



Universidad Michoacana de San
Nicolás de Hidalgo



Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera

TESIS

“Evaluación de las propiedades físicas y químicas de briquetas elaboradas con biomasa generada en el proceso de transformación primaria de la madera en diferentes regiones de México.”

Alumna que presenta:

María Alejandra Ramírez Ramírez.

Para obtener el grado de:
Ingeniera en Tecnología de la Madera.

Director de tesis: Dr. José Guadalupe Rutiaga Quiñones.

Director externo: Dr. Artemio Carrillo Parra (UJED).

Cd. Hidalgo Michoacán, marzo de 2021



UNIVERSIDAD MICHOCANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO
FACULTAD DE INGENIERÍA EN TECNOLOGÍA DE LA MADERA
SECRETARÍA ACADÉMICA
Edificio "D", planta alta, Tel. 3 22 35 00 Ext. 3056 y 3057
Ciudad Universitaria, Morelia, Michoacán



NO. OFICIO: 0577/2019

Morelia, Michoacán., a 24 de junio de 2019

P. ING. MARÍA ALEJANDRA RAMÍREZ RAMÍREZ
EGRESADA DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA EN TECNOLOGÍA DE LA MADERA
P R E S E N T E.

Para su debido cumplimiento, me permito informar a usted, que ha sido aceptada por el Comité de Titulación de esta Dependencia Educativa, con fecha 26 de marzo de 2019, la **modalidad de titulación: TESIS**, con el Título: "Evaluación de las propiedades físicas y químicas de briquetas elaboradas con biomasa generada en el proceso de transformación primaria de la madera en diferentes regiones de México", bajo la dirección del Dr. José Guadalupe Rutiaga Quiñones y la Co-dirección del Dr. Artemio Carrillo Parra (UJED).

Sin otro particular por el momento, envío a usted un cordial saludo.

ATENTAMENTE



Fabiola Eugenia Pedraza B
M.C. FABIOLA EUGENIA PEDRAZA BUGIO
PRESIDENTA DEL COMITÉ DE TITULACIÓN
Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera
SECRETARÍA ACADÉMICA

DEDICATORIA

*Pues ha hecho en mi favor cosas grandes y maravillosas
Él que es todo poderoso.*

Dedico mi trabajo, mi esfuerzo, mis horas de dedicación, la perseverancia y mis resultados a ustedes, que me han dado su amor y apoyo incondicional, han sido vitales para mí, gracias por la paciencia: Rubén y Esperanza, mis padres; a Berenice mi querida hermana, y a mi Kenna deseo un día leas el trabajo de tu tía.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el apoyo financiero que facilitó el desarrollo de mis actividades académicas bajo el proyecto FSE SENER-CONACYT-2014-246911. **“Clúster de Biocombustibles Sólidos para la Generación Térmica y Eléctrica”**

Al Dr. José Guadalupe Rutiaga Quiñones por el tiempo dedicado, el apoyo y amabilidad al invitarme a formar parte de este proyecto.

Al Dr. Artemio Carrillo Parra por la confianza y las facilidades para la realización de las briquetas y pruebas físico mecánicas en las instalaciones del Instituto de Silvicultura e Industria de la Madera de la Universidad Juárez del Estado de Durango.

A la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, Unidad Profesional de Cd. Hidalgo, Michoacán, por permitirme realizar los análisis proximales de las briquetas en las instalaciones del Laboratorio de Química.

A mis profesores de la Facultad de TECMADERA que durante la carrera, me compartieron de sus conocimientos, gracias.

El presente trabajo de tesis se ha desarrollado en el marco del proyecto apoyado por el Fondo Sectorial FSE-SENER-CONACYT (CEMIE-Bio) número 246911, titulado “Clúster de Biocombustibles Sólidos para la Generación Térmica y Eléctrica”, y se ha desarrollado en la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

Evaluación de las propiedades físicas y químicas de briquetas elaboradas con biomasa generada en el proceso de transformación primaria de la madera en diferentes regiones de México

ÍNDICE

ÍNDICE DE TABLAS	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
RESUMEN	x
ABSTRACT	xi
1. INTRODUCCIÓN	1
2. ANTECEDENTES	3
3. JUSTIFICACIÓN	7
4. HIPÓTESIS	8
5. OBJETIVOS	9
5.1. Objetivo general.	9
5.2. Objetivos particulares.....	9
6. MARCO TEÓRICO	10
6.1. Concepto de biomasa y bioenergía.....	10
6.1.1. Biomasa.	10
6.1.2. Bioenergía.	10
6.1.3. Dendroenergía.	11
6.2. Inflamabilidad y combustibilidad de la madera.	11
6.3. Biocombustibles sólidos.....	12
6.3.1. Tipos de biocombustibles y usos.....	12
6.3.2. Briquetas.....	14
6.3.3. Briqueta de madera.....	14
6.3.4. Máquinas briqueteadoras.....	14
6.3.5. Proceso de briqueteación.....	15
6.4. Caracterización de las briquetas.	16
6.4.1. Forma.	17
6.4.2. Diámetro, longitud y densidad.	18
6.4.3. Humedad.	18
6.4.4. Expansión volumétrica.	19

6.4.5. Materia Volátil.	19
6.4.6. Cenizas	19
6.4.7. Carbono fijo.....	19
6.4.8. Poder calorífico superior.	20
6.4.9. Microanálisis de ceniza.	20
6.4.10. Análisis elemental.	20
6.4.11. Propiedades mecánicas.....	21
6.4.12. Fuerza de compresión.....	21
6.4.13. Índice de resistencia al impacto.....	21
6.5. Calidad de las briquetas.....	22
6.5.1 Normas técnicas Europeas para la evaluación de la calidad de las briquetas.....	22
6.6. Balance Nacional de energía 2018.	24
6.6.1. Contexto Energético Mundial.	24
6.6.2. Indicadores Nacionales	24
6.6.3. Producción de energía primaria.....	25
7.-METODOLOGÍA.....	27
7.1. Trabajo de campo.	27
7.2. Trabajo de laboratorio	28
7.2.1. Elaboración de briquetas.	28
7.3 Evaluación física y química de las briquetas.....	29
7.4. Análisis estadístico.....	36
8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	37
8.1. Humedad.....	37
8.2. Densidad.....	39
8.3. Fuerza de compresión perpendicular.....	41
8.4. Índice de resistencia al impacto (IRI).....	43
8.5. Expansión volumétrica de las briquetas.....	45
8.6. Poder Calorífico superior.....	48
8.7. Cenizas, material volátil y carbono fijo.....	51
9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	58
10. BIBLIOGRAFIA.....	60

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tipo y usos de biocombustibles (Velázquez, 2019).	13
Tabla 2. Caracterización de las briquetas.	17
Tabla 3. Descripción detallada de la calidad de las briquetas (UNE 17225-3, 2014).	23
Tabla 4. Muestras, nombre y procedencia.	27
Tabla 5. Muestras, nombre y procedencia.	27
Tabla 6. Análisis de varianza para la humedad de las briquetas (%).	37
Tabla 7. Pruebas de Múltiple Rangos para la Humedad de las briquetas.	38
Tabla 8. Análisis de varianza para la Densidad Inicial de las briquetas (kg/m^3).	39
Tabla 9. Pruebas de Múltiple Rangos para la Densidad de las briquetas.	40
Tabla 10. Análisis de varianza para la Fuerza de Compresión de las briquetas (N/mm).	41
Tabla 11. Pruebas de Múltiple Rangos para Fuerza de Compresión en las briquetas.	43
Tabla 12. Análisis de varianza para Índice de Resistencia al Impacto de las briquetas (%).	44
Tabla 13. Pruebas de Múltiple Rangos para el Índice de Resistencia al Impacto de las diferentes briquetas.	45
Tabla 14. Análisis de varianza para la Expansión Volumétrica %.	47
Tabla 15. Pruebas de Múltiple Rangos para la Expansión Volumétrica.	48
Tabla 16. Análisis de varianza para Poder Calorífico de las briquetas (MJ/kg).	49
Tabla 17. Pruebas de Múltiple Rangos para Poder Calorífico superior.	50
Tabla 18. Análisis de varianza para Cenizas en las briquetas (%).	52
Tabla 19. Pruebas de Múltiple Rangos para las Cenizas en las briquetas.	53
Tabla 20. Análisis de varianza para Material Volátil (%).	54
Tabla 21. Pruebas de Múltiple Rangos para Material Volátil en las briquetas.	55
Tabla 22. Análisis de varianza para Carbono Fijo (%).	56
Tabla 23. Pruebas de Múltiple Rangos para carbono fijo en las briquetas.	57

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Formas de briquetas revisada 11 de septiembre de 2019. Fuente: https://www.fueguing.com/donde-comprar-briquetas/	17
Figura 2. Formas de las briquetas. Fuente: (UNE 17225-3, 2014).....	18
Figura 3. Producción mundial de energía primaria, 2016.....	24
Figura 4. Índice de independencia energética	25
Figura 5. Producción de energía primaria (petajoules).....	26
Figura 6. Muestras recolectadas.	28
Figura 7. Briqueteadora marca Lippel.	29
Figura 8. Dado briqueteadora.	29
Figura 9. Elaboración de briquetas.	29
Figura 10. Muestras en la estufa.....	29
Figura 11. Muestras en el desecador.	30
Figura 12. Diferencia de la misma muestra de briquetas antes y después del acondicionamiento.	30
Figura 13 Máquina universal Instron.	31
Figura 14 Ajuste de cruceta.....	31
Figura 15 Ejecución del ensayo.	32
Figuran 16 Briquetas después del ensayo.....	32
Figura 17. Muestras de tres partes de las briquetas.	34
Figura 18. Muestras en el horno a 105° C.	34
Figura 19. Peso de la briqueta.	34
Figura 20. Colocación del hilo de celulosa.	34
Figura 21. Llenado de oxígeno.....	34
Figura 22. Colocación del Vessel.	34
Figura 23. Realizando ensayo.	34
Figura 24. Crisoles dentro de la mufla.	36
Figura 25. Material volátil a 900 °C.....	36

Figura 26. Gráfico de medias para la Humedad de las diferentes briquetas (%).	38
Figura 27. Gráfico de medias para la Densidad inicial de las diferentes briquetas (k/m^3).	40
Figura 28. Gráfico de medias para la Fuerza de Compresión de las diferentes briquetas (N/mm).	42
Figura 29. Gráfico de medias para el Índice de Resistencia la Impacto de las diferentes briquetas (%).	44
Figura 30. Gráfico de medias para la Expansión Volumétrica de las diferentes briquetas (%).	47
Figura 31. Gráfico de medias para el Poder Calorífico superior de las diferentes briquetas (MJ/kg).	50
Figura 32. Gráfico de medias para las Cenizas en las diferentes briquetas (%).	52
Figura 33. Gráfico de medias para la Material Volátil en las diferentes briquetas (%).	55
Figura 34. Gráfico de medias para el Carbono Fijo en las diferentes briquetas (%).	57

RESUMEN

En esta investigación se caracterizaron briquetas elaboradas con biomasa generada en el proceso de transformación primaria de la madera en diferentes regiones de México sin el uso de aditivos. Para ello se utilizaron 28 muestras de aserrín de diferentes industrias madereras ubicadas en cinco estados de la República Mexicana. El proceso de densificación se realizó en una briquetadora de laboratorio de pistón hidráulico vertical. Las briquetas se elaboraron con 40 g de aserrín, a 50 ° C, 20 kPa y prensado durante 5 min. Los resultados obtenidos variaron de la siguiente manera: contenido de humedad (3.45% a 8.8%), densidad (1049.44 kg / m³ a 1208.85 kg / m³), expansión volumétrica (3.30% a 38.97%), resistencia a la compresión (4.93 N / mm a 98.61 N / mm), índice de resistencia al impacto (46.66% a 200%), cenizas (0.1% a 3.94%), materia volátil (79.6% a 90.95%), carbono fijo (7.82% a 16.69%) y valor calorífico (19.21 MJ / kg hasta 22.83 MJ / kg). En general, se encontraron diferencias estadísticas significativas ($p < 0.05$) en los resultados obtenidos. La densidad de las briquetas está dentro de la clasificación "aceptable" (800 kg / m³ a 1200 kg / m³). Se observó que a mayor densidad, menor expansión volumétrica, mayor resistencia a la compresión y mayor índice de resistencia al impacto. Según el contenido de cenizas, las briquetas podrían alcanzar una calidad internacional. Debido a los altos valores de materia volátil, se esperaría una combustión rápida de las briquetas con poca generación de humo tóxico. Los resultados de carbón fijo y valor calorífico son aceptables. Los resultados obtenidos a nivel de laboratorio indican que el aserrín recolectado es ideal para una posible densificación a escala industrial.

Palabra claves: Bioenergía, Biocombustibles sólidos, densificado, aserrín, briquetas.

