
- IDAE. Instituto para la diversificación y ahorro de la energía. (2007). Energía de la biomasa. Manuales de energía renovable. Madrid, España.
- IDAE. Instituto para la diversificación y ahorro de la energía. (2008). Biomasa industria. Energía de la biomasa. Madrid, España.
- Kaliyan, N. & Morey, V. (2009). Factors affecting strength and durability of densified biomass products. *Biomass Bioenergy* 33. 337-359.
- Lehtikangas, P. (2000). Storage effects on pelletised sawdust, logging residues and bark. *Biomass and Bioenergy*. 19 287–293.
- Lehtikangas, P. (2001). Quality properties of pelletised sawdust, logging residues and bark. *Biomass and Bioenergy*. (20)351-360
- Lerma, V. (2015). Planificación, logística y valorización de biomasa forestal residual en la provincia de Valencia. (Tesis. Doctoral). Universidad Politécnica de Valencia. España..
- Lee, S.; Ahn, B.; Choi, D.; Han, G.; Jeong, H.; Anh, S.; Yang, I. (2013). Effects of densification variables on the durability of wood pellets fabricated with *Larix kaempferi* C. and *Liriodendron tulipifera* L. sawdust. *Biomass Bioenergy* 48. 9p.
- Londoño X. (2002). Distribución, Morfología, Taxonomía, Anatomía, Silvicultura y Usos de los Bambúes del Nuevo Mundo. Maestría en Construcción – Módulo Guadua. Santa Fe de Bogotá. CO. Universidad Nacional de Colombia.

- Londoño, X.; Camayo, G.; Riaño, N.; López, Y. (2002). Characterization of the anatomy of *Guadua angustifolia* (Poaceae: Bambusoideae) culms. *The Journal of the American Bamboo Society* 16 (1): 18-31.
- López, L. (2018). Obtención y evaluación de paneles laminados con *Guadua* sp. Procedentes de la región Nor- Oriental del Perú. Círculo de investigación para el desarrollo de la cadena de valor del bambú para el desarrollo científico y tecnológico, CI-BAMBÚ
- Lozada, C. (2012). Determinación experimental de la durabilidad de tableros derivados de bambú (*Guadua angustifolia* Kunth), mediante pruebas de envejecimiento aceleradas. (Tesis de pregrado). Universidad de Guayaquil. Guayaquil, Colombia. Recuperado de <http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/2191>
- Madrid, A. (2012). La biomasa y sus aplicaciones energéticas. CIMAPRESS. Madrid. España.
- Mande, S. (2009). Thermo chemical conversión of biomass. *Renewable energy engineering and technology*. New Delhi.
- Mani, S.; Tabil, L.; Sokhansanj, S. (2003). An overview of compaction of biomass grinds. *Powder Handl,Process. Powder Handlingk processing*. Vol.15.Nº2. 160-168.
- Mani, S.; Tabil, L.; Sokhansanj, S. (2006). Effects of compressive force, particle size and moisture content on mechanical properties of biomass pellets from grasses. *Biomass and Bioenergy*. 30, 648-654.
- Melgar, A.; Borge, D.; Pérez, J. (2008). Estudio cinético del proceso de devolatización de biomasa lignocelulósica mediante análisis termogravimétricos para tamaños de partículas de 2 a 19 mm. *DYNA*. Volumen 75, Nº155,123-131.
- MINAGRI (Ministerio de Agricultura y Riego). (2010). Plan Nacional de Promoción del Bambú 2008-2020. 2<sup>da</sup> ed, Peru.
- Mohammad, A.; Aboali, G.; Ashkan, H.; Pourya, S. (2018). *Wood pellet as a Renewable Source of Energy*. Springer International Publishing. 197p.
- Murillo, J. (2014). Estudio del potencial biomásico forestal arbóreo en la generación de bioenergía para zonas no interconectadas del valle del cauca y caldas utilizando sensores remotos. (Tesis de Maestría). Universidad Nacional de Colombia. Palmira, Colombia. Recuperada de <http://bdigital.unal.edu.co/12922/1/6011509.2014.pdf>

- Ngangyo, M.; Foroughbak, R.; Carrillo, A.; Salas, L. (2015). Capítulo 5. Conceptualización y caracterización de los pellets madereros en el marco del desarrollo sustentable. Biocombustibles sólidos. 1ed. Universidad autónoma de Nuevo León. Monterrey. Mexico.
- NTP.251.011:2014.Madera, Método para determinar la densidad.
- Obernberger, L. & Thek, G. (2010). The pellet Handbook. The production and Thermal Utilisation of pellets. Bios.Bioenergiesysteme GmbH. London, UK.
- Ortiz, K. (2017). Caracterización y clave de identificación de los bambués en la region nor oriental (San Martín, Amazonas y Cajamarca). (Tesis de Pregrado). Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima, Perú.
- Palacios, A. & Hernández, O. (2015). Influencia de la calidad del pellets en la operación y mantenimiento de calderas. Rosman. España.
- Patiño, P. (2014). Biomasa residual vegetal: Tecnologías de transformación y estado actual. Innovaciencia facultad cienc. .exactas fís. Naturales. 2(1) 45-52. Universidad de Santander
- Pena, G. (2014). Caracterização e Avaliação do Potencial Energético dos Resíduos Florestais da Indústria de Papel e Celulose. (Tesis de Maestría). Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil. Recuperado de <http://repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/265920>
- Pérez, S.; Renedo, C.; Ortiz, A.; Mañana, M. (2008). Energy potential of waste from 10 forest species in the North of Spain (Cantabria). Bioresource Technology. Volumen 99. 6339-6345.p
- Pietsch, W. (2002). Agglomeration processes: phenomena, technologies, equipment. John Wiley. Weinheim, Alemania.
- Pöyry. (2009). Pellets supply and demand, policies and cost competitiveness. Perspectives on the global pellet market 2010-2020. Recuperado de <http://www.poyry.co.uk/sites/www.poyry.co.uk/files/110.pdf>
- Priyabrata, P.; Mahajani, S.; Arora, A. (2018). Production and utilization of fuel pellets from biomass: A review. Fuel Processing Technology 181.215-232 p

- Reyes, L.; Orihuela, R.; Aviña, L.; Pérez, E.; Carrillo, A.; Rutiaga, J. (2015). Capítulo 2.Generalidades sobre los biocombustibles. Biocombustibles sólidos. 1ed. Universidad autónoma de Nuevo León. Monterrey.MX.32-64 p
- Rodrigues,T.; Da Silva, L.; Vieira, J.; Moutinho, V. (2017). variação energética de diferentes lenhos da madeira de galho de *Dipteryz odorata* (Aublet.) Wild. III. Congresso Brasileiro de Ciencia e tecnologia da Madeira. Florianopolis-2017.8p
- Rodríguez, A. (2009). Estudios de valoración energética de combustibles forestales para la prevención de incendios forestales en la sierra de la primavera (Jalisco,Mexico) mediante calorimetría de combustión y ensayo de inflamabilidad. (Tesis doctoral). Universidad de Santiago de Compostela. Santiago de Compostela, España. Recuperado de <https://minerva.usc.es/xmlui/handle/10347/2619>
- Rodriguez, J. (2017). Optimización de los sistemas y procesos de control de calidad de productos biomásicos residuales. (Tesis doctoral). Universidad de Vigo. Vigo, España. Recuperado de <http://www.investigacion.biblioteca.uvigo.es/xmlui/handle/11093/749>
- Romanelli, G.; Ruiz, D.; Pasquale, G.(2017). Química de la biomasa y los biocombustibles. 1ed. La Plata:AR. Universidad Nacional de La Plata .
- Romero, A. (2010). Aprovechamiento de la biomasa como fuente de energía alternativa a los combustibles fósiles. Rev.R. Acad.Cienc. Exact.Fis, Nat. (Esp) Vol. 104, N°2 pp331-345.
- Sánchez, A. (2012). Biocombustibles y calderas de biomasa. La biomasa, una oportunidad para las entidades locales. Cener. Centro Nacional de Energías Renovables.Arbizu.ES.27 p
- San Miguel, G. & Gutiérrez, F.(2015). Tecnologías para el uso y transformación de biomasa energética. Madrid, ES.442 p
- Santos, A. (2018). Uso de pellets de madeira para fins energético: pesquisa de mercado. Recuperado de <http://www.florestal.gov.br/vpremio/index.html#p=6>
- Schallenberg, J.; Piernavieja, G.; Hernández, P.; Unamunzaga, P.; Garcia, R.; Diaz, M.; Cabrer, D.; Martel, G.; Pardilla, J.; Subiela, V. (2008). Energías renovables y eficiencia energética. Instituto tecnológico de las canarias. Canarias, ES. 148p

- Segura, C. (2015). Producción de pellets en Chile y tecnologías de combustión. Universidad de Concepción. Unidad de desarrollo tecnológico. Recuperado de [http://www.mma.gob.cl/1304/articles-55266\\_PresentacionPellets.pdf](http://www.mma.gob.cl/1304/articles-55266_PresentacionPellets.pdf)diapositivas
- Serrano, J.; Mejía, W.; Ortiz, J.; Sánchez, A.; Zalamea, S. (2017). Determinación del potencial de Generación Eléctrica a partir de biomasa en el Ecuador. Revista de la Facultad de Ciencias Químicas .Nº 17. EC. 41-61p
- Sjaak, V. & Koppejan, J. (2008). The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing. Earthscan. Chippenham.UK.465p.
- Sierra, I.; Gómez, S.; Pérez, D.; Morante, S. (2010). Análisis instrumental. Algunas herramientas de enseñanza-aprendizaje adaptadas al espacio Europeo de educación superior. Netbiblio. La coruna. ES.227 p.
- Stevens, C. & Brown, R. (2011). Thermochemical processing of biomass: conversion into fuels, chemicals and power: John Wiley & Sons.
- Tabil, L. (1996). Bining and pelleting characteristics of alfalfa. (Tesis doctoral). University of Sakatchewan. Saskatoon.Canada. Recuperado de <http://www.oalib.com/references/14001332>
- Tenorio, C.; Moya, R.; Valaert, J.; Tomazello, M.(2015).Pellet manufacturing potential of forest residuals of Cupressus lusitanica and Tectona grandis in Costa Rica.Tecnologia en Marcha.Vol.29Nº2 95-109
- Termmerman, M.; Rabier, F.; Jensen, F.; Hartmann, H.; Bohn, T. (2006). Comparative study of durability test methods for pellets and briquettes. Biomass Bioenergy30.964-972
- Thrän, D.; Peetz, D.; Schaubach, K. (2017).Global Wood Pellet Industry and Trade Study 2017. IEABioenergy.243p.
- Tumuluru, J.; Wright, C.; Hess, J.; Kenney, K. A. (2011). A Review of biomass densification systems to develop uniform feedstock commodities for bioenergy application. Biofuels, Bioprod. Bioref.5:683-707
- UNE-CEN/TS 14961-2:2012. Biocombustibles sólidos. Especificaciones y clases de combustibles. Parte 2: Pellets de madera para uso no industrial.

- UNE-CEN/TS 14774-3:2010.Biocombustibles sólidos – Determinación del contenido de humedad- Método de secado en estufa-Parte 3 Humedad de la muestra para análisis general
- UNE-CEN/TS 15149-1:2011.Biocombustibles sólidos-Determinación de la distribución de tamaño de partículas. Parte 2: Método del tamiz vibrante con abertura de malla igual o inferior a 3.15 mm.
- UNE-CEN/TS 15103: 2010.Biocombustibles sólidos – Determinación de la densidad a granel
- UNE- EN ISO 17829:2016 Biocombustibles sólidos. Determinación de la longitud y el diámetro de pellets
- Vassilev, S.; Andersen, D.; Vassileva, L. (2013). An overview of the composition and application of biomass ash. Part 1. Phase-mineral and chemical composition and classification. 105p.
- Vega-Nieva, D.; Fernández, M.; Ortiz, L.; Corral-Rivas, J.(2015).Caracterización bioenergética de los residuos de cosecha de las principales especies forestales del Noroeste de España. Información Tecnológica. Vol. 26(4),3-12.
- Vega-Nieva, D.; Dopazo, R.; Ortiz, L. (2015). Certificación de la calidad de astillas y pellets como biocombustibles para la generación de calor renovable según las normas de calidad ISO y la certificación ENPLUS.1ed. Universidad autónoma de Nuevo León. Monterrey. MX.90-119p
- Vinterback, J. (2004). Pellets 2002: the first world conference on pellets. Department of Forest Management and Products,Swedish University of Agricultural Sciences.
- Zapata, A. (2016).Investigación del efecto de los parámetros de elaboración de pellets de cuesco de palma en el proceso de pirolisis. (Tesis de Maestría). Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia. Recuperado de <http://bdigital.unal.edu.co/55986/1/72292695.2016.pdf>

## VIII. ANEXOS

**Anexo 1: Valores de las propiedades físicas de los pellets con diferentes granulometrías y contenido de humedad**

<b>N</b>	<b>Código</b>	<b>humedad</b>	<b>granulometría</b>	<b>diámetro(mm)</b>	<b>Longitud (mm)</b>	<b>Densidad (kg/m3)</b>	<b>friabilidad</b>
1	820	8	20	12,30	9,92	868,35	1,34
2	820	8	20	12,30	9,95	858,71	1,25
3	820	8	20	12,28	9,39	880,43	1,09
4	820	8	20	12,30	9,66	865,15	1,42
5	820	8	20	12,30	9,78	861,55	1,07
6	820	8	20	12,30	9,76	866,63	1,20
7	820	8	20	12,29	9,34	896,53	0,95
8	820	8	20	12,30	9,85	847,69	1,66
9	820	8	20	12,30	9,69	874,81	1,11
10	820	8	20	12,28	10,11	844,28	1,35
11	820	8	20	12,30	9,88	863,87	1,27
12	820	8	20	12,30	9,78	856,18	1,19
13	820	8	20	12,30	10,08	855,08	1,21
14	820	8	20	12,30	9,59	857,38	0,80
15	820	8	20	12,28	9,48	879,20	1,12
16	820	8	20	12,31	9,54	881,04	1,74
17	820	8	20	12,29	10,06	851,47	1,51
18	820	8	20	12,30	10,11	857,40	1,34
19	820	8	20	12,29	9,77	866,29	1,28
20	820	8	20	12,30	9,71	887,65	1,17
21	820	8	20	12,30	10,12	840,17	1,50
22	820	8	20	12,30	9,68	883,76	1,46
23	820	8	20	12,31	9,80	853,39	1,33
24	820	8	20	12,30	9,63	878,86	1,53
25	820	8	20	12,29	9,69	862,62	1,39
26	820	8	20	12,28	10,08	859,91	1,62
27	820	8	20	12,30	9,62	873,30	1,28
28	820	8	20	12,28	9,87	871,40	1,31
29	820	8	20	12,30	9,94	876,01	1,33
30	820	8	20	12,30	9,91	861,41	1,30
31	820	8	20	12,30	10,11	851,03	1,49
32	820	8	20	12,29	10,01	849,98	1,70