ABSTRACT

In this research, briquettes made with biomass generated in the primary transformation process of wood were characterized in different regions of Mexico without the use of additives. For this, 28 sawdust samples from different wood industries located in five states of the Mexican Republic were used. The densification process was carried out in a vertical hydraulic piston laboratory briquette machine. The briquettes were made with 40 g of sawdust, at 50 ° C, 20 kPa and pressed for 5 min. The results obtained varied as follows: moisture content (3.45% to 8.8%), density (1049.44 kg / m³ to 1208.85 kg / m³), volumetric expansion (3.30% to 38.97%), compressive strength (4.93 N / mm to 98.61 N / mm), impact resistance index (46.66% to 200%), ash (0.1% to 3.94%), volatile matter (79.6% to 90.95%), fixed carbon (7.82% to 16.69%) and calorific value (19.21 MJ / kg up to 22.83 MJ / kg). In general, significant statistical differences ($p < 0.05$) were found in the results obtained. The density of the briquettes is within the "acceptable" classification (800 kg / m³ to 1200 kg / m³). It was observed that the higher the density, the lower the volumetric expansion, the higher the resistance to compression and the higher the impact resistance index. Depending on the ash content, the briquettes could reach international quality. Due to the high volatile matter values, rapid combustion of the briquettes with little generation of toxic smoke would be expected. The fixed carbon and calorific value results are acceptable. The results obtained at the laboratory level indicate that the collected sawdust is ideal for possible densification on an industrial scale.

Keywords: Bioenergy, Solid biofuels, densified, sawdust, briquettes.

1. INTRODUCCIÓN

La dependencia de los combustibles fósiles, frente a la gran demanda de energía obliga al mercado a buscar nuevas fuentes energéticas que cuenten con viabilidad técnica y con el menor impacto ambiental posible. En los últimos años han proliferado las llamadas energías renovables, en las cuales su producción se renueva con el tiempo, complementa las necesidades energéticas suministradas por las energías clásicas (petróleo, gas natural, carbón mineral, etc.) son consideradas limpias, no son contaminantes o que son menos contaminantes que las energías clásicas; ante una posible crisis de petróleo estas energías podrían alternar, aunque no suplirían en su totalidad a las energías clásicas. Las energías renovables más estudiadas son: la biomasa, la energía solar, la geotérmica, la eólica y la energía de las mareas (Martin, 1994).

Los residuos forestales en el proceso de transformación primaria de la madera en la actualidad tienen un alto grado de desaprovechamiento, el aserrín y viruta son producto de todas las operaciones mecánicas del aprovechamiento de la madera, estos residuos se almacenan en grandes espacios físicos o se queman al aire libre constituyéndose en un contaminante más a la atmósfera, sin poseer un mayor valor agregado. El aserrín es uno de los residuos forestales altamente contaminante para el medio ambiente teniendo un mayor impacto en la contaminación de suelo y agua.

Una de las vías más eficiente de concentrar la energía química de los residuos forestal es la densificación de la biomasa convirtiéndolos en pellets o briquetas conocidos también como biocombustibles sólidos densificados; al fabricar y comercializar este tipo de combustibles se disminuye considerablemente la cantidad de residuos, se reduce el volumen transportado, así como también se logra una combustión más limpia y eficiente (Gallipoliti *et al.* 2012).

Las briquetas, que se obtienen a partir de un material lignocelulósico o algún otro material mediante la compactación de éste, se elaboran bajo la aplicación de presión y temperatura que provocan la auto aglomeración de las partículas. Son 100 % ecológicas y renovables usualmente tienen forma cilíndrica o bloque es un sustituto de carbón y leña, son usadas frecuentemente en el sector doméstico e industrial como generador de calor o producción de energía ya sea en estufas, chimeneas, hornos, calderas, gasificadores, etc. (Fonseca y Tierra 2011).

En México, existen innumerables aserraderos, carpinterías, mueblerías, donde se genera grandes cantidades de residuos forestales tanto de coníferas como latifoliadas. Ha surgido el presente trabajo, para elaborar un biocombustible sólido con residuos maderables recolectados en diferentes partes de país, buscando caracterizar briquetas de estos residuos madereros para presentar, una fuente de energía alternativa, económica, menos contaminante y fácil de usar.

2. ANTECEDENTES

Existen estudios que tratan sobre la caracterización de biomasa para su posible uso en biocombustibles densificados y también otros que dan a conocer la calidad de las briquetas a partir de distintos residuos forestales; entre ellos, los siguientes:

Gallipoliti *et al.* (2012) elaboraron 24 briquetas de aproximadamente 10 cm de largo cada una con restos de aserrín de pino blanco más un aglomerante de harina de mandioca. Las briquetas fueron preparadas a un contenido de humedad de aproximadamente de 6 %, en su preparación se midieron 500 ml de este aserrín en un vaso de precipitados, de la misma forma, se midieron 300 ml de aglomerante (almidón de mandioca) y agua a discreción. Se mezclaron estos ingredientes hasta obtener una masa homogénea, obteniendo briquetas con condiciones de 12.3% de humedad, 60.9% de material volátil, 1.9% de cenizas, 75.1% sólidos secos y 24.9 % carbono fijo con un poder calorífico de 4672.45 Kcal/kg. Los resultados muestran una importante fuente energética a las briquetas y contribuye positivamente al cuidado del medio ambiente y desarrollo sostenible de la región. Esta experiencia permitió obtener briquetas con bajos contenidos de cenizas y de humedad, lo que evita la generación de polvo, el retraso en el encendido del carbón, y permite pensar en la continuidad de los ensayos para optimizar la producción y constituir una actividad rentable y un producto de calidad.

Lima (2013) evaluó las propiedades físicas y químicas de los residuos de corteza, duramen y albura de *Pinus montezumae* Lamb., *Abies religiosa* (Kunth) Schltdt. & Cham., *Pinus pseudostrobus* Lindl., y *Pinus leiophylla* Sch. et Cham., colectados en Nuevo San Juan Parangaricutiro, Michoacán, México. El material se obtuvo de rodajas de 30 cm de espesor a 1.3 m de altura para cada una de las especies. Sus análisis estadísticos consistieron en comparar los valores medios de cada variable entre las especies y dentro de cada especie y estructura, y establecer posibles correlaciones entre las variables y el poder calorífico, con métodos estándares obtuvieron los siguientes resultados: un contenido de humedad en un rango de 46% a 148 %, un pH de 5.18 a 6.01, mostrando mayor acidez en la corteza; de igual manera, los resultados en ceniza fueron mayores en la corteza, su poder calorífico se encontró en un rango de 17.882 a 19.629 MJ/kg; también se determinaron contenido de extraíbles y

lignina. La calidad de la madera de las especies para ser usados como biocombustibles se considera adecuada.

Correa *et al.* (2014) analizaron viruta y aserrín de *Pinus leiophylla*, *P. montezumae* y *P. pseudostrobus* con el fin de determinar, mediante pruebas estándar de laboratorio, si reunían los requisitos para la generación de energía. El aserrín y la viruta se obtuvieron después de identificar cada troza según la especie, el muestreo se hizo en los talleres de Nuevo Parangaricutiro, Michoacán, México. El contenido de humedad del aserrín fue de 51.5 ± 1.9 % y 53.7 ± 0.1 % en viruta; estos valores superaron el máximo permisible. El contenido de cenizas en el aserrín y en la viruta fue de 0.26 ± 0.03 % y 0.34 ± 0.03 %, respectivamente. En las tres especies evaluadas, el porcentaje medio de Ca, K, Mg, P, S, Si, Fe, Al y Na en el aserrín fue 47.1 ± 2.8 , 26.0 ± 2.5 , 13.5 ± 0.4 , 5.0 ± 0.4 , 3.2 ± 0.4 , 2.3 ± 0.8 , 1.0 ± 0.1 , 1.3 ± 0.4 y 1.4 ± 0.3 , respectivamente, mientras que el porcentaje medio de Ca, K, Mg, P, S, Si, Fe, Al y Na en la viruta fue 43.2 ± 7.0 , 16.5 ± 3.0 , 10.1 ± 4.8 , 4.0 ± 0.6 , 1.8 ± 0.2 , 3.6 ± 0.3 , 1.0 ± 0.6 , 1.1 ± 0.1 , y 1.0 ± 0.6 , respectivamente. De acuerdo con los resultados, el aserrín es el subproducto más adecuado para la producción de pellets y briquetas.

Mitchual *et al.* (2014a) estudiaron el efecto de la presión y proporción de mezclas producidas por mazorcas de maíz y aserrín de baja, media y alta densidad. Las mezclas fueron de 90:10, 70:30 y 50:50 (aserrín: mazorca de maíz) a una temperatura de 28°C con presiones de 20 a 50 MPa con intervalos de 10 MPa y con un tiempo de 10 minutos dentro de la briqueteadora. Los resultados de las características físicas y mecánicas de las briquetas producidas a partir de combinaciones de aserrín de especies de baja densidad y mazorcas de maíz fueron excepcionalmente superiores a las producidas de combinaciones de partículas de mazorca de maíz y maderas de densidad media y alta.

Mitchual *et al.* (2014b) evaluaron seis especies de madera tropicales: *Triplochiton scleroxylon*, *Ceiba pentandra*, *Aningeria robusta*, *Terminalia superba*, *Celtis mildbreadii* y *Piptadenia africana*. Las propiedades estudiadas incluyeron densidad, valor calorífico bruto, materia volátil, ceniza, humedad, carbono orgánico y composición elemental. Las propiedades del combustible se determinaron usando métodos estándar de laboratorio. El

resultado indica, que el valor calorífico bruto de la especie, oscilaron entre 20.16 y 22.22 MJ/kg y variaron ligeramente entre sí, siendo más altos que los de otros materiales de biomasa como paja de trigo, paja de arroz, paja de maíz y caña de azúcar. El contenido de cenizas y materia volátil varió de 0.60% a 5.04%, y 75.23% a 83.70%, respectivamente, siendo consideradas buenos combustibles por las normas de Austria y Alemania.

Sánchez *et al.* (2014) desarrollaron briquetas a partir de los residuos de madera principalmente del aserrín. Las briquetas se obtuvieron en una máquina de pistón hidráulico permitiendo una presión de 5 MPa con un diámetro de 6 cm y 12 cm de longitud con las siguientes características: 19.8 MJ/kg de poder calorífico, 10% de humedad, 894 kg/m³ de densidad, 1.3% de cenizas, 15.29% de carbono fijo y 83.41% de materia volátil.

Ordoñez (2015) evaluó la influencia de la formulación de combustibles sólidos densificados de aserrín de pino blanco (*Pinus pseudostrobus* Lindl.), reciclado de carbón activado y almidón de yuca (*Manihot esculenta*), sobre las propiedades fisicoquímicas y físico-mecánicas de los combustibles sólidos densificados en general. El autor cita los tipos de fabricación de briquetas clasificadas por la presión que ejercen en el proceso de densificación, máquina artesanal, semi industrial e industrial; un aspecto importante en cada tipo de máquina es el contenido de humedad. Para la compactación, las mezclas fueron agua, yuca, aserrín y carbón activado hasta homogenizar; diez muestras de diferente porcentaje. El tamaño de partícula fue < 3 mm, elaboradas en una máquina artesanal y acondicionadas para obtener un 10 % CH; la briqueta tuvo un secado al aire libre entre 45 a 60 minutos. Las formulaciones de 25 g y de 40 g de carbón activado son las de mayor precisión al presentar un valor de desviación estándar de 0. En el experimento se obtuvo mayor poder calorífico de la briqueta que contenía 97.28 % de carbón activado con un poder calorífico de 20.83 MJ/kg, variando este valor conforme el porcentaje de carbón activado usado en la formulación. Los resultados concluyen que todas las formulaciones presentan una friabilidad aceptable en su formulación.

Rivera *et al.* (2015) elaboraron siete briquetas de diferentes sustratos forestales; granza, aserrín fino, papel y flor de pino en diferentes porcentajes. La evaluación de eficiencia se

determinó mediante la prueba de ebullición de agua (WBT), se midió las emisiones de monóxido de carbono (CO) y se calculó el poder calorífico de los diferentes tipos de briquetas. La mezcla con aglutinante para todas las briquetas se empleó 500 ml de agua para realizar una mejor homogenización de los residuos; el compuesto se vertió en un recipiente movable del prototipo de máquina briqueteadora, ejerciendo una presión de dos toneladas para extraer de manera eficiente el líquido. Las briquetas se secaron al natural exponiendo a radiación solar directa para eliminar la humedad durante tres días. Los resultados obtenidos muestran que estas briquetas emiten menos gases contaminantes al ambiente que la leña; la eficiencia térmica fue de aproximadamente un 92% en tres de las briquetas evaluadas; la leña obtuvo una eficiencia entre 45 y 63%. Se concluye que la elaboración de las briquetas fue exitosa con una excelente compactación; la briketa de granza 50% + aserrín fino 25% + papel 12.5% + flor de pino 12.5% es la mejor opción según la evaluación siendo esta la que emite menores cantidades de CO que son casi nulas obteniendo una eficiencia térmica de 92%.

Pérez *et al.* (2016) estudiaron el efecto del tipo de material, presión y temperatura en la densidad de briquetas de residuos industriales de tres especies del género *Pinus*. El aserrín de madera se cribó para obtener un material de tamaño homogéneo. Las briquetas se elaboraron en una máquina briqueteadora de laboratorio con aserrín de madera y mezcla de madera-corteza en proporción 1:1. Las presiones empleadas fueron 50, 100 y 150 bar y temperaturas de 30 °C y 40 °C. Los resultados indicaron que la densidad de las briquetas está influenciada por el tipo de material, ya sea aserrín, corteza o mezcla de aserrín-corteza, así como por la presión y la temperatura.