<b>33</b>	820	8	20	12,30	10,15	833,13	1,67
<b>34</b>	820	8	20	12,30	9,93	858,20	1,50
<b>35</b>	820	8	20	12,29	9,98	843,13	1,55
<b>36</b>	820	8	20	12,30	9,96	870,32	1,26
<b>37</b>	820	8	20	12,29	10,00	872,42	1,42
<b>38</b>	820	8	20	12,29	10,10	844,82	1,63
<b>39</b>	820	8	20	12,30	9,88	860,07	1,51
<b>40</b>	820	8	20	12,30	9,74	866,42	1,55
<b>41</b>	820	8	20	12,30	9,43	885,10	1,16
<b>42</b>	820	8	20	12,30	9,75	898,56	1,04
<b>43</b>	820	8	20	12,30	9,87	863,96	1,15
<b>44</b>	820	8	20	12,30	9,82	850,30	1,17
<b>45</b>	820	8	20	12,30	9,95	843,00	1,22
<b>46</b>	820	8	20	12,28	9,85	845,59	1,38
<b>47</b>	820	8	20	12,31	10,02	858,72	1,35
<b>48</b>	820	8	20	12,30	10,12	828,43	1,59
<b>49</b>	820	8	20	12,30	9,93	850,03	1,32
<b>50</b>	820	8	20	12,30	9,83	863,04	1,23
<b>51</b>	820	8	20	12,30	9,86	859,31	1,17
<b>52</b>	820	8	20	12,28	10,10	848,40	1,31
<b>53</b>	820	8	20	12,31	9,66	877,15	1,26
<b>54</b>	820	8	20	12,29	9,91	850,02	1,21
<b>55</b>	820	8	20	12,30	9,84	852,45	1,17
<b>56</b>	820	8	20	12,30	10,07	852,82	2,70
<b>57</b>	820	8	20	12,30	9,96	889,58	1,22
<b>58</b>	820	8	20	12,30	9,89	864,94	1,43
<b>59</b>	820	8	20	12,31	9,76	854,82	1,24
<b>60</b>	820	8	20	12,30	9,86	856,61	1,72
<b>61</b>	820	8	20	12,31	9,89	863,20	1,09
<b>62</b>	820	8	20	12,29	10,08	841,31	0,89
<b>63</b>	820	8	20	12,29	10,06	842,40	0,49
<b>64</b>	820	8	20	12,29	10,02	846,27	0,65
<b>65</b>	820	8	20	12,30	10,13	842,78	0,66
<b>1</b>	830	8	30	12,29	9,84	876,24	1,46
<b>2</b>	830	8	30	12,30	9,50	877,73	1,62
<b>3</b>	830	8	30	12,27	9,58	890,60	1,72
<b>4</b>	830	8	30	12,27	9,37	903,06	1,45
<b>5</b>	830	8	30	12,27	9,33	895,88	1,48
<b>6</b>	830	8	30	12,27	9,40	885,43	0,88
<b>7</b>	830	8	30	12,30	9,49	874,26	1,56
<b>8</b>	830	8	30	12,29	9,48	876,84	1,59
<b>9</b>	830	8	30	12,29	9,29	900,40	1,28
<b>10</b>	830	8	30	12,28	9,53	888,99	1,11
<b>11</b>	830	8	30	12,28	9,66	859,77	1,22

12	830	8	30	12,26	9,58	873,97	1,36
13	830	8	30	12,30	9,65	856,85	1,32
14	830	8	30	12,29	9,50	873,44	1,52
15	830	8	30	12,29	9,62	863,51	1,29
16	830	8	30	12,31	9,42	876,03	1,26
17	830	8	30	12,26	9,51	881,92	1,16
18	830	8	30	12,42	9,42	859,05	1,48
19	830	8	30	12,30	9,80	859,88	1,36
20	830	8	30	12,32	9,54	861,37	1,79
21	830	8	30	12,27	9,34	905,11	0,96
22	830	8	30	12,29	9,93	876,87	1,03
23	830	8	30	12,28	9,40	885,61	0,84
24	830	8	30	12,29	9,77	863,10	0,97
25	830	8	30	12,30	9,67	863,82	0,99
26	830	8	30	12,29	9,49	897,80	1,26
27	830	8	30	12,27	9,40	893,08	1,33
28	830	8	30	12,29	9,46	899,77	1,22
29	830	8	30	12,27	9,25	905,23	1,46
30	830	8	30	12,27	9,53	907,87	1,48
31	830	8	30	12,29	9,40	880,44	1,37
32	830	8	30	12,27	9,36	883,79	1,43
33	830	8	30	12,29	9,53	872,01	1,71
34	830	8	30	12,27	9,61	862,20	1,56
35	830	8	30	12,27	9,39	910,47	1,24
36	830	8	30	12,29	9,29	890,01	1,07
37	830	8	30	12,29	9,73	867,60	0,96
38	830	8	30	12,28	9,51	876,21	1,08
39	830	8	30	12,30	9,62	889,58	1,13
40	830	8	30	12,32	9,65	865,28	0,97
41	830	8	30	12,29	9,66	873,59	1,39
42	830	8	30	12,27	9,87	896,22	1,28
43	830	8	30	12,27	9,77	893,84	1,38
44	830	8	30	12,30	9,70	872,04	1,24
45	830	8	30	12,29	9,90	868,63	1,30
46	830	8	30	12,27	9,73	878,96	0,97
47	830	8	30	12,27	9,58	890,38	1,06
48	830	8	30	12,28	9,71	862,77	1,63
49	830	8	30	12,29	9,44	885,51	1,37
50	830	8	30	12,27	9,90	874,88	1,45
51	830	8	30	12,27	9,89	878,41	1,38
52	830	8	30	12,28	9,90	874,01	1,50
53	830	8	30	12,27	9,94	882,80	1,47
54	830	8	30	12,28	9,91	871,60	1,39
55	830	8	30	12,28	9,91	901,45	1,29