Carrillo *et al.* (2018) en su estudio explican la comparación de propiedades energéticas entre aserrín fresco e intemperado de la madera de *Pinus pseudostrobus*, determinando propiedades físicas y mecánicas de las briquetas elaboradas con biomasa de estas especies. Las briquetas se elaboraron en una máquina marca Lippel a presiones de 10 y 15 MPa y a temperaturas de 50° 70° y 90° C. El aserrín intemperado mostró mejores propiedades energéticas al presentar menor porcentaje de humedad (9.12 %) y mayor contenido de carbono fijo (13.84 %); sin embargo, presentó un porcentaje superior de cenizas (0.84 %).

3. JUSTIFICACIÓN

Con la presente investigación se trata de buscar una manera adecuada y eficiente de aprovechar residuos forestales como fuentes de bioenergía. La densificación de biomasa es la conversión de la materia prima en biocombustible, presenta ventajas de manejo, transporte, almacenamiento del material, etc. Esta tecnología ayuda a expandir el uso de la biomasa como fuente productora de energía. La briqueteación revaloriza un conjunto de residuos sólidos orgánicos que en su combustión producen energía aprovechable, aumenta la densidad de residuos forestales que son caros de transportar debido a los bajos valores de los mismos, así también propicia un incremento económico rural. Esta bioenergía podría completar las necesidades energéticas demandadas en la actualidad y puede ser fuente fundamental de uso en las zonas rurales en donde no se tiene acceso a otro tipo de combustible diferente de la leña y el carbón vegetal. La compactación mejora sus características como combustible, además los residuos forestales provienen de operaciones mecánicas en el proceso primario de la madera, donde se generan en grandes cantidades provocando contaminación ambiental.

4. HIPÓTESIS

Las propiedades físicas y químicas de los residuos lignocelulósicos compactados a nivel laboratorio, recolectados en los estados de Quintana Roo, Chihuahua, Durango, Michoacán, Oaxaca, Nuevo León y Sonora, indican que estos residuos son adecuados para su densificación a nivel industrial.

5. OBJETIVOS

5.1. Objetivo general.

Evaluar las propiedades físicas y químicas de briquetas elaboradas con la biomasa generada en el proceso de transformación primaria de la madera, colectada en diferentes regiones del país.

5.2. Objetivos particulares.

- Conocer las propiedades físicas y químicas de las briquetas.
- Conocer las propiedades energéticas de las briquetas.

6. MARCO TEÓRICO

Dado que la mira central de este análisis se enfocará en la elaboración de biocombustibles sólidos (BCS) a partir de aserrín, astilla y viruta obtenida de la transformación primaria de la madera, será necesario plantear algunos parámetros que sirvan de ejes conceptuales sobre los que apoyar la lectura interpretativa de la materia orgánica como biocombustible.

6.1. Concepto de biomasa y bioenergía.

6.1.1. Biomasa.

La biomasa comprende toda materia orgánica originada en un proceso biológico utilizable como fuente de energía. Este proceso biológico puede ser espontáneo como la formación de montes naturales, es decir cualquier sustancia orgánica de origen vegetal o animal incluyendo los materiales que resultan de sus transformación natural o artificial (De la Biomasa a la Energía Renovable: Dendroenergía en Argentina FAO, 2015-2019).

La biomasa tiene carácter de energía renovable ya que su contenido energético procede en última instancia de la energía solar fijada por los vegetales en el proceso fotosintético. Esta energía se libera al romper los enlaces de los compuestos orgánicos en el proceso de combustión, dando como productos finales dióxido de carbono y agua (Fernández, 2004).

Por su origen y composición la biomasa resulta tener principal uso en calefacción, cocción, producción de agua caliente y energía eléctrica en el sector doméstico. Es versátil ya que podemos obtener mediante diferentes procesos BCS (briquetas, pellets, carbón vegetal, astillas), BCL (biodiesel, bioetanol, piroleñosos) y BCG (Syngas, hidrógeno y biogás) agregando valor a la comercialización (Velázquez, 2019).

6.1.2. Bioenergía.

La Bioenergía es la energía procedente de la biomasa, comprende todas las formas de energía derivada de combustibles orgánicos de origen biológico utilizados para producir energía (Tirado, 2015).

De entre las distintas fuentes de energía las renovables son aquellas que se producen de forma continua, se renuevan con el tiempo, aunque habría que recalcar que para fuentes como la biomasa esto es siempre que se respeten los ciclos naturales (De la Biomasa a la Energía Renovable: Dendroenergía en Argentina FAO, 2015-2019).

6.1.3. Dendroenergía.

Es la energía procedente de la madera es considerada como la primera fuente de energía de la humanidad, desempeña funciones múltiples en diferentes regiones del mundo por su disponibilidad a nivel nacional (Fernández, 2004). Muchos países en desarrollo dependen estrechamente de la madera que es fuente de energía para calentar las viviendas y cocer los alimentos, pero los recursos madereros se ven a menudo amenazados por la pérdida de la cubierta vegetal debida al aumento de la población, a la expansión agrícola y a unas prácticas de ordenación forestal insostenibles (Fernández, 2004). La utilización de la dendroenergía está determinada por varios factores, como el precio, los ingresos, la disponibilidad de otros tipos de energía y la existencia de recursos. En general, la mayoría de los consumidores de países en desarrollo utilizan la dendroenergía, porque sus posibilidades de elegir el suministro de energía están limitadas por los ingresos y por la carencia de otros tipos de energía. Es importante notar que la bioenergía sólo puede ser considerada renovable si el crecimiento de la biomasa es mayor que los volúmenes cosechados, y si el dióxido de carbono emitido durante la producción, transporte y elaboración no excede del que fue capturado durante el crecimiento (De la Biomasa a la Energía Renovable: Dendroenergía en Argentina FAO, 2015-2019).

6.2. Inflamabilidad y combustibilidad de la madera.

La relación al fuego en la madera esta fundamentalmente relacionada con su composición química, su estructura (vasos o fibras) y el contenido de humedad. La inflamabilidad en la madera está influenciada por las condiciones de presión, temperatura y los gases que pueden salir al exterior y aportar calor, a elevadas temperaturas la madera empieza por perder su contenido de agua y despidе gases inflamables (MV). La celulosa de la madera al arder se combina con el oxígeno del aire dejando un pequeño residuo ceniciento, procedente de la lignina y de las sales minerales, si el oxígeno es abundante y la temperatura suficiente la destrucción es total; si la combustión es incompleta la celulosa sufre deshidratación, y la madera sólida se convierte en carbón vegetal que impide la penetración del calor y del oxígeno en las capas interiores. Al principio de la combustión, el calor aportado a la madera evapora el agua, siendo combustible hasta que esta se elimine por completo, las especies más ligeras al tener un volumen grande de poros ofrecen gran libertad a los gases para su desprendimiento la gran mayoría son inflamables provocando rápidamente las llamas. Los

taninos y resinas además de aumentar el poder calorífico aumentan la inflamabilidad de la madera estas variables hacen difícil el predecir y comparar la inflamabilidad de las distintas especies (<http://asmadera.com/wp-content/uploads/2014/11/p5.pdf>).

6.3. Biocombustibles sólidos.

Los biocombustibles sólidos (BCS) son vectores energéticos obtenidos de la biomasa, con mayores o menores grados de transformación física o química, que se mantienen en estado sólido hasta su uso final. Entre ellos se encuentran: la leña (el bioenergético más utilizado por el hombre en la actualidad); las astillas de madera; los pellets de madera (el BCS de mayor comercio global actual); los pellets y briquetas de residuos forestales, agrícolas y otros; el carbón vegetal (el reductor metalúrgico más antiguo, actualmente es un combustible muy empleado en los sectores residencial, comercial e industrial) (Bustamante y Cerruti 2017).

6.3.1. Tipos de biocombustibles y usos.

En la Tabla 1 se muestra el tipo de proceso que lleva la transformación de los diferentes tipos de biocombustibles, así como la clasificación de acuerdo a la obtención de la biomasa.

Tabla 1. Tipo y usos de biocombustibles (Velázquez, 2019).

Biocombustible	Estado Físico	Biomasa de origen	Tipo y proceso de transformación		Utilización
Leña y astillas	Sólido	Cultivos energéticos forestales. Cultivos energéticos de especies leñosas. Resto de operaciones silvícolas. Recortes y tacos procedentes de la industrias forestales.	Físico	Fragmentación	Combustión directa en calderas. Formación de carbón vegetal. Formación de pélets y briquetas.
Carbon vegetal	Sólido	Cultivos energéticos forestales. Cultivos energéticos de especies leñosas. Restos de operaciones silvícolas. Recortes y tacones procedentes de las industrias forestales.	Físico	Fragmentación Carbonización	Combustión directa en calderas. formación de pélet y briquetas.
Peléts y briquetas	Sólidos	Cultivos energéticos agrícolas y forestales. Restos de operaciones silvícolas. Restos de las industrias forestales. Residuos urbanos.	Físico	Trituración Secado Compactación	Combustión directa en calderas.
Bioetanol y Biometanol	Líquido	Azúcares procedentes de cultivos como la caña de azúcar o remolacha. Almidón obtenido de diversas especies vegetales entre las que destacan papa, maíz, y demás cereales. Almidón obtenido de materiales lignocelulósicos (maderas).	Químico	Fermentación de azúcares Destilación	Directamente como carburante de motores. Como aditivo mezclándose con gasolina en una proporción comprendida entre le 10 y 20 %.
Metiléster y dimetiléster	Líquido	Cualquier aceite de origen vegetal, principalmente de cultivos oleaginosos: colza, girasol y cacahuete, aceites vegetales residuales y/o procesos industriales	Físico y químico	Transesterificación de aceites con metanol o etanol, obteniendo glicerina	Directamente como carburante de motores de encendido por combustión (biodisel)
Aceite piroleñoso	Líquido	Residuos leñosos, arroz, trigo, tallos de maíz.	Físico y químico	Pirólisis (calentamiento instantáneo de la biomasa a temperatura entre 400-450 °C y posterior enfriamiento	Calderas para obtención de calor. Como carburante de motores. En turbinas para energía eléctrica.
Biogas	Gaseoso	Fermentación anaerobia de origen microbiológico obteniendo principalmente: metanol, nitrógeno amoniaco e hidrogeno.	Químico	Fermentación anaerobia de origen microbiológico obteniendo principalmente: metanol, nitrógeno amoniaco e hidrogeno.	Combustión directa en calderas. Como carburante de motor.
Gas obtenido por gasificación	Gaseoso	Residuos leñosos, arroz, trigo, tallos de maíz.	Químico	Oxidación parcial de la biomasa a alta temperatura sin combustión obteniendo hidrogeno e hidrocarburos.	Combustión directa en calderas Como carburante de motor En turbinas para energía eléctrica
Biohidrógeno	Gaseoso	Biomasa con gran contenido de agua o alcoholes	Químico	Hidrólisis	Carburante

6.3.2. Briquetas.

Las briquetas son un BCS que se obtienen a partir de la densificación de un material ligocelulósico u otros materiales, bajo la aplicación de temperatura y presión provocan la auto aglomeración de las partículas, teniendo un mayor uso en la generación de calor o producción de energía, como sustituto de la leña y carbón en estufas, chimeneas, hornos calderas y gasificadores. La forma que adquieren pueden ser rectangulares, cilíndricas o hexagonales, una de sus principales características es su alta densidad (Fonseca y Tierra, 2011).

6.3.3. Briqueta de madera.

Biocombustible densificado a partir de la biomasa leñosa pulverizado con o sin aditivos generalmente con forma cúbica, prismática o unidades cilíndricas con un diámetro mayor de 25 mm, producidas por compresión de biomasa triturada, las briquetas se fabrican normalmente en una prensa de pistón, con contenido total de humedad por lo general menor del 15 % de la masa (UNE-EN 17225-3, 2014).

6.3.4. Máquinas briqueteadoras.

La tecnología utilizada puede clasificarse utilizando varios criterios, según las condiciones de funcionamiento, la fabricación de briquetas se puede clasificar en dos categorías: prensado en caliente y a alta presión y prensado en frío y baja presión (Dutta, 2007).

Según el modo de operación, se divide en dos categorías:

-Prensado por lotes: con esto, las briquetas se presionan en un prensador ya dimensionado; como tal, salen en su tamaño deseado.

-Densificación continua: las briquetas se producen en un cilindro largo y luego se cortan a medida (Dutta, 2007).

Sin embargo, dependiendo del tipo de equipo utilizado, se puede clasificar en cuatro tipos principales:

-Máquina de prensa de presión hidráulica. Al presionar el material comprimido se calienta por fuerzas de fricción cuando se empuja a través de una matriz (FAO, 1990) puede tolerar un contenido de humedad generalmente aceptado del 15 % teniendo una densidad aparente inferior a 1000 g/m^3 (Grover y Mishra, 1996).

-Prensa mecánica de pistón. La prensa de pistón actúa de manera discontinua con material que se alimenta a un cilindro que luego es comprimido por un pistón en un troquel que se

estrecha ligeramente. El material comprimido se calienta por fuerzas de fricción cuando se empuja a través de la matriz. Las ligninas contenidas en todos los materiales de celulosa leñosa comienzan a fluir y actúan como un pegamento natural para unir el material comprimido. Cuando el cilindro de material sale del troquel, las ligninas se solidifican y lo mantienen unido para formar briquetas cilíndricas (FAO, 1990). La energía del pistón se transmite desde un motor eléctrico a través de un sistema de aceite hidráulico de alta presión la pérdida de energía es limitada, y el rendimiento con el consumo de energía es óptimo (Grover y Mishra, 1996).

-Tornillo de compactación o prensa extrusora. Utiliza la tecnología de prensa de tornillo la biomasa se extrude continuamente mediante un tornillo a través de una matriz cónica que se calienta externamente para reducir la fricción. Los efectos combinados de la fricción de la pared en el barril, la fricción interna en el material y la alta velocidad de rotación (~ 600 rpm) del tornillo, aumentan la temperatura en el sistema cerrado y calientan la biomasa. Esta biomasa calentada es forzada a través del troquel de extrusión para formar las briquetas o gránulos con la forma requerida. Si la matriz se estrecha, la biomasa se compacta más. Si el calor generado dentro del sistema no es suficiente para que el material alcance un estado pseudoplástico para una extrusión suave, se proporciona calor a los extrusores desde el exterior, ya sea usando calentadores de cinta (Grover y Mishra, 1996).

-Las briquetas artesanales. Se caracteriza por no necesitar equipos sofisticados, es necesario el uso de algún aglutinante en un medio acuoso; teniendo un secado posterior para su utilización. Los parámetros de proceso no son precisos. La presión de compactación es baja 5 MPa en promedio, debido al uso de altas cantidades de aglutinante que es parte fundamental de la cohesión entre partículas del material. El aglutinante puede ser no combustible como estiércol de animal, papel, aserrín, almidones, arcillas etc. (Fonseca y Tierra, 2011).

6.3.5. Proceso de briqueteación.

La materia prima debe tener las condiciones adecuadas para entrar al proceso, los parámetros son: humedad, tamaño de partícula, tipo de aglutinantes, presión y temperatura. La presión y la temperatura son factores muy importantes sobre todo cuando se trata de compactar material orgánico sin añadir aglomerante, por lo tanto, la compactación, envuelve lo que es: presión, fricción entre partículas, deformación, rompimientos celulares y aglutinamientos entre las partículas vecinas (Fonseca y Tierra, 2011). El reblandecimiento

de lignina y su endurecimiento posterior aporta el aglomerante necesario para la briqueta. Debido a la aplicación de altas presiones y temperaturas, puentes sólidos se pueden desarrollar por la difusión de moléculas de una partícula a otra en los puntos de contacto. Fuerzas de corto alcance tales como enlaces químicos libres, puentes de hidrógeno, fuerzas de Van der Waals u otras como la electrostáticas y las fuerzas magnéticas, pueden causar que las partículas sólidas se adhieran entre sí cuando se encuentran suficientemente cerca (González, 2013). La temperatura, dependiendo de la briqueteadora, se relaciona con la presión debido a la fricción interna entre las partículas y con la pared del equipo utilizado. Por efecto de la presión, las partículas de la materia prima tienden a comportarse como sólidos frágiles o material fibroso dependiendo del caso, se acomodan progresivamente y se fracturan sucesivamente hasta que los fragmentos son capaces de soportar la presión externa aplicada. El progreso de la compactación, implica el flujo de carbonizado dentro de los intersticios debido al movimiento de los fragmentos que siguen una fractura (Fonseca y Tierra, 2011).

Esto conduce a varias capas horizontales compactadas que se presionan unas a otras, desarrollando fuerzas de compresión laterales dentro del compacto. Al final de la etapa de alta presión en el briqueteado, se alcanza un cuasi-equilibrio en el cual el compacto soporta la presión externa y el aglutinante, si lo hay, está distribuido estáticamente dentro del compacto. Cuando se elimina la presión este equilibrio se altera y la materia prima comprimida se expande y puede ocurrir algún ligero desplazamiento del aglutinante, además de producirse un efecto de relajación, a causa del cual los volúmenes de las briquetas crudas son algo mayores que los correspondientes bajo la presión en el molde (Fonseca y Tierra, 2011).

6.4. Caracterización de las briquetas.

Las características de las briquetas son el resultado de: el equipo que se utiliza; el tipo de biomasa; la presión y temperatura manejada y aglutinantes utilizados que emplee el fabricante. En la Tabla 2 se muestra las características empleadas para determinar la calidad de las briquetas.

Tabla 2. Caracterización de las briquetas.

Propiedades físicas	Forma	****
	Diámetro	mm
	Longitud	mm
	Densidad	kg/m ³
	Contenido de humedad	%
	Elongación	%
Propiedades químicas	Materia volátil	%
	Cenizas	%
	Carbono fijo	%
	Poder Calorífico	KJ/ kg
	Elementales	%
	CHONS	%
Propiedades mecánicas		
	Fuerza de compresión	N/mm
	Friabilidad	%
	Durabilidad	%

6.4.1. Forma.

La forma de las briquetas varía enormemente (Figuras 1 y 2) pudiendo ser cilíndricas, prisma cuadrangular, con o sin orificio.



Figura 1. Formas de briquetas revisada 11 de septiembre de 2019.

Fuente: <https://www.fueguing.com/donde-comprar-briquetas/>

6.4.2. Diámetro, longitud y densidad.

El diámetro y la longitud estarán dados por las dimensiones del equipo utilizado para su elaboración. El cálculo de la densidad es el resultado de la masa de la briqueta dividida por su volumen, esta es mayor que otros BCS, es un factor característico; optimiza el almacenamiento y transporte (Carrillo *et al.* 2016). Una alta densidad dependerá de la materia prima y de su grado de compacidad a mayor compacidad menor su porosidad disminuyendo los espacios de aire entre partículas (Bamgboye y Bolufami, 2009).

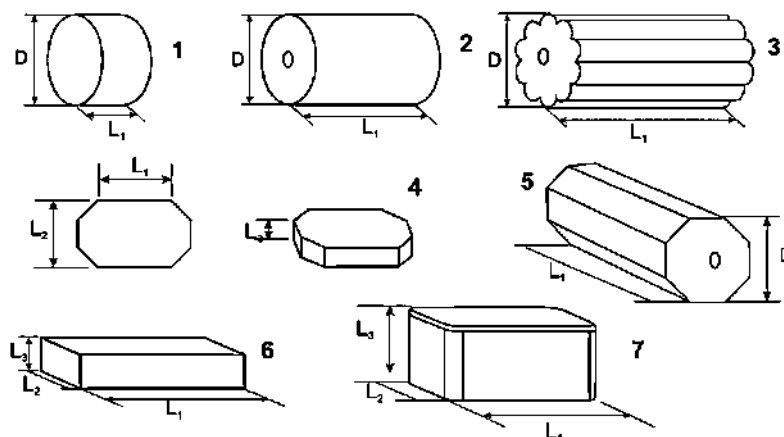


Figura 2. Formas de las briquetas.

Fuente: (UNE 17225-3, 2014)

6.4.3. Humedad.

El agua actúa como aglomerante y como lubricante entre las partículas durante la compactación, en cantidades adecuadas ayudan a las fuerzas de Van der Waals aumentando el área de contacto de las partículas, la falta de esta durante la densificación puede causar corrosión (Carrillo *et al.* 2016).

El contenido de humedad en la elaboración de briquetas oscila entre del 8-12% sin embargo, el límite de humedad en la mayoría de los casos puede ser de hasta 15%, algunos materiales con un contenido de humedad de hasta 20% pueden densificarse esto dependerá del equipo utilizado para su elaboración. Cabe señalar que el contenido de humedad por encima del 10% puede conducir un exceso de producción de vapor que puede provocar una explosión de vapor. Los materiales tampoco deben estar demasiado secos porque, para el material más seco, habrá mayor fricción que puede aumentar las demandas de energía (Bamgboye y Bolufawi, 2009).

6.4.4. Expansión volumétrica.

Se espera debido a la expansión en volumen que tiene lugar después de la densificación, lo que aumentará el volumen de los materiales. El aumento de volumen con masa fija en última instancia dará como resultado una reducción en la densidad. La briqueta que se expande más después de la briqueteación tendrá la densidad menos relajada y viceversa. Una tendencia general de aumento en la densidad es la presión manejada a diferentes tamaños de partícula, esto podría deberse a la posible compacidad del material, a medida que aumenta la presión y a la reducción de la recuperación elástica durante la relajación de la briqueta formada (Bamgboye y Bolufawi, 2009).

6.4.5. Materia Volátil.

El material volátil son desprendimientos gaseosos de la materia orgánica durante el calentamiento relacionada con su inflamabilidad de la materia orgánica; están constituidas por hidrógeno, dióxido de carbono, monóxido de carbono, sulfuros de hidrógeno, metano, amoníaco, benceno, naftaleno, tolueno y vapores alquitranes (Gallipoliti *et al.* 2012).

6.4.6. Cenizas

Las cenizas, si la combustión ha sido completa, son exclusivamente inorgánicas. Su conocimiento es importante ya que forma depósito en las paredes de los hornos. El porcentaje de cenizas indica la cantidad de materia sólida no combustible por kilogramo de material. Las cenizas reducen el poder calorífico del combustible y el rendimiento térmico de un horno por interferir en la transferencia de calor (Gallipoliti *et al.* 2012). Un alto contenido de cenizas ocurre cuando las briquetas son elaboradas con corteza esta puede exceder hasta cinco veces el porcentaje de cenizas (González, 2013).

6.4.7. Carbono fijo.

El carbono fijo es la parte que no es volátil y que se quema en estado sólido. Se encuentra en el residuo de coque que queda en el crisol luego de determinar la materia volátil. Si a este residuo se le restan las cenizas se obtiene el carbono fijo, por lo que generalmente el porcentaje de carbono fijo no se obtiene pesando el residuo, sino por diferencia una vez conocidas la humedad, las cenizas y el material volátil. Es importante para calcular la eficiencia en equipos de combustión (Gallipoliti *et at.* 2012).

Los análisis inmediatos son ensayos rápidos que permiten predecir el comportamiento de un combustible en ciertos casos. Se trata de una separación de los compuestos en función de sus diferentes volatilidades, peso de las fracciones de ceniza y carbono fijo (Gallipoliti *et al.* 2012).

6.4.8. Poder calorífico superior.

El poder calorífico o poder de combustión se usa comúnmente como criterio básico para la comparación de combustibles, es la cantidad de calor que entrega un kilogramo de combustible al oxidarse en forma completa. Se espera que el PC varíe entre varias especies de árboles y en cierta medida dentro de las especies. La celulosa tiene un valor de calentamiento menor que la lignina debido a su mayor grado de oxidación. Los contenidos elementales de hidrógeno y carbono del combustible y los grados más bajos de oxidación tienden a aumentar el valor de calentamiento de la biomasa. Las especies de madera blanda generalmente tienen un mayor contenido de carbono y valores de calentamiento más altos que las especies de madera dura debido a la presencia de más lignina y materiales resinosos en las especies de madera blanda. La presencia de extractos en la madera aumenta los valores de calentamiento de los combustibles de madera. El valor calorífico de los combustibles de madera disminuye al aumentar el CH, Los valores caloríficos para la mayoría de los materiales leñosos están entre 17 y 19 MJ / kg (Mitchual, 2014).

6.4.9. Microanálisis de ceniza.

Los elementos inorgánicos pueden generar un impacto negativo debido a que las partículas pueden dispersarse y adherirse al interior de los intercambiadores de calor y plantas de generación de energía por combustión directa lo que puede obstruir el canal de gases de combustión e inducir a la corrosión del metal, en hornos reactores turbinas y dispositivos de control de emisiones por lo que es esencial conocer las concentraciones de los elementos de formación de ceniza como Ca, K, Mg, Si, Al, Fe, P, S, Na, Ti y Cl (Correa, 2013).

6.4.10. Análisis elemental.

Son los métodos instrumentales para el análisis de carbono, hidrógeno, nitrógeno y azufre están ahora muy extendidos y su uso es habitual, y frecuentemente preferible a métodos químicos desarrollados anteriormente sobre los que existen normas internacionales. La determinación fiable del carbono hidrógeno, nitrógeno y azufre es importante para el control

de calidad y los resultados se pueden usar como parámetros de entrada para los cálculos aplicados a la combustión de los BCS. La importancia medioambiental del contenido de nitrógeno está ligada a la emisión de NO_x (formación de NO_x combustible).

El contenido de hidrógeno es importante para el cálculo del poder calorífico neto. El contenido de carbono se necesita para la determinación de las emisiones de CO_2 (UNE 16948, 2015). El azufre y el cloro están presentes en los BCS en concentraciones variables. Durante el proceso de combustión por lo general se convierten en óxidos de azufre y cloruros la presencia de estos elementos y sus productos de reacción pueden contribuir significativamente a la corrección y a las emisiones perjudiciales para el medio ambiente. (UNE 16994, 2017).