<b>56</b>	830	8	30	12,27	9,78	887,00	0,73
<b>57</b>	830	8	30	12,27	9,93	882,71	0,50
<b>58</b>	830	8	30	12,29	9,47	886,62	0,58
<b>59</b>	830	8	30	12,29	9,57	870,31	0,88
<b>60</b>	830	8	30	12,29	9,44	897,92	0,77
<b>61</b>	830	8	30	12,29	9,36	883,89	0,55
<b>62</b>	830	8	30	12,29	9,71	865,44	0,95
<b>63</b>	830	8	30	12,28	9,46	907,88	0,82
<b>64</b>	830	8	30	12,27	9,79	863,47	1,31
<b>65</b>	830	8	30	12,28	9,43	876,79	1,14
<b>1</b>	840	8	40	12,29	8,96	953,48	1,10
<b>2</b>	840	8	40	12,29	9,03	944,55	1,19
<b>3</b>	840	8	40	12,27	9,07	943,71	1,07
<b>4</b>	840	8	40	12,29	9,00	946,55	1,06
<b>5</b>	840	8	40	12,27	8,98	945,44	1,27
<b>6</b>	840	8	40	12,27	9,02	940,34	1,05
<b>7</b>	840	8	40	12,28	9,25	910,18	1,50
<b>8</b>	840	8	40	12,28	9,16	932,79	1,06
<b>9</b>	840	8	40	12,28	9,02	947,58	1,00
<b>10</b>	840	8	40	12,28	8,95	945,84	0,87
<b>11</b>	840	8	40	12,30	9,12	937,01	0,91
<b>12</b>	840	8	40	12,30	9,26	936,74	0,95
<b>13</b>	840	8	40	12,29	9,10	936,73	0,99
<b>14</b>	840	8	40	12,28	9,03	931,82	1,13
<b>15</b>	840	8	40	12,29	9,15	923,17	0,90
<b>16</b>	840	8	40	12,27	9,08	947,51	1,28
<b>17</b>	840	8	40	12,28	9,00	941,50	1,19
<b>18</b>	840	8	40	12,27	9,02	947,13	1,15
<b>19</b>	840	8	40	12,27	9,13	944,73	1,17
<b>20</b>	840	8	40	12,27	9,01	937,35	1,35
<b>21</b>	840	8	40	12,29	9,06	938,35	0,85
<b>22</b>	840	8	40	12,28	9,01	942,26	0,68
<b>23</b>	840	8	40	12,30	9,07	913,37	0,70
<b>24</b>	840	8	40	12,29	9,06	938,61	0,64
<b>25</b>	840	8	40	12,30	9,25	987,62	0,61
<b>26</b>	840	8	40	12,29	9,15	923,54	1,17
<b>27</b>	840	8	40	12,30	9,06	937,54	1,01
<b>28</b>	840	8	40	12,30	9,01	940,88	1,21
<b>29</b>	840	8	40	12,30	9,09	934,48	1,12
<b>30</b>	840	8	40	12,29	9,30	923,90	0,98
<b>31</b>	840	8	40	12,29	9,07	938,41	0,88
<b>32</b>	840	8	40	12,30	8,82	952,27	0,71
<b>33</b>	840	8	40	12,28	9,07	947,73	0,89
<b>34</b>	840	8	40	12,27	8,96	952,44	0,73

35	840	8	40	12,28	8,91	947,74	0,73
36	840	8	40	12,28	9,02	942,74	1,12
37	840	8	40	12,27	10,17	864,67	1,26
38	840	8	40	12,27	8,99	958,57	0,90
39	840	8	40	12,30	9,17	954,66	0,83
40	840	8	40	12,28	9,09	924,68	1,04
41	840	8	40	12,28	9,15	934,49	0,55
42	840	8	40	12,30	9,06	938,75	0,43
43	840	8	40	12,29	9,14	930,02	0,33
44	840	8	40	12,28	9,02	936,35	0,37
45	840	8	40	12,27	9,24	955,34	0,31
46	840	8	40	12,30	9,07	932,77	0,31
47	840	8	40	12,29	9,14	934,05	0,35
48	840	8	40	12,28	9,26	921,26	0,27
49	840	8	40	12,30	9,13	931,16	0,38
50	840	8	40	12,28	9,06	944,98	0,53
51	840	8	40	12,28	9,10	935,57	0,39
52	840	8	40	12,27	9,04	946,35	0,74
53	840	8	40	12,30	9,07	940,69	0,46
54	840	8	40	12,28	9,05	946,19	0,69
55	840	8	40	12,28	8,65	989,49	1,29
56	840	8	40	12,27	9,04	945,90	0,32
57	840	8	40	12,27	8,95	950,22	0,25
58	840	8	40	12,27	9,03	952,64	0,29
59	840	8	40	12,29	9,00	944,58	0,22
60	840	8	40	12,28	9,11	932,50	0,24
61	840	8	40	12,30	9,12	931,13	0,14
62	840	8	40	12,29	9,04	943,64	0,11
63	840	8	40	12,28	9,14	938,16	0,11
64	840	8	40	12,30	9,00	940,17	0,11
65	840	8	40	12,28	9,10	937,00	0,10
1	850	8	50	12,28	8,66	984,45	0,36
2	850	8	50	12,28	8,65	979,02	0,36
3	850	8	50	12,28	9,16	940,84	0,40
4	850	8	50	12,29	8,93	933,42	0,43
5	850	8	50	12,27	8,74	980,90	0,32
6	850	8	50	12,30	8,73	969,02	1,15
7	850	8	50	12,30	8,73	968,15	0,36
8	850	8	50	12,29	8,72	974,91	0,24
9	850	8	50	12,30	8,69	969,92	0,40
10	850	8	50	12,30	8,69	968,15	0,52
11	850	8	50	12,30	8,82	947,22	0,62
12	850	8	50	12,29	8,71	969,16	0,58
13	850	8	50	12,28	8,64	969,42	0,56

14	850	8	50	12,28	8,68	982,85	0,62
15	850	8	50	12,29	8,86	955,23	0,87
16	850	8	50	12,28	8,70	979,05	0,40
17	850	8	50	12,29	8,76	971,05	0,57
18	850	8	50	12,27	8,66	979,51	0,55
19	850	8	50	12,27	8,81	967,43	0,60
20	850	8	50	12,30	8,75	944,24	0,23
21	850	8	50	12,30	8,78	950,02	0,49
22	850	8	50	12,27	8,66	978,54	0,39
23	850	8	50	12,28	8,80	964,82	0,15
24	850	8	50	12,27	8,62	966,58	0,61
25	850	8	50	12,30	8,65	970,49	0,57
26	850	8	50	12,29	8,79	964,45	0,07
27	850	8	50	12,30	8,80	956,71	0,47
28	850	8	50	12,30	8,83	943,38	0,49
29	850	8	50	12,30	8,79	956,69	0,20
30	850	8	50	12,29	8,67	970,80	0,06
31	850	8	50	12,29	8,73	973,81	0,15
32	850	8	50	12,28	8,83	959,48	0,03
33	850	8	50	12,28	8,87	967,52	0,08
34	850	8	50	12,29	8,50	992,61	0,16
35	850	8	50	12,28	8,90	946,98	0,13
36	850	8	50	12,28	8,49	988,05	0,46
37	850	8	50	12,29	8,51	975,30	0,64
38	850	8	50	12,29	9,06	950,59	0,52
39	850	8	50	12,27	8,55	988,14	0,13
40	850	8	50	12,28	8,73	983,01	0,44
41	850	8	50	12,29	8,73	1010,01	0,65
42	850	8	50	12,28	8,68	965,83	0,52
43	850	8	50	12,28	7,97	1054,74	0,46
44	850	8	50	12,28	8,64	954,98	0,48
45	850	8	50	12,30	8,91	937,68	0,51
46	850	8	50	12,28	8,66	973,99	0,82
47	850	8	50	12,28	8,64	968,91	0,65
48	850	8	50	12,30	8,64	961,59	0,48
49	850	8	50	12,28	8,74	972,51	0,64
50	850	8	50	12,29	8,83	962,98	0,55
51	850	8	50	12,27	8,48	992,12	0,15
52	850	8	50	12,27	8,73	949,00	0,20
53	850	8	50	12,28	8,83	970,54	0,18
54	850	8	50	12,28	8,82	965,60	0,24
55	850	8	50	12,27	8,66	978,51	0,15
56	850	8	50	12,29	8,77	971,76	0,61
57	850	8	50	12,28	8,55	962,84	0,65

<b>58</b>	850	8	50	12,29	8,89	948,76	0,44
<b>59</b>	850	8	50	12,28	8,55	976,05	0,85
<b>60</b>	850	8	50	12,28	8,67	952,04	0,58
<b>61</b>	850	8	50	12,26	7,97	1060,72	0,08
<b>62</b>	850	8	50	12,27	8,65	975,16	0,11
<b>63</b>	850	8	50	12,30	8,66	968,81	0,17
<b>64</b>	850	8	50	12,26	8,43	1007,47	0,09
<b>65</b>	850	8	50	12,28	8,70	972,23	0,08
<b>1</b>	1420	14	20	12,28	10,40	830,12	0,65
<b>2</b>	1420	14	20	12,27	10,16	843,05	1,06
<b>3</b>	1420	14	20	12,27	10,76	823,78	0,75
<b>4</b>	1420	14	20	12,3	10,57	846,68	0,66
<b>5</b>	1420	14	20	12,28	10,74	815,93	0,84
<b>6</b>	1420	14	20	12,3	10,88	805,63	0,65
<b>7</b>	1420	14	20	12,29	10,33	838,31	0,63
<b>8</b>	1420	14	20	12,3	10,54	825,30	0,53
<b>9</b>	1420	14	20	12,28	10,77	812,19	0,80
<b>10</b>	1420	14	20	12,29	10,57	795,76	0,70
<b>11</b>	1420	14	20	12,3	10,35	829,01	0,63
<b>12</b>	1420	14	20	12,27	10,55	812,35	0,69
<b>13</b>	1420	14	20	12,3	10,85	804,37	0,76
<b>14</b>	1420	14	20	12,3	10,54	828,41	0,48
<b>15</b>	1420	14	20	12,3	10,84	825,57	0,47
<b>16</b>	1420	14	20	12,3	10,74	821,27	0,58
<b>17</b>	1420	14	20	12,29	10,44	821,54	0,76
<b>18</b>	1420	14	20	12,29	10,87	818,84	0,67
<b>19</b>	1420	14	20	12,3	10,18	830,76	0,58
<b>20</b>	1420	14	20	12,28	10,65	832,81	0,60
<b>21</b>	1420	14	20	12,3	10,49	820,15	0,73
<b>22</b>	1420	14	20	12,27	10,92	822,57	0,54
<b>23</b>	1420	14	20	12,3	10,93	817,24	0,57
<b>24</b>	1420	14	20	12,3	10,49	804,84	0,57
<b>25</b>	1420	14	20	12,29	10,50	815,18	0,49
<b>26</b>	1420	14	20	12,27	10,95	790,48	0,89
<b>27</b>	1420	14	20	12,28	10,54	823,93	0,84
<b>28</b>	1420	14	20	12,3	10,54	822,19	0,69
<b>29</b>	1420	14	20	12,3	10,38	810,03	0,85
<b>30</b>	1420	14	20	12,3	10,53	806,17	0,92
<b>31</b>	1420	14	20	12,27	10,65	840,39	0,46
<b>32</b>	1420	14	20	12,3	10,70	813,53	0,67
<b>33</b>	1420	14	20	12,29	10,43	818,05	0,66
<b>34</b>	1420	14	20	12,3	10,47	816,05	0,54
<b>35</b>	1420	14	20	12,29	10,52	834,38	0,44
<b>36</b>	1420	14	20	12,3	10,90	820,20	0,42

37	1420	14	20	12,27	10,36	822,34	0,45
38	1420	14	20	12,29	10,95	811,78	0,62
39	1420	14	20	12,31	10,72	824,25	0,56
40	1420	14	20	12,3	10,69	817,42	0,52
41	1420	14	20	12,27	10,61	807,85	0,80
42	1420	14	20	12,29	10,84	806,88	0,98
43	1420	14	20	12,28	10,54	802,12	1,00
44	1420	14	20	12,28	10,90	815,73	0,76
45	1420	14	20	12,29	10,35	822,66	0,96
46	1420	14	20	12,3	10,60	823,75	0,59
47	1420	14	20	12,29	10,38	826,45	0,74
48	1420	14	20	12,28	10,52	819,23	0,75
49	1420	14	20	12,29	10,65	837,16	0,59
50	1420	14	20	12,31	10,42	835,87	0,44
51	1420	14	20	12,3	10,80	803,41	0,84
52	1420	14	20	12,28	10,74	823,58	0,92
53	1420	14	20	12,27	10,97	815,78	0,80
54	1420	14	20	12,3	10,54	817,33	0,77
55	1420	14	20	12,29	10,71	834,64	0,58
56	1420	14	20	12,28	10,59	829,68	0,31
57	1420	14	20	12,29	10,40	832,85	0,20
58	1420	14	20	12,31	10,65	830,70	0,32
59	1420	14	20	12,29	10,71	811,85	0,31
60	1420	14	20	12,29	10,56	821,88	0,23
61	1420	14	20	12,27	10,84	826,96	0,50
62	1420	14	20	12,31	10,38	805,56	0,58
63	1420	14	20	12,29	10,54	807,51	0,66
64	1420	14	20	12,28	10,25	830,96	0,57
65	1420	14	20	12,3	10,56	824,29	0,55
1	1430	14	30	12,3	9,94	854,91	0,74
2	1430	14	30	12,3	10,32	846,51	0,69
3	1430	14	30	12,19	10,12	870,09	0,56
4	1430	14	30	12,03	9,75	914,48	0,67
5	1430	14	30	12,28	9,95	864,58	0,52
6	1430	14	30	12,28	9,97	856,14	0,65
7	1430	14	30	12,3	9,92	866,48	0,66
8	1430	14	30	12,3	9,79	862,77	0,39
9	1430	14	30	12,3	10,06	855,68	0,79
10	1430	14	30	12,3	10,04	862,04	0,52
11	1430	14	30	12,31	10,16	863,13	0,56
12	1430	14	30	12,31	10,09	857,26	0,65
13	1430	14	30	12,3	10,00	857,16	0,76
14	1430	14	30	12,31	9,99	855,81	0,75
15	1430	14	30	12,31	10,16	843,53	0,61