6.4.11. Propiedades mecánicas.

En las briquetas, se refiere a la capacidad de esta para resistir el manejo mecánico. Es más probable que los materiales con mayor densidad tengan un estrés final más alto que aquellos con menor densidad (Jamradloedluk y Wiriyaumpaiwong, 2007).

La durabilidad de las briquetas es probablemente el criterio más importante para evaluar la calidad de la biomasa densificada, estas pruebas están destinadas a evaluar la capacidad de las unidades densificadas para comprender los rigores del manejo de manera que mantengan su masa, forma e integridad (Al-Widyan *et al.* 2002). La resistencia a la compresión, el índice de resistencia al impacto, la resistencia a la tracción y la dureza son algunas de las propiedades mecánicas relevantes para la durabilidad de las briquetas (Mitchual, 2014a).

6.4.12. Fuerza de compresión.

En la caracterización de briquetas es más relevante la compresión perpendicular debido que la axial es apenas percibida, aunque esta, es muy inferior a la de la dirección paralela. Sus valores característicos varían entre 4.3 y 5.7 N/mm. Cuanto mayor es la presión de compactación, mayor es la fuerza de compresión de las briquetas producidas. Un índice razonablemente adecuado para su manipulación 1.96 N/mm (Rahman *et al.* 1989, citado por Mitchual, 2014).

6.4.13. Índice de resistencia al impacto.

La friabilidad es una propiedad física cuyo comportamiento se ve influenciado por diferentes propiedades o características, entre ellas: el contenido de agua, la estabilidad de los agregados

(aglutinantes), la densidad aparente y la porosidad (Ávila, 2017). La friabilidad favorece la combustión y procesos como la molienda, pero puede ocasionar problemas en las etapas de transporte y manipulación por la pérdida de material (Carrillo *et al.* 2016).

6.5. Calidad de las briquetas.

La densificación de la biomasa de madera en un biocombustible nos requiere estándares para definir la calidad de producción; establecerlos puede contribuir a simplificar oferta de biocombustibles, su conversión en energía, establecer biocombustibles en el mercado, y alcanzar una comprensión económica del precio del combustible además, la estandarización puede garantizar que cada combustible cumple con las demandas de combustión y, por lo tanto, garantías (De la Biomasa a la Energía Renovable: Dendroenergía en Argentina FAO, 2015-2019).

6.5.1 Normas técnicas Europeas para la evaluación de la calidad de las briquetas.

En la Tabla 3 se muestra la clasificación de briquetas aceptadas por la UNE, cada parámetro e indicador de calidad monitoreado se describe con precisión, con un procedimiento para su identificación; si una briqueta cae dentro de estos límites, puede considerarse de buena calidad, sin embargo, este límite de calidad es válido sólo en casos donde el biocombustible sólido satisface todos los demás indicadores de calidad monitoreados (mecánicos y químicos térmicos) (UNE 17225-3, 2014).

Tabla 3. Descripción detallada de la calidad de las briquetas (UNE 17225-3, 2014).

	Clase de prioridad/ Método de análisis	Unidades	A		B ^a
			1	2	
Normativo	Origen y fuente, EN 17225-1		1.1.3 Fuste 1.2.1 Residuos de madera no tratada químicamente b	1,1, 1 Árboles enteros sin raíces 1.1.3 Fuste 1.1.4 Restos de corta 1.2.1 Residuos de madera no tratada químicamente b	1.1 Bosque, plantaciones y otra maderas virgen 1.2 Subproductos y residuos de la industria del proceso de la madera 1.3.1 Madera usada no tratada químicamente
	Diámetro (D) o longitud (L1), anchura (L2) y altura (L3) Según la figura 2	mm	A declarar el diámetro la anchura y la longitud	A declarar el diámetro la anchura y la longitud	A declarar el diámetro la anchura y la longitud
		Shape	Especificado según la figura 2 por ejemplo 1 o 2, etc.	Especificado según la figura 2 por ejemplo 1 o 2, etc.	Especificado según la figura 2 por ejemplo 1 o 2, etc.
	Humedad, M ISO 18134-1, ISO 18134-2	% (m/m) según se recibe	M12 ≤ 12	M15 ≤ 15	M15 ≤ 15
	Cenizas, A, ISO 18122	% (m/m) en base seca	A1.0 ≤ 1,0	A15 ≤ 1,5	A3.0 ≤ 3,0
	Densidad de partícula, DE, ISO 18122	g/ cm ³ según se recibe	DE1.0 ≥ 1,0	DE0.9 ≥ 0,9	DE0.9 ≥ 0,9
	Aditivos ^c	% (m/m) según se recibe	≤ 2 A declarar tipo y cantidad	≤ 2 A declarar tipo y cantidad	≤ 2 A declarar tipo y cantidad
	Poder calorífico neto, Q ^d , ISO 18125	MJ/Kg o kWh/kg según se recibe	Q15.5 ≥ 15,5 o Q4.3 ≥ 4,3	Q15.3 ≥ 15,3 o Q4.25 ≥ 4,25	Q45.9 ≥ 14,9 o Q4.15 ≥ 14,15
	Nitrogeno, N, ISO 16948	% (m/m) en base seca	N0.3 ≤ 0,3	N0.5 ≤ 0,5	N1.0 ≥ 1,0
	Azufre, S, ISO 16994	% (m/m) en base seca	S0.04 ≤ 0,04	S0.04 ≤ 0,04	S0.05 ≤ 0,05
	Cloro, Cl, ISO 16994	% (m/m) en base seca	Cl0.02 ≤ 0,02	Cl0.02 ≤ 0,02	Cl0.03 ≤ 0,03
	Arsenico, As, ISO 16968	mg/kg en base seca	≤ 1	≤ 1	≤ 1
	Cadmio, Cd, ISO 16968	mg/kg en base seca	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,5
	Cromo, Cr, ISO 16968	mg/kg en base seca	≤ 10	≤ 10	≤ 10
	Cobre, Cu, ISO 16968	mg/kg en base seca	≤ 10	≤ 10	≤ 10
	Plomo, Pb, ISO 16968	mg/kg en base seca	≤ 10	≤ 10	≤ 10
	Mercurio, Hg, ISO 16968	mg/kg en base seca	≤ 1,0	≤ 1,0	≤ 1,0
	Niquel, Ni, ISO 16968	mg/kg en base seca	≤ 10	≤ 10	≤ 10
	Zinc, Zn, ISO 16968	mg/kg en base seca	≤ 100	≤ 100	≤ 100
Informativo	Área superficial de las briquetas, incluyendo la superficie d los agujeros, si hubiera	cm ² / kg	Se debería declarar	Se debería declarar	Se debería declarar

^a La clase B no se recomienda para homós de panadería.

^b Niveles insignificantes de pegamento, grasa y otros aditivos de la producción de la madera utilizados en los aserraderos durante la producción de madera y productos de madera derivados de la madera virgen son aceptados, si todos los parámetros químicos de las briquetas se encuentran claramente dentro de los límites y/o las concentraciones son demasiado pequeñas como para ser preocupantes.

^c Tipo de aditivos para ayudar a la producción, entrega o combustión (por ejemplo, coadyuvantes a la presión, inhibidores de la escoria o cualquier otro aditivo como almidón, harina de maíz, harina de patatas, aceite vegetal o lignina).

^d Véase el anexo D de la norma ISO 17225-1 para el cálculo de poder calorífico neto según se recibe.

6.6. Balance Nacional de energía 2018.

6.6.1. Contexto Energético Mundial.

(Rodríguez *et al.* 2018)

De acuerdo con cifras del “World Energy Balances”, de la Agencia Internacional de Energía, la producción mundial de energía primaria en 2016 disminuyó 0.3% respecto al año anterior, alcanzando 13,760.817 millones de toneladas equivalentes de petróleo (MMtep) (Figura 3). Los países con mayor participación fueron: China, Estados Unidos, Rusia, Arabia Saudita e India, con 17.2%, 13.9%, 10.0%, 4.9% y 4.1%, respectivamente, mientras que México se colocó en el decimosexto puesto con 1.3% de la energía que se produce en el mundo. El esfuerzo colectivo de las naciones por disminuir las emisiones y promover la sostenibilidad del sector energético provocó que la producción de energía renovables incrementara 3.6%, mientras que la del carbón disminuyó 5.9% respecto a 2015.

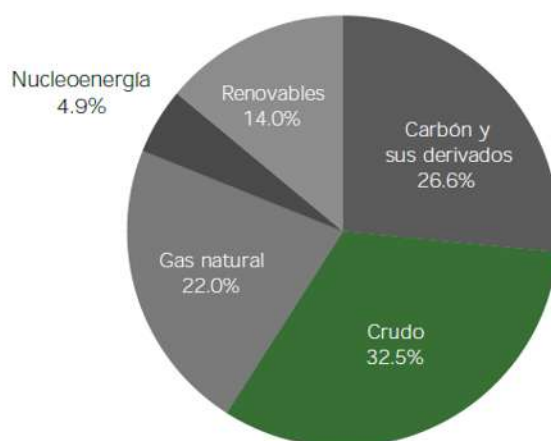


Figura 3. Producción mundial de energía primaria, 2016.

Fuente: World Energy Balances, IEA, edición 2018.

6.6.2. Indicadores Nacionales

Al cierre del año 2017, México presentó un índice de independencia energética equivalente a 0.76 (Figura 4). Es decir, se produjo 24.0% menos energía de la que se puso a disposición para las diversas actividades de consumo dentro del territorio nacional. Durante los últimos diez años, este indicador ha disminuido en promedio 5.0%. La independencia energética es el índice utilizado a nivel internacional para medir, de forma general, el grado en que un país puede cubrir su consumo de energía derivado de su producción; si este es mayor a uno, se considera que el país es independiente energéticamente. El 2017 es el tercer año consecutivo

en que México muestra dependencia de las importaciones de energía para satisfacer su demanda energética.



Figura 4. Índice de independencia energética

Fuente: Sistema de Información Energética, SENER.

World Energy Balances, IEA, edición 2018.

6.6.3. Producción de energía primaria.

A lo largo de los últimos once años la tasa de crecimiento de la producción de energía en México ha promediado 3.3% de disminución cada año (Figura 5); sin embargo, durante 2017 se presentó la depreciación más baja de este componente al cerrar el periodo con 7,027.22 PJ, 8.9% por debajo del año anterior.

El gran potencial que tiene México para el desarrollo de centrales fotovoltaicas y generación distribuida permitió que la producción de energía a través de este recurso incrementara 36.7% respecto al año anterior. En relación con los bioenergéticos; la producción de biogás mostró un incremento del 31.94%, lo que se tradujo en 2.52 PJ, mientras que la biomasa, que se integra por el bagazo de caña (31.8%) y leña (68.2%), pasó de 361.7 PJ en 2016 a 367.18 PJ en 2017, 1.5% por encima del año anterior.

	2016	2017	Variación porcentual (%) 2017/2016	Estructura porcentual (%) 2017
Total	7,714.13	7,027.22	-8.90	100
Carbón	254.17	308.24	21.28	4.39
Hidrocarburos	6,694.85	5,940.60	-11.27	84.54
Petróleo crudo	4,826.85	4,354.89	-9.78	61.97
Condensados	88.31	67.28	-23.81	0.96
Gas natural	1,779.68	1,518.43	-14.68	21.61
Nucleoenergía	109.95	113.22	2.97	1.61
Renovables ¹	655.16	665.16	1.53	9.47
Hidroenergía	110.51	114.65	3.75	1.63
Geoenergía	132.59	127.43	-3.90	1.81
Solar	11.09	15.16	36.68	0.22
Energía eólica	37.36	38.23	2.33	0.54
Biogás	1.91	2.52	31.94	0.04
Biomasa	361.70	367.18	1.52	5.23
Bagazo de caña	110.14	116.87	6.11	1.66
Leña	251.56	250.31	-0.50	3.56

Figura 5. Producción de energía primaria (petajoules).

Fuente: Sistema de Información Energética 2018.

World Energy Balances, IEA, edición 2018.

La agencia internacional de energía lleva acabo diversos estudios y proyectos en el campo de la biomasa a través de su división IEA Bioenergy y cifra en un 10 % de la energía primaria mundial procedente de los recursos asociados a esta fuente, incluidos los relacionados a los biocombustibles líquidos y biogás.

Según los datos del Fondo de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura FAO “algunos países pobres obtienen el 90 % de su energía de la leña y otros biocombustibles”. Pero en muchas ocasiones, esta utilización masiva no se realiza mediante un uso racional y sostenible de los recursos, sino como una búsqueda desesperada de energía que provoca la deforestación de grandes áreas, dejando indefenso al suelo frente a la erosión. La propia FAO reconoce que “la mejora del uso eficiente de los recursos de la energía de la biomasa incluidos los residuos agrícolas y las plantaciones de materiales energéticos ofrece oportunidades de empleo, beneficios ambientales y una mejor infraestructura rural” (Fernández, 2004).

7.-METODOLOGÍA

7.1. Trabajo de campo.

Los residuos lignocelulósicos se recolectaron de diferentes estados de la república siendo diecinueve muestras de *Pinus* spp; dos muestras de *Quercus* spp. y otras siete muestras de especies de latifoliadas en los estados de Quintana Roo, Chihuahua, Durango, Michoacán, Oaxaca, Nuevo León, y Sonora (Figura 6). Para cada caso, se tomó aproximadamente 50 kg de material generado en el proceso de transformación de la madera o maderas que se procesaban al momento de la colecta, obteniendo 28 muestras de diferentes lugares siendo aserraderos, mueblerías y carpinterías. Las briquetas se etiquetaron por número del 1 al 28: 1-6 Quintana Roo; 7-10 Chihuahua; 11-15 Michoacán; 16-23 Durango; 24-26 Oaxaca; 27 Nuevo León; 28 Sonora (Tabla 4) (Tabla 5).

Tabla 4. Muestras, nombre y procedencia.

Muestra	Nombre y procedencia
1	<i>Swartzia cubensis</i> , Quintana Roo.
2	<i>Lysiloma latisiliquum</i> , Quintana Roo.
3	<i>Caesalpinia platyloba</i> , Quintana Roo.
4	<i>Manilkara zapota</i> , Quintana Roo.
5	<i>Swartzia cubensis</i> , Quintana Roo.
6	<i>Swietenia macrophylla</i> , Quintana Roo.
7	<i>Pinus</i> spp. Chihuahua.
8	<i>Pinus</i> spp. Chihuahua.
9	<i>Pinus</i> spp. Chihuahua.
10	<i>Pinus</i> spp. Chihuahua.
11	<i>Pinus</i> spp. Michoacán.
12	<i>Pinus</i> spp. Michoacán.
13	<i>Pinus</i> spp. Michoacán.
14	<i>Pinus</i> spp. Michoacán.

Tabla 5. Muestras, nombre y procedencia.

Muestra	Nombre y procedencia
15	<i>Pinus</i> spp. Michoacán.
16	<i>Pinus</i> spp. Durango.
17	<i>Pinus</i> spp. Durango.
18	<i>Pinus</i> spp. Durango.
19	<i>Quercus</i> spp. Durango.
20	<i>Pinus</i> spp. Durango.
21	<i>Pinus</i> spp. Durango.
22	<i>Quercus</i> spp. Durango.
23	<i>Pinus</i> spp. Durango.
24	<i>Pinus</i> spp. Oaxaca.
25	<i>Pinus</i> spp. Oaxaca.
26	<i>Pinus</i> spp. Oaxaca.
27	<i>Pinus</i> spp. Nuevo León.
28	<i>Olneya tesota</i> . Sonora.



Figura 6. Muestras recolectadas.

De dicho material se tomaron muestras para determinar la humedad inicial por el método de deshidratación en horno de secado a 105 °C (UNE-EN 14774-2, 2010). La humedad de los biocombustibles sólidos se expresa en base húmeda según la ecuación:

$$M (\%) = [(Ph - Ps) / Ph] * 100$$

7.2. Trabajo de laboratorio

7.2.1. Elaboración de briquetas.

En la elaboración de los materiales densificados se utilizó una briqueteadora de laboratorio marca Lippel de pistón hidráulico (Figura 7, 8 y 9). La biomasa se acondicionó en estufa de secado a 40 °C durante 24 h para tener un contenido de humedad entre el 7 – 9 %. Las dimensiones promedio de las briquetas son de 30 mm de diámetro por la medida del dado de la máquina y 40 mm de longitud y una masa de 40 g. Se elaboraron a una temperatura de 50°C, a una presión de 200 bar y un tiempo de prensado de 5 min. Se elaboraron 10 briquetas para cada tipo de muestra. Las briquetas se acondicionaron a 20 °C y 50 % de humedad relativa por siete días antes de las pruebas.



Figura 7. Briqueteadora marca Lippel.



Figura 8. Dado briqueteadora.



Figura 9. Elaboración de briquetas.

7.3 Evaluación física y química de las briquetas.

7.3.1. Humedad

El contenido de humedad de la briqueta se realizó bajo la norma UNE-EN 14774-2 (2010). Se determinó el porcentaje de dicho material tomando un 1 g de muestras por el método de deshidratación en horno de secado a 105 +/- °C (Figura 10 y 11). La humedad de los biocombustibles sólidos se expresa en base húmeda según la ecuación

$$M (\%) = [(Ph - Ps) / Ph] * 100$$



Figura 10. Muestras en la estufa.



Figura 11. Muestras en el desecador.

7.3.2. Densidad

Para determinar la densidad de las briquetas se realizaron ensayos de laboratorio, en los que se evaluó su masa (en una balanza) longitud y diámetro (con un vernier) y su volumen (cálculos geométricos) para obtener la densidad aproximada (Figura 12).

Utilizando la siguiente fórmula:

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Donde:

d = densidad de la briketa (kg/m³);

m = masa de la briketa (kg);

v = volumen de la briketa (m³).



Figura 12. Diferencia de la misma muestra de briquetas antes y después del acondicionamiento.

7.3.3. Fuerza de compresión perpendicular.

La fuerza de compresión perpendicular en las briquetas se determinó utilizando una máquina de ensayos mecánicos marca Instron de prueba de resistencia con una capacidad de celda de carga de 300 kN (Figura 13). La velocidad de la cruceta fue de 0.305 mm/min. Se colocó la briketa a probar horizontalmente en el dispositivo de prueba de compresión, realizando el

ensayo (Figura 13, 14, 15 y 16). La carga se aplicó a una velocidad constante hasta que la briqueta falló por agrietamiento. La fuerza de compresión en la briqueta se calculó de la siguiente manera (Mitchual *et al.* 2013c):

$$\text{F. de compresión (N/mm): } \frac{3 \text{ (Fuerza al punto de fractura (N))}}{... \cdot [L_1 \text{ (mm)} + L_2 \text{ (mm)} + L_3 \text{ (mm)}]}$$

Donde:

3 = Constante;

F= Fuerza al punto de fractura (N)

L_{1, 2, 3} = Longitud en tres puntos de la briqueta.



Figura 13 Máquina universal Instron.



Figura 14 Ajuste de cruceta



Figura 15 Ejecución del ensayo.



Figura 16 Briquetas después del ensayo.

7.3.4. Índice de resistencia al impacto

El índice de resistencia al impacto (IRI) de las briquetas producidas se determinó de acuerdo con ASTM D440-68 (2007), usando la caída de prueba de rotura de carbón. Se utilizaron dos caídas como estándar, el número de caídas (N) en la ecuación es siempre 2, por esta razón el valor máximo de IRI es 200 %. Las briquetas se dejaron caer libremente desde una altura vertical de 2 m sobre un piso de concreto. Después de dos caídas las piezas rotas de las briquetas se recogieron y fueron pesadas utilizando una balanza electrónica con una precisión de 0.01 g. Al golpear el concreto las briquetas se rompen en piezas de varios tamaños que van desde grandes piezas hasta partículas. Cuando se contó el número de piezas en la prueba, las piezas pequeñas que pesaban menos del 5% del peso inicial del registro no se incluyeron en el cálculo. El índice de resistencia al impacto se calculó de la siguiente manera (Mitchual *et al.* 2013c):

$$\text{IRI (\%)} = \frac{N}{n} \times 100$$

Donde:

IRI: índice de resistencia al impacto %

N: Número de veces que es lanzada la briqueta (2).

n= número de piezas que pesa más del 5% de la masa inicial.

7.3.5. Expansión volumétrica

La expansión volumétrica de las briquetas se calculó a partir de la medición de altura y el diámetro de 3 briquetas con un vernier electrónico realizado el cálculo de volumen en dos momentos diferentes: inmediatamente después de la briqueteación y 7 días después de acondicionamiento en una cámara climática con 50% humedad relativa y 20° C para una estabilización dimensional. La expansión volumétrica se calculó por la ecuación (Protásio *et al.* 2011):

$$\text{Expansión volumétrica \%} = [(Vol_2 - Vol_1) / Vol_1] \times 100$$

Donde:

Vol₁: volumen de la briketa inmediatamente después de la compactación (cm³);

Vol₂: volumen de la briketa transcurrido cierto tiempo después de la compactación (cm³).

7.3.6. Poder calorífico superior

El poder calorífico (PC) en las briquetas se determinó con la norma UNE-EN 14918 (2011). Se midió con precisión el calor generado después de la combustión de la muestra en un ambiente controlado. El calor desprendido es proporcional al poder calorífico de la briketa. La muestra se realizó en el calorímetro LECO AC600, el instrumento se calibro con 1 g de ácido benzoico. Se pesó 0.100 g de muestras anhidras (Figura 18, 19 y 20) se colocó el hilo que iniciaría la combustión, el Vessel se llenó de oxígeno (Figura 21 y 22) ejecutando el ensayo (Figura 23 y 24). En el dispositivo la celda de reacción y la bomba están inmersas en una estructura denominada chaqueta. En este caso, la denominada chaqueta consiste de agua, mantenida a temperatura constante. La temperatura de la celda y la bomba se elevan a medida que se libera calor durante el proceso de combustión; pero la temperatura de la chaqueta de agua se mantiene a una temperatura fija de 15° C un microprocesador controla la temperatura de la celda y la chaqueta, haciendo las correcciones necesarias del calor de fuga que resulta de las diferencias entre las dos temperaturas.



Figura 17. Muestras de tres partes de las briquetas.



Figura 18. Muestras en el horno a 105° C.



Figura 19. Peso de la briqueta.



Figura 20. Colocación del hilo de celulosa.



Figura 21. Llenado de oxígeno.



Figura 22. Colocación del Vessel.



Figura 23. Realizando ensayo.

7.3.7. Cenizas

Las cenizas se obtuvieron mediante la norma UNE-EN 14775 (2010), se pesó una cantidad de biomasa de 1g y se calentó a 550 ° C hasta la calcinación completa de fracción orgánica. El residuo restante es la fracción mineral (cenizas) el porcentaje de cenizas se obtuvo con la siguiente fórmula:

$$A_d = \frac{(m_3 - m_1)}{(m_2 - m_1)} \times 100 \times \frac{100}{100 - M_{ad}}$$

Donde;

m_1 = es la masa en gramos, del plato vacío;

m_2 = es la masa en gramos, del plato más la porción del ensayo;

m_3 = es la masa en gramos, del plato más la ceniza;

M_{ad} = es el contenido de humedad en porcentaje de la poción de ensayo usada para la determinación.

7.3.8. Material volátil y carbono fijo

Los volátiles son la fracción que se desprende en forma de vapor y gases al calentar el combustible en ausencia de aire hasta la temperatura de combustión, se pesó una masa de 1g de briqueta y se colocó en un crisol de níquel la muestra se calentó a 900° C durante 7 minutos exactos, mediante la norma UNE 18123 (2016) (Figura 25 y 26). El porcentaje de volátiles se calculó mediante la fórmula:

$$A = [(W_o - W)/W_i]$$

A= Pérdida de peso;

W_o = peso inicial de la muestra más el crisol;

W = peso del crisol más residuo *después* de los 7 minutos;

W_i = peso de la muestra antes de introducirla a 900° C.

$$MV = A - \% \text{ Humedad de la muestra}$$



Figura 24. Crisoles dentro de la mufla.



Figura 25. Material volátil a 900 °C.

El carbono fijo (CF) es la fracción sólida (restando la fracción mineral) que se forma al calentar el combustible en ausencia de aire hasta temperatura de combustión. Este valor se calcula numéricamente a partir de los valores experimentales de fracción de volátil, cenizas y contenido de humedad, la suma de estas cuatro fracciones suma el 100 % de la muestra en base húmeda.

$$(CF \%) + (MV \%) + (CENIZAS \%) = 100\%$$

7.4. Análisis estadístico

Con la finalidad de comparar los resultados obtenidos, se aplicó un análisis de varianza a 95% de confianza estadística y los valores medios se compararon mediante la prueba de rangos múltiples con el método LSD (Gutiérrez y de la Vara 2004). Los resultados se analizaron mediante el programa Statgraphics Centurion.

8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

8.1. Humedad.

En la metodología se mencionó que el material lignocelulósico se recolectó de diferentes procedencias en siete estados del país. La humedad inicial de la biomasa recolectada varió de 6.70 a 75.21%. Esta variación se debe a que en los lugares de colecta en ocasiones se trataba de material ya almacenado y en otras, justo se estaba procesando madera verde o recién aserrada. Todas las muestras se dejaron secar al aire libre para posteriormente elaborar las briquetas.

El resultado de la humedad de las briquetas presentó diferencias estadísticas significativas con un valor cero de P , como se aprecia en el análisis de varianza (Tabla 6). El comportamiento de la humedad de cada material se aprecia gráficamente en la Figura 27, y los grupos homogéneos, cuyos resultados variaron de 3.45 a 8.80%, se observan en la prueba de rangos múltiples (Tabla 7). Estos valores de humedad aquí obtenidos son bajos en comparación con los resultados de Gallipoliti *et al.* (2012), quienes en briquetas elaboradas con restos de aserrín de pino blanco más un aglomerante de harina de mandioca reportan 12.30%. Por su parte, Sánchez *et al.* (2014) desarrollaron briquetas a partir de los residuos de madera principalmente del aserrín y reportan 10% de humedad, igual que Ordoñez (2015) quienes elaboraron briquetas con aserrín de pino blanco, reciclado de carbón activado y almidón de yuca. El % de humedad obtenido tiene gran importancia en la elaboración de la briketa, este ayuda a disminuir la fricción entre partículas y mejora la compactación los resultados obtenidos en esta investigación están dentro de los límites aceptados en las normas UNE.