<b>16</b>	1430	14	30	12,31	10,08	872,36	0,39
<b>17</b>	1430	14	30	12,31	10,25	828,64	0,48
<b>18</b>	1430	14	30	12,29	9,80	868,30	0,34
<b>19</b>	1430	14	30	12,31	9,89	869,70	0,36
<b>20</b>	1430	14	30	12,31	10,14	877,30	0,50
<b>21</b>	1430	14	30	12,33	9,75	877,31	0,39
<b>22</b>	1430	14	30	12,29	9,73	878,01	0,40
<b>23</b>	1430	14	30	12,29	9,98	883,04	0,54
<b>24</b>	1430	14	30	12,31	9,79	873,09	0,35
<b>25</b>	1430	14	30	12,31	9,40	905,60	0,37
<b>26</b>	1430	14	30	12,3	10,55	846,08	0,62
<b>27</b>	1430	14	30	12,3	10,01	833,66	0,72
<b>28</b>	1430	14	30	12,29	10,59	859,56	0,52
<b>29</b>	1430	14	30	12,3	10,55	847,81	0,33
<b>30</b>	1430	14	30	12,29	10,24	845,76	0,59
<b>31</b>	1430	14	30	12,29	10,12	859,83	0,70
<b>32</b>	1430	14	30	12,3	9,96	854,89	0,61
<b>33</b>	1430	14	30	12,31	10,18	861,48	0,58
<b>34</b>	1430	14	30	12,29	10,35	856,45	0,67
<b>35</b>	1430	14	30	12,33	9,55	851,48	0,54
<b>36</b>	1430	14	30	12,31	9,85	860,40	0,47
<b>37</b>	1430	14	30	12,33	10,15	863,49	0,42
<b>38</b>	1430	14	30	12,31	9,85	871,74	0,34
<b>39</b>	1430	14	30	12,33	10,32	842,34	0,41
<b>40</b>	1430	14	30	12,3	9,95	866,79	0,54
<b>41</b>	1430	14	30	12,28	9,83	870,31	0,18
<b>42</b>	1430	14	30	12,28	9,80	883,10	0,25
<b>43</b>	1430	14	30	12,3	9,85	869,48	0,32
<b>44</b>	1430	14	30	12,3	9,81	850,65	0,21
<b>45</b>	1430	14	30	12,31	9,76	935,95	0,26
<b>46</b>	1430	14	30	12,3	9,87	864,49	0,76
<b>47</b>	1430	14	30	12,3	9,82	868,79	0,77
<b>48</b>	1430	14	30	12,33	9,87	868,22	0,76
<b>49</b>	1430	14	30	12,32	9,75	869,19	0,57
<b>50</b>	1430	14	30	12,3	9,87	861,32	0,53
<b>51</b>	1430	14	30	12,29	10,08	886,11	0,77
<b>52</b>	1430	14	30	12,31	10,17	873,48	1,38
<b>53</b>	1430	14	30	12,29	10,16	870,97	3,61
<b>54</b>	1430	14	30	12,31	9,77	875,05	0,43
<b>55</b>	1430	14	30	12,31	10,09	863,29	1,09
<b>56</b>	1430	14	30	12,31	10,10	860,02	1,53
<b>57</b>	1430	14	30	12,29	10,07	857,27	2,54
<b>58</b>	1430	14	30	12,31	9,91	851,55	0,71
<b>59</b>	1430	14	30	12,29	10,26	866,90	0,64

<b>60</b>	1430	14	30	12,3	9,84	862,92	0,58
<b>61</b>	1430	14	30	12,3	10,38	864,21	0,29
<b>62</b>	1430	14	30	12,29	9,68	878,53	0,39
<b>63</b>	1430	14	30	12,31	10,02	874,81	0,24
<b>64</b>	1430	14	30	12,3	10,04	878,47	0,20
<b>65</b>	1430	14	30	12,31	9,86	873,50	0,21
<b>1</b>	1440	14	40	12,27	9,86	886,88	0,89
<b>2</b>	1440	14	40	12,28	10,03	877,08	0,90
<b>3</b>	1440	14	40	12,27	10,09	862,59	1,02
<b>4</b>	1440	14	40	12,27	10,05	870,28	0,96
<b>5</b>	1440	14	40	12,3	9,87	862,77	1,01
<b>6</b>	1440	14	40	12,28	10,01	892,50	0,58
<b>7</b>	1440	14	40	12,27	10,06	871,27	0,64
<b>8</b>	1440	14	40	12,28	9,93	878,68	0,67
<b>9</b>	1440	14	40	12,3	10,64	793,75	0,67
<b>10</b>	1440	14	40	12,28	10,04	873,72	0,68
<b>11</b>	1440	14	40	12,29	9,90	907,79	0,36
<b>12</b>	1440	14	40	12,29	9,84	888,66	0,46
<b>13</b>	1440	14	40	12,3	9,39	872,11	0,33
<b>14</b>	1440	14	40	12,29	9,75	874,74	0,47
<b>15</b>	1440	14	40	12,32	10,13	834,66	0,51
<b>16</b>	1440	14	40	12,29	9,56	920,32	0,40
<b>17</b>	1440	14	40	12,29	10,07	875,06	0,40
<b>18</b>	1440	14	40	12,29	10,03	881,58	0,28
<b>19</b>	1440	14	40	12,28	9,97	902,04	0,22
<b>20</b>	1440	14	40	12,3	10,10	896,45	0,34
<b>21</b>	1440	14	40	12,27	9,89	871,02	0,59
<b>22</b>	1440	14	40	12,27	9,97	873,82	0,52
<b>23</b>	1440	14	40	12,27	9,75	881,92	0,44
<b>24</b>	1440	14	40	12,3	9,81	872,47	0,51
<b>25</b>	1440	14	40	12,28	10,20	870,49	0,47
<b>26</b>	1440	14	40	12,3	9,67	873,13	0,99
<b>27</b>	1440	14	40	12,3	10,12	883,17	0,83
<b>28</b>	1440	14	40	12,31	9,72	883,23	0,68
<b>29</b>	1440	14	40	12,27	9,82	865,57	1,01
<b>30</b>	1440	14	40	12,27	9,73	872,35	0,96
<b>31</b>	1440	14	40	12,27	9,66	881,56	0,65
<b>32</b>	1440	14	40	12,27	9,93	885,52	0,60
<b>33</b>	1440	14	40	12,28	10,33	878,70	0,59
<b>34</b>	1440	14	40	12,28	9,72	884,85	0,61
<b>35</b>	1440	14	40	12,3	9,89	872,22	0,50
<b>36</b>	1440	14	40	12,31	9,88	875,04	0,89
<b>37</b>	1440	14	40	12,27	9,87	885,08	0,64
<b>38</b>	1440	14	40	12,28	9,63	897,07	0,72