Tabla 6. Análisis de varianza para la humedad de las briquetas (%).

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	82.0048	27	3.03722	17.59	0.0000
Intra grupos	4.835	28	0.172679		
Total (Corr.)	86.8398	55			

Medias y 95.0% de Fisher LSD

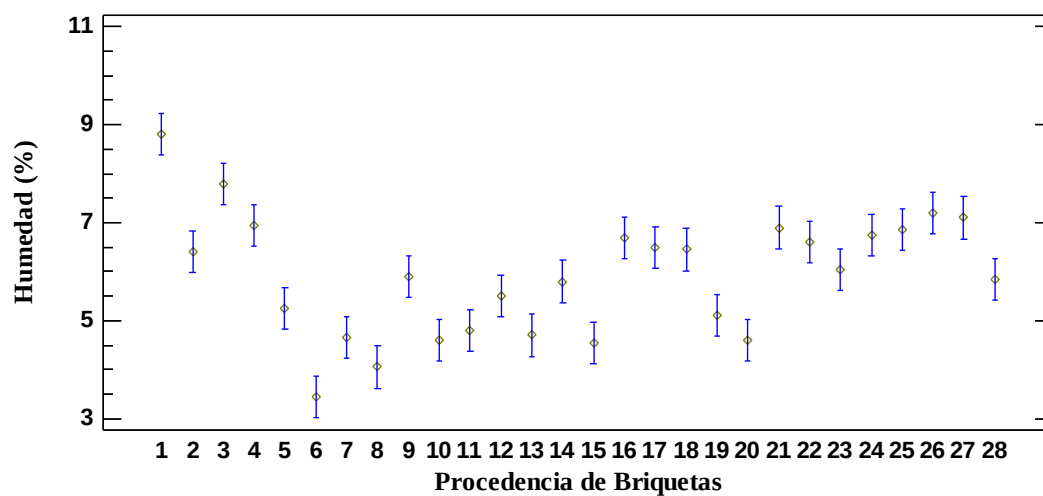


Figura 26. Gráfico de medias para la Humedad de las diferentes briquetas (%).

Tabla 7. Pruebas de Múltiple Rangos para la Humedad de las briquetas.

(Método: 95.0 porcentaje LSD)

	Casos	Media	Grupos Homogéneos
6	2	3.45	X
8	2	4.05	XX
15	2	4.55	XX
10	2	4.6	XX
20	2	4.6	XX
7	2	4.65	XXX
13	2	4.7	XXX
11	2	4.8	XXX
19	2	5.1	XXX
5	2	5.25	XXXX
12	2	5.5	XXX
14	2	5.8	XXX
28	2	5.85	XXXX
9	2	5.9	XXXXX
23	2	6.05	XXXXX
2	2	6.4	XXXXX
18	2	6.45	XXXXX
17	2	6.5	XXXXX
22	2	6.6	XXXXX
16	2	6.7	XXXX
24	2	6.75	XXXX
25	2	6.85	XX
21	2	6.9	XX
4	2	6.95	XX
27	2	7.1	XX
26	2	7.2	XX
3	2	7.8	X
1	2	8.8	X

8.2. Densidad.

La densidad inicial de las briquetas presenta diferencias estadísticas como se observa en la Tabla 8 y gráficamente en la Figura 28. Los valores de densidad variaron de 1049.44 a 1208.85 k/m^3 , como se aprecia en la prueba de rangos múltiples (Tabla 9). Esta variación en la densidad de las briquetas se debe a la diversidad de la madera usada, o bien, recolectada; así como el tamaño de partícula de la biomasa. La menor densidad corresponde al estado Michoacán siendo *Pinus* spp. la briketa, y la de mayor densidad fue la briketa *Olneya tesota* obtenida del estado de Sonora. Se ha informado anteriormente de que briquetas hechas de prensa de pistón hidráulico son por lo general menos de 1.000 kg/m^3 los valores obtenidos superan este dato. Ordóñez *et al.* (2015) presentan un enlistado de las densidades de las maderas mexicanas donde se muestra *Olneya tesota* con una densidad de 0.70 g/cm^3 siendo superior la densidad obtenida por la briketa. El estudio bibliográfico muestra un promedio de madera de Bosque de *Quercus* con mínimo 0.40 g/cm^3 y máxima 0.95 g/cm^3 densidad. Las briquetas de *Quercus* obtenidas de la muestra 19 y 22 sobrepasan el rango máximo de la densidad de la madera (Tabla 10). Mitchual (2014b) reportó las densidades de especies tropicales con un valor bajo de 409.22 kg/m^3 *Ceiba pentandra* a un valor alto de 764.11 k/m^3 para *Celtis mildbreadii*. Las briquetas tropicales obtenidas de Quintana Roo presentan un mínimo de 1075.56 k/m^3 y un máximo 1135.7 k/m^3 . El aumento de la densidad conduce a la reducción del tamaño de la briketa y a una tasa de combustión mejorada. Rajaseenivasa *et al.* (2016) demostraron que biomasa de aserrín a una presión de 200 bar, alcanza una densidad de 1500 k/m^3 y con presionen de 330 bar supera los 1300 k/m^3 .

Tabla 8. Análisis de varianza para la Densidad Inicial de las briquetas (kg/m^3).

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	246347.	27	9123.95	5.12	0.0000
Intra grupos	449009.	252	1781.78		
Total (Corr.)	695355.	279			

Medias y 95.0% de Fisher LSD

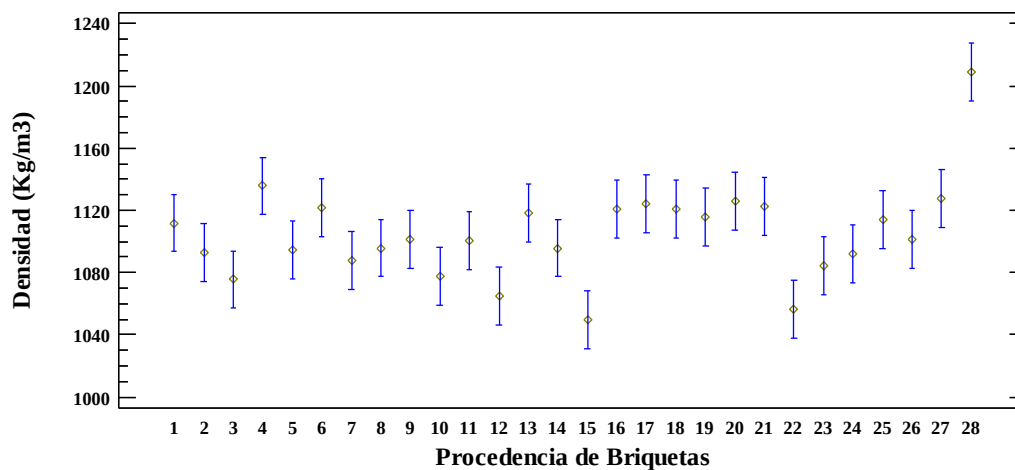


Figura 27. Gráfico de medias para la Densidad inicial de las diferentes briquetas (k/m³).

Tabla 9. Pruebas de Múltiple Rangos para la Densidad de las briquetas.

(Método: 95.0 porcentaje LSD)

	Casos	Media	Grupos Homogéneos
15	10	1049.44	X
22	10	1056.27	XX
12	10	1064.8	XXX
3	10	1075.56	XXXX
10	10	1077.55	XXXXX
23	10	1084.3	XXXXXX
7	10	1087.74	XXXXXXX
24	10	1091.76	XXXXXXXX
2	10	1092.6	XXXXXXXX
5	10	1094.45	XXXXXXXX
8	10	1095.82	XXXXXXXX
14	10	1095.82	XXXXXXXX
11	10	1100.41	XXXXXXXX
9	10	1101.38	XXXXXXXX
26	10	1101.48	XXXXXXXX
1	10	1111.91	XXXXXXXX
25	10	1113.93	XXXXXX
19	10	1115.94	XXXXX
13	10	1118.35	XXXXX
16	10	1120.69	XXXXX
18	10	1120.84	XXXXX
6	10	1121.41	XXXXX
21	10	1122.41	XXX
17	10	1124.51	XXX
20	10	1125.64	XX
27	10	1127.95	XX
4	10	1135.7	X
28	10	1208.85	X

8.3. Fuerza de compresión perpendicular.

La fuerza de compresión de las briquetas es uno de los índices utilizados para evaluar su capacidad de ser manipulado, embalado y transportado sin romperse. La fuerza de compresión tuvo diferencias estadísticas significativas con un valor cero de P , como se aprecia en el análisis de varianza (Tabla 10). Teniendo una mayor resistencia dos de las muestras de Quintana Roo y las dos muestras de *Quercus* del estado de Durango. Como muestra la prueba de rangos múltiples (Tabla 11) los resultados varían desde 4.93 a 98.61 N/mm debido al tipo de partícula de cada material y su porosidad; también la presión utilizada para la elaboración de las briquetas con relación al punto de plastificación de la madera. En la figura 29 se muestra como hay gran diferencia estadística entre las medias de los grupos; y como la densidad de la briketa está ampliamente relacionada con la compresión pues las mismas muestras resultaron altas en densidad.

Estos valores obtenidos son altos en comparación con los resultados de Mitchual *et al.* (2014a) con briquetas producidas a partir de combinación de partículas de mazorca de maíz y con aserrín de *Ceiba Pentandra* que osciló desde 7.72 hasta 59.22 N/mm. Mientras en la elaboración de briquetas de seis especies de madera tropical de Mitchual *et al.* (2014b) la especie *Ceiba Pentandra* a diferentes presiones que van desde 10-50 MPa fue mayor su resistencia, con partículas menores de 1 mm obtuvieron 44.58 N/mm; con partículas 1 mm < 2 mm obteniendo 52.60 N/mm; y 2 mm < 3.5 mm se obtuvo 51.42 N/mm. Estos resultados contradicen la teoría que en general, ya que las partículas más pequeñas tienen mayor área de superficie para unión entre partículas, lo que resulta en un aumento de gelatinización de almidón y mejor unión. Aunque en este estudio la presión utilizada fue baja 200 bar, el resultado es excepcionalmente mayor.

Tabla 10. Análisis de varianza para la Fuerza de Compresión de las briquetas (N/mm).

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	35920.9	27	1330.4	76.63	0.0000
Intra grupos	972.274	56	17.362		
Total (Corr.)	36893.2	83			

Fengel y Wegener (1989) reporta que la lignina es la principal responsable de la resistencia mecánica de las plantas a la flexión y al impacto, además de la celulosa. Soares *et al.* (2015) confirman que, al realizar mezclas de aserrín con café molido, en una proporción de 60:40 el aserrín tiene un mayor efecto en la mejora de las propiedades mecánicas de las briquetas moldeadas, probablemente debido a la pequeña estructura de fibra presente en el aserrín de madera obteniendo 0.27 ± 0.04 N/mm y 13.53 ± 1.36 MOE. Los resultados reportados son altos en comparación con Protásio *et al.* (2011) quien elaboraron briquetas de aserrín de eucalipto a temperatura de $120 \pm 5^\circ\text{C}$ y una presión de 15 MPa con una resistencia de 0.82 N/mm². A mayor presión y temperatura la resistencia de las briquetas aumenta.

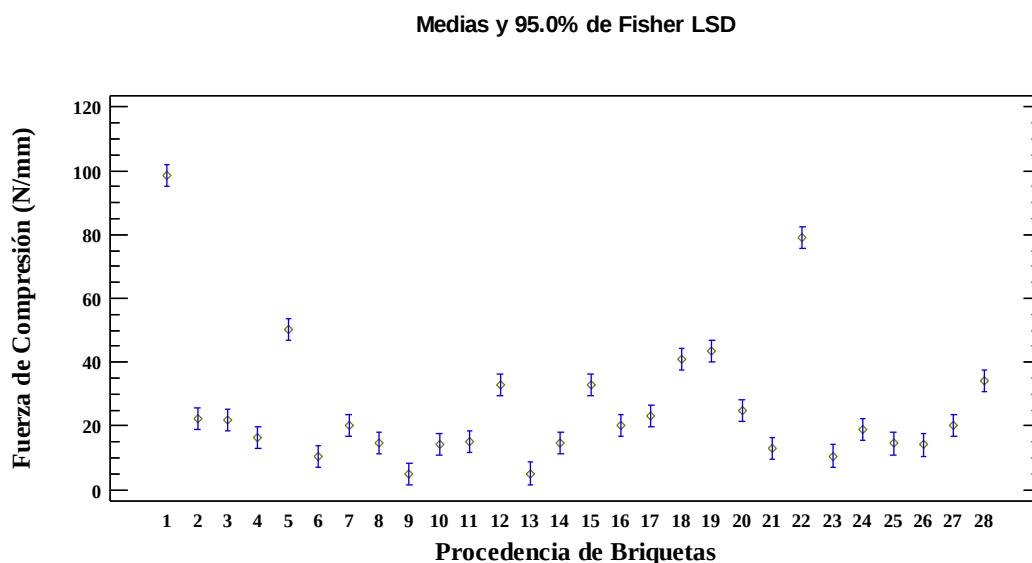


Figura 28. Gráfico de medias para la Fuerza de Compresión de las diferentes briquetas (N/mm).