<b>39</b>	1440	14	40	12,29	9,64	879,20	0,56
<b>40</b>	1440	14	40	12,29	9,85	874,93	0,89
<b>41</b>	1440	14	40	12,31	9,66	894,54	0,81
<b>42</b>	1440	14	40	12,31	10,16	870,44	0,87
<b>43</b>	1440	14	40	12,32	10,25	863,69	0,71
<b>44</b>	1440	14	40	12,29	10,10	861,82	0,97
<b>45</b>	1440	14	40	12,29	10,05	880,41	0,88
<b>46</b>	1440	14	40	12,28	9,88	879,80	0,55
<b>47</b>	1440	14	40	12,28	9,94	869,82	0,50
<b>48</b>	1440	14	40	12,31	10,34	874,11	0,48
<b>49</b>	1440	14	40	12,31	10,46	870,54	0,43
<b>50</b>	1440	14	40	12,3	10,02	864,43	0,49
<b>51</b>	1440	14	40	12,29	9,95	880,19	0,68
<b>52</b>	1440	14	40	12,31	9,80	879,10	0,64
<b>53</b>	1440	14	40	12,3	9,60	866,35	0,76
<b>54</b>	1440	14	40	12,28	9,84	872,69	0,69
<b>55</b>	1440	14	40	12,28	9,88	891,85	0,54
<b>56</b>	1440	14	40	12,3	9,93	875,49	0,76
<b>57</b>	1440	14	40	12,31	9,80	874,13	0,79
<b>58</b>	1440	14	40	12,31	10,06	862,24	0,76
<b>59</b>	1440	14	40	12,29	9,92	878,35	0,78
<b>60</b>	1440	14	40	12,29	9,92	881,03	0,86
<b>61</b>	1440	14	40	12,28	9,78	873,90	0,51
<b>62</b>	1440	14	40	12,29	10,07	867,07	0,58
<b>63</b>	1440	14	40	12,29	9,86	876,69	0,40
<b>64</b>	1440	14	40	12,3	9,87	885,80	0,33
<b>65</b>	1440	14	40	12,28	10,27	869,00	0,48
<b>1</b>	1450	14	50	12,28	9,44	938,51	1,25
<b>2</b>	1450	14	50	12,3	9,37	938,05	1,32
<b>3</b>	1450	14	50	12,27	9,62	910,11	1,31
<b>4</b>	1450	14	50	12,29	9,54	937,44	1,19
<b>5</b>	1450	14	50	12,29	9,91	931,25	1,09
<b>6</b>	1450	14	50	12,29	9,34	920,18	0,79
<b>7</b>	1450	14	50	12,3	9,41	923,60	0,76
<b>8</b>	1450	14	50	12,29	9,33	921,83	0,64
<b>9</b>	1450	14	50	12,3	9,33	937,72	0,77
<b>10</b>	1450	14	50	12,3	9,25	942,19	0,62
<b>11</b>	1450	14	50	12,27	9,05	937,76	1,15
<b>12</b>	1450	14	50	12,3	9,42	932,15	0,84
<b>13</b>	1450	14	50	12,3	9,18	924,34	0,88
<b>14</b>	1450	14	50	12,29	9,33	927,35	1,18
<b>15</b>	1450	14	50	12,28	9,26	932,87	0,91
<b>16</b>	1450	14	50	12,28	9,03	965,42	0,51
<b>17</b>	1450	14	50	12,3	9,50	935,76	0,47

<b>18</b>	1450	14	50	12,28	9,15	929,41	0,57
<b>19</b>	1450	14	50	12,28	9,44	932,76	0,47
<b>20</b>	1450	14	50	12,27	9,19	921,85	0,63
<b>21</b>	1450	14	50	12,31	9,84	898,33	0,95
<b>22</b>	1450	14	50	12,3	9,31	910,38	1,05
<b>23</b>	1450	14	50	12,31	10,03	899,08	0,82
<b>24</b>	1450	14	50	12,31	10,33	848,08	0,81
<b>25</b>	1450	14	50	12,3	9,31	918,64	0,93
<b>26</b>	1450	14	50	12,28	9,48	910,92	1,23
<b>27</b>	1450	14	50	12,29	9,27	921,58	1,01
<b>28</b>	1450	14	50	12,28	9,09	933,87	0,93
<b>29</b>	1450	14	50	12,28	9,21	929,84	0,92
<b>30</b>	1450	14	50	12,29	9,22	930,58	0,98
<b>31</b>	1450	14	50	12,3	9,38	940,89	0,55
<b>32</b>	1450	14	50	12,3	9,24	937,07	0,65
<b>33</b>	1450	14	50	12,28	9,14	935,69	0,85
<b>34</b>	1450	14	50	12,31	9,37	918,83	0,58
<b>35</b>	1450	14	50	12,3	9,54	929,13	0,72
<b>36</b>	1450	14	50	12,31	9,52	909,77	0,88
<b>37</b>	1450	14	50	12,27	9,62	928,73	0,73
<b>38</b>	1450	14	50	12,3	9,69	903,29	0,73
<b>39</b>	1450	14	50	12,29	9,44	908,86	0,93
<b>40</b>	1450	14	50	12,3	9,46	897,94	0,96
<b>41</b>	1450	14	50	12,3	9,52	924,57	0,45
<b>42</b>	1450	14	50	12,31	9,70	914,16	0,46
<b>43</b>	1450	14	50	12,31	9,78	914,05	0,41
<b>44</b>	1450	14	50	12,3	10,05	911,63	0,44
<b>45</b>	1450	14	50	12,29	9,50	926,57	0,29
<b>46</b>	1450	14	50	12,3	9,10	929,42	0,84
<b>47</b>	1450	14	50	12,29	9,50	934,82	0,64
<b>48</b>	1450	14	50	12,28	9,06	937,65	0,57
<b>49</b>	1450	14	50	12,3	9,11	917,28	0,83
<b>50</b>	1450	14	50	12,3	8,99	941,03	0,47
<b>51</b>	1450	14	50	12,31	10,53	875,09	0,60
<b>52</b>	1450	14	50	12,3	9,30	920,10	0,56
<b>53</b>	1450	14	50	12,3	9,10	946,83	0,50
<b>54</b>	1450	14	50	12,28	9,17	937,05	0,57
<b>55</b>	1450	14	50	12,29	9,09	927,87	0,59
<b>56</b>	1450	14	50	12,3	9,41	937,20	0,61
<b>57</b>	1450	14	50	12,29	9,50	927,91	0,62
<b>58</b>	1450	14	50	12,3	9,57	931,26	0,62
<b>59</b>	1450	14	50	12,29	9,52	939,47	0,67
<b>60</b>	1450	14	50	12,28	9,38	927,51	0,66
<b>61</b>	1450	14	50	12,31	9,29	935,89	0,23

<b>62</b>	1450	14	50	12,28	9,24	947,66	0,20
<b>63</b>	1450	14	50	12,3	9,31	937,89	0,27
<b>64</b>	1450	14	50	12,3	9,31	941,27	0,25
<b>65</b>	1450	14	50	12,3	9,64	926,97	0,22

**Anexo 2: Análisis del poder calórico superior del residuo de *Guadua angustifolia* Kunth**



**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA**  
**LABORATORIO DE ENERGÍAS RENOVABLES**  
 Unidad de Biomasa Energética

**REPORTE DE ANÁLISIS DE PODER CALÓRICO**  
**(CALORÍMETRO)**  
**LER – BIOMASA 094– 2018**

**Solicitante** : UNALM – Tesis de Pregrado  
**Atención** : Dr. Héctor Enrique Gonzales Mora  
 Srta. Gabriela Jazmina Mucha Aviles  
**Muestra** : Bambú *Guadua Angustifolia*  
**Procedente de** : Lima, Perú  
**Fecha Recepción** : 12 / 11 / 2018  
**Norma:** : ASTM D5865 – 13

N. LABORATORIO	CÓDIGO DE CAMPO	BASE SECA	BASE HÚMEDA
		PCS (Cal/g)	PCI (Cal/g)
UBE-(11/2018)-0235	Bambú <i>Guadua Angustifolia</i>	4368.87	—

**NOTA:**

- Las muestras fueron analizadas en base seca (las muestras tal como se recibieron fueron secadas en estufa durante 24 horas a 105 °C).
- Se realizó el análisis por triplicado de cada muestra, obteniéndose resultados aproximados y se determinó la desviación estándar (medida de la dispersión de los valores respecto a la media) de la muestra.



Laboratorio de  
Energías Renovables

José Calle Maraví, Ph. D.  
Jefe del Laboratorio de  
Energías Renovables

### Anexo 3: Análisis elemental del residuo de *Guadua angustifolia* Kunth



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA  
LABORATORIO DE ENERGÍAS RENOVABLES  
Unidad de Biomasa Energética

REPORTE DE ANÁLISIS ELEMENTAL (C, H, N, O, S)  
LER – BIOMASA 052 - 2018

**Solicitante** : UNALM – Tesis de Pregrado  
**Atención** : Dr. Héctor Enrique Gonzales Mora  
Srta. Gabriela Jazmina Mucha Aviles  
**Muestra** : Bambú molido y pellets  
**Procedente de** : Lima, Perú  
**Fecha Recepción** : 17 / 04 / 2018  
**Norma:** : ASTM D4239

N. LABORATORIO	CÓDIGO DE CAMPO	C (%)	H (%)	N (%)	S (%)	O (%)
UBE-(04/2018)-0123	Bambú molido - Malla 40	42.54	6.40	0.34	0.10	42.02

**NOTA:**

- El análisis se realizó con las muestras en base seca (las muestras tal como se recibieron fueron secadas en estufa durante 24 horas a 105 °C).
- Se realizó el análisis por triplicado de cada muestra, obteniéndose resultados aproximados y se determinó la desviación estándar (medida de la dispersión de los valores respecto a la media) de la muestra.



José Calle Maraví, Ph. D.  
Jefe del Laboratorio de  
Energías Renovables

## Anexo 4: Análisis termogravimétrico de los pellets de *Guadua angustifolia* Kunth



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA  
LABORATORIO DE ENERGÍAS RENOVABLES  
Unidad de Biomasa Energética

### REPORTE DE ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO – TGA (PROXIMAL) LER – BIOMASA 053 – 2018

**Solicitante** : UNALM – Tesis de Pregrado  
**Atención** : Dr. Héctor Enrique Gonzales Mora  
Srta. Gabriela Jazmina Mucha Aviles  
**Muestra** : Bambú molido y pellets  
**Procedente de** : Lima, Perú  
**Fecha Recepción** : 17 / 04 / 2018  
**Norma:** : ASTM D7582

N. LABORATORIO	CÓDIGO DE CAMPO	BASE HUMEDA		
		CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	MATERIA VOLÁTIL (%)	CENIZAS (%)
UBE-(04/2018)-0124	CH 8% - Malla 20	9.35	77.25	3.69
UBE-(04/2018)-0125	CH 14% - Malla 20	10.91	75.47	3.57
UBE-(04/2018)-0126	CH 8% - Malla 30	9.37	77.69	3.28
UBE-(04/2018)-0127	CH 14% - Malla 30	10.96	76.25	3.48
UBE-(04/2018)-0128	CH 8% - Malla 40	9.47	78.13	3.30
UBE-(04/2018)-0129	CH 14% - Malla 40	11.43	75.94	3.14
UBE-(04/2018)-0130	CH 8% - Malla 50	9.67	77.13	3.12
UBE-(04/2018)-0131	CH 14% - Malla 50	11.28	76.16	3.15

#### NOTA:

- El análisis se realizó con las muestras en base húmeda (La base húmeda se refiere al análisis de las muestras sin tratamiento previo).
- Se realizó el análisis por triplicado de cada muestra, obteniéndose resultados aproximados y se determinó la desviación estándar (medida de la dispersión de los valores respecto a la media) de la muestra.



Laboratorio de  
Energías Renovables

José Calle Maraví, Ph. D.  
Jefe del Laboratorio de  
Energías Renovables

**Anexo 5: Análisis del poder calorífico superior e inferior de los pellets de *Guadua angustifolia* Kunth**



**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA**  
**LABORATORIO DE ENERGÍAS RENOVABLES**  
 Unidad de Biomasa Energética

**REPORTE DE ANÁLISIS DE PODER CALÓRICO**  
**(CALORÍMETRO)**

**LER – BIOMASA 054– 2018**

**Solicitante** : UNALM – Tesis de Pregrado  
**Atención** : Dr. Héctor Enrique Gonzales Mora  
 Srta. Gabriela Jazmina Mucha Aviles  
**Muestra** : Bambú molido y pellets  
**Procedente de** : Lima, Perú  
**Fecha Recepción** : 17 / 04 / 2018  
**Norma:** : ASTM D5865 – 13

N. LABORATORIO	CÓDIGO DE CAMPO	BASE SECA	BASE HÚMEDA
		PCS (Cal/g)	PCI (Cal/g)
UBE-(04/2018)-0124	CH 8% - Malla 20	4144.47	3757.00
UBE-(04/2018)-0125	CH 14% - Malla 20	4069.03	3625.33
UBE-(04/2018)-0126	CH 8% - Malla 30	4155.30	3765.67
UBE-(04/2018)-0127	CH 14% - Malla 30	4148.93	3694.33
UBE-(04/2018)-0128	CH 8% - Malla 40	4083.53	3697.00
UBE-(04/2018)-0129	CH 14% - Malla 40	3998.10	3541.00
UBE-(04/2018)-0130	CH 8% - Malla 50	4078.90	3684.67
UBE-(04/2018)-0131	CH 14% - Malla 50	3996.10	3545.33

**NOTA:**

- Las muestras fueron analizadas en base seca (las muestras tal como se recibieron fueron secadas en estufa durante 24 horas a 105 °C).
- El PCI se obtiene por cálculo a partir del PCS determinado sobre la muestra analizada. El cálculo del PCI exige el conocimiento del contenido de humedad de la muestra analizada.
- Se realizó el análisis por triplicado de cada muestra, obteniéndose resultados aproximados y se determinó la desviación estándar (medida de la dispersión de los valores respecto a la media) de la muestra.



Laboratorio de  
Energías Renovables



José Calle Maraví, Ph. D.  
Jefe del Laboratorio de  
Energías Renovables