Tabla 11. Pruebas de Múltiple Rangos para Fuerza de Compresión en las briquetas.

(Método: 95.0 porcentaje LSD)

	Casos	Media	Grupos Homogéneos
9	3	4.93	X
13	3	5.13667	X
6	3	10.3533	XX
23	3	10.6567	XX
21	3	12.8	XX
26	3	14.06	XXX
10	3	14.13	XXX
25	3	14.4767	XXX
8	3	14.5467	XXX
14	3	14.62	XXX
11	3	14.92	XXXX
4	3	16.3667	XXXXXX
24	3	18.95	XXXXXX
7	3	20.18	XXXXX
27	3	20.2467	XXXXX
16	3	20.37	XXXXX
3	3	21.7267	XXXX
2	3	22.3033	XX
17	3	23.18	XX
20	3	24.71	X
15	3	32.7333	X
12	3	32.9333	X
28	3	34.1	XX
18	3	40.79	XX
19	3	43.5133	X
5	3	50.33	X
22	3	78.9967	X
1	3	98.6133	X

8.4. Índice de resistencia al impacto (IRI).

Esta prueba se utiliza para investigar la resistencia y la dureza de la briketa, la prueba del índice de rotura es una medida de la fuerza de la briketa. Un alto índice de rotura y una resistencia al impacto son necesarios para evitar daños por el manejo. Rajaseenivasa *et al.* (2016) en sus resultados con presiones de 7 MPa a 33 MPa, obtuvieron briquetas de aserrín que incrementaban en un 15% su IRI esto muestra que la presión aplicada tiene un efecto sobre el aserrín, a una presión aplicada de 33 MPa las briquetas de aserrín se fracturan en la décima caída; a diferencia de los obtenidos en esta investigación donde la mayoría de las muestras se fracturaron en la primera caída. En la Tabla 12 se muestra las diferencias estadísticas significativas con un valor cero de P , como se aprecia en el análisis de varianza. Los resultados por Liu y Li (2000) con briquetas de aserrín de pino va desde 33- 45% de IRI, reportando con mayor porcentaje a las briquetas elaboradas con madera de álamo, 200- 100

% de IRI. Siendo mayores los resultados obtenidos con aserrín de pino del estado de Durango, Chihuahua; un encino de Durango, y dos muestras de Quintana Roo; teniendo un IRI de 133 - 200% como se muestra en la tabla 13 de pruebas de Múltiple Rangos; donde también se aprecia que hay una mínima diferencia de media entre los grupos.

En la figura 30 se puede apreciar la homogeneidad de las muestras que va de 46.66 a 100 % IRI. Teniendo un menor índice la briqueta *Swietenia macrophylla* de Quintana Roo y un *Pinus* spp. de Michoacán no coincidiendo con la literatura, pues ambas muestras el tamaño de partícula es entre 1 mm – 2 mm.

Tabla 12. Análisis de varianza para Índice de Resistencia al Impacto de las briquetas (%).

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	150962.	27	5591.2	9.27	0.0000
Intra grupos	33774.7	56	603.119		
Total (Corr.)	184737.	83			

Carrillo *et al.* (2018) en su trabajo evidenciaron diferencias estadísticas entre el tipo de aserrín, temperatura e interacción temperatura: presión. Las briquetas de aserrín fresco a 50 °C y 10 MPa fueron más resistentes al impacto, al generar menor número de piezas.

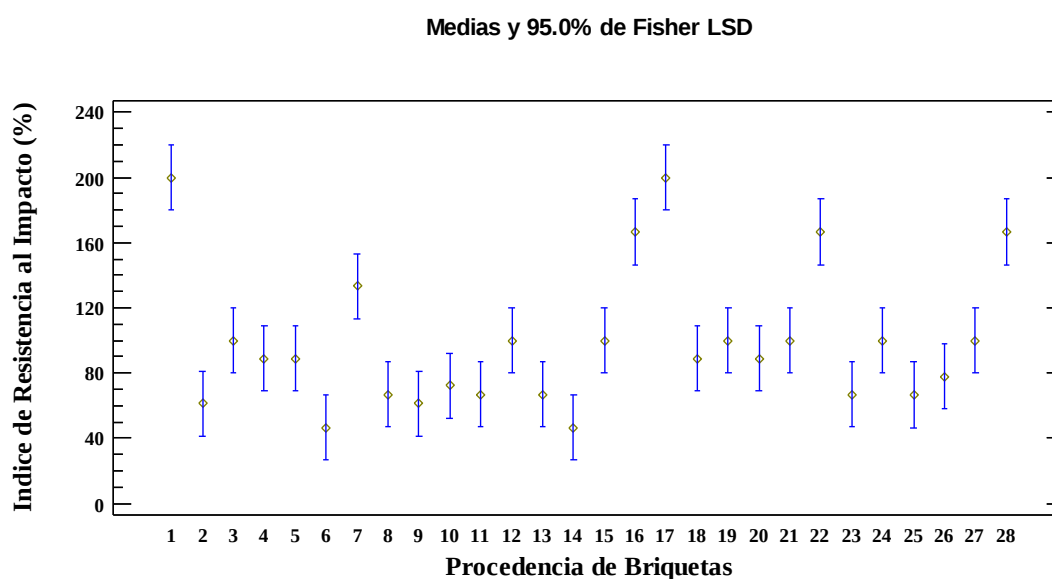


Figura 29. Gráfico de medias para el Índice de Resistencia al Impacto de las diferentes briquetas (%).

Tabla 13. Pruebas de Múltiple Rangos para el Índice de Resistencia al Impacto de las diferentes briquetas.

(Método: 95.0 porcentaje LSD)

	Casos	Media	Grupos Homogéneos
6	3	46.6667	X
14	3	46.6667	X
2	3	61.3333	XX
9	3	61.3333	XX
25	3	66.6667	XX
13	3	67.0	XX
8	3	67.0	XX
11	3	67.0	XX
23	3	67.0	XX
10	3	72.3333	XX
26	3	78.0	XX
5	3	89.0	X
20	3	89.0	X
18	3	89.0	X
4	3	89.0	X
15	3	100.0	XX
3	3	100.0	XX
27	3	100.0	XX
24	3	100.0	XX
12	3	100.0	XX
21	3	100.0	XX
19	3	100.0	XX
7	3	133.333	XX
28	3	166.667	XX
22	3	166.667	XX
16	3	166.667	XX
17	3	200.0	X
1	3	200.0	X

8.5. Expansión volumétrica de las briquetas.

Bamgboye y Bolufawi (2009) mencionan que el aumento en el volumen con masa fija resulta en una reducción de la densidad, la briketa que se expanda más después de la densificación tendrá una densidad menor relajada y viceversa. También observaron que hay una tendencia general de aumento en la densidad relajada al aumentar la presión en diferentes tamaños de partícula, el aumento de la densidad relajada con el aumento de la presión podría deberse a la posible compacidad del material a medida que aumenta la presión y reduce la recuperación elástica durante la relajación de la briketa. Los primeros treinta minutos después de la compactación son cruciales para sus características de expansión axial, la expansión más rápida tuvo lugar en este periodo, una hora después y hasta 24 h. teniendo resultados de expansiones axiales máximas y mínimas que van de 138.64% y 28% respectivamente.

Sitkel (1986) citado por Bamgboye y Bolufawi (2009) el residuo comprimido responde a las leyes de tensión y estrés en diversas formas, el material rebota de acuerdo con sus propiedades visco-elásticas que puede continuar durante varios días naturalmente con ligeros incrementos y una parte considerable de este rebote tiene lugar dentro de un corto tiempo después de la compresión.

Maradiaga *et al.* (2017) mostraron resultados que van de 8.9 a 16.6 % sugiriendo como adecuado una briqueta con expansión volumétrica entre 15-20 %, ya que valores superiores reducen, la temperatura del horno y la temperatura de los gases de escape por el contenido de agua presente en el material (Gonçalves *et al.* 2009).

Los datos de expansión volumétricos hallados por Freitas *et al.* (2016) en briquetas de *Dendrocalamus asper*, *Bambusa vulgaris*, *Bambusa tuldoidea*, *Eucalyptus urophylla*, *Eucalyptus grandis* están por debajo de los observados por este estudio (Tabla 15) a diferentes temperaturas 30° 80° y 120 °C con 8.24 1.90 y 1.02 % respectivamente. La expansión volumétrica de las briquetas va de 3.3 a 17.98 % aceptadas según la literatura (Figura 31) siendo 5 briquetas de Quintana Roo, 2 de Michoacán, 3 de Durango, 1 de Chihuahua, 1 de Sonora la mayoría de ellas latifoliadas. Las restantes de especie *Pinus* spp. 5 briquetas de Durango, 3 de Oaxaca, 3 de Chihuahua, 3 de Michoacán, 1 de Nuevo León y *Swietenia macrophylla* de Quintana Roo van de 20.82 a 38.97 %. Existe la reorganización de las partículas debido al movimiento del pistón, la aparición de deformación elástica y finalmente la deformación plástica. Las presiones más altas aplicadas conducen a una mayor resistencia, tanto a la durabilidad como a la compresión. La razón de una estabilización es la existencia de una presión máxima, donde cualquier valor más alto no causa un cambio considerable en el volumen (Borowycz *et al.* 2018).

El resultado de expansión volumétrica de las briquetas presentó diferencias estadísticas significativas con un valor cero de *P*, como se aprecia en el análisis de varianza (Tabla 14). Silva *et al.* (2015) encontraron una expansión en altura entre 3.85 y 9.00% para el aserrín de eucalipto. Yamaji *et al.* (2013) encontraron una expansión de 2.63% para las briquetas de aserrín de *Pinus* spp.

Oliveira *et al.* (2017) encontraron valores para la expansión volumétrica del 2.16%, aserrín y 2.88% para aserrín molido de *Pinus* spp.

Neves *et al.* (2011) hallaron 15.6 % de expansión demostrando la viabilidad del uso de la temperatura para producción de briquetas, ya que la expansión volumétrica es una propiedad importante en el proceso de densificación de biomasa, siendo inversamente proporcional a la fuerza de las briquetas. Conforme a Souza (2014) el uso de temperaturas más altas promueve más rápido ablandamiento de la lignina dentro de la biomasa, haciendo que las partículas adherirse más entre sí, explicando la mayor resistencia valores observados para temperaturas de 80 y 120 ° C.

Tabla 14. Análisis de varianza para la Expansión Volumétrica %.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	8286.07	27	306.892	60.75	0.0000
Intra grupos	282.889	56	5.05159		
Total (Corr.)	8568.96	83			

Medias y 95.0% de Fisher LSD

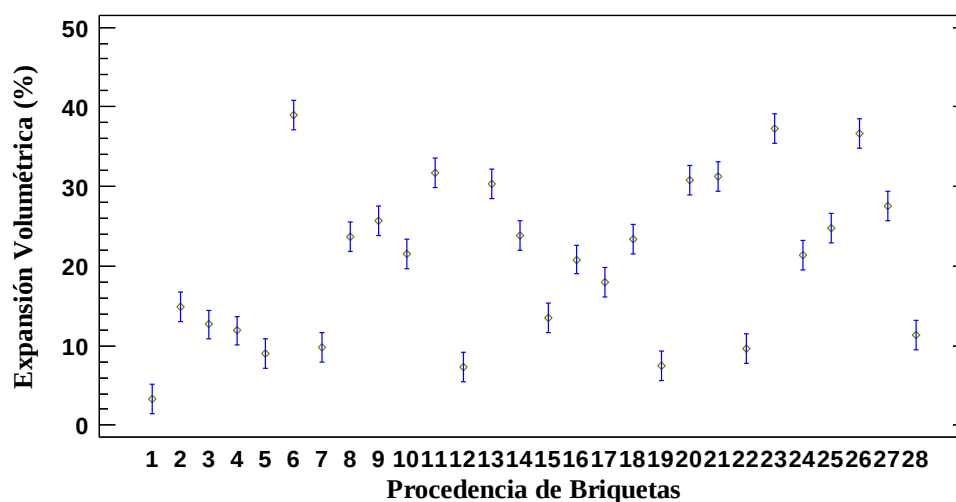


Figura 30. Gráfico de medias para la Expansión Volumétrica de las diferentes briquetas (%).

Tabla 15. Pruebas de Múltiple Rangos para la Expansión Volumétrica.

(Método: 95.0 porcentaje LSD)

	Casos	Media	Grupos Homogéneos
1	3	3.30667	X
12	3	7.35	X
19	3	7.45	X
5	3	9.02333	XX
22	3	9.59	XX
7	3	9.76	XX
28	3	11.3367	XX
4	3	11.88	XX
3	3	12.6533	XX
15	3	13.56	X
2	3	14.8433	XX
17	3	17.9833	XX
16	3	20.8267	XX
24	3	21.3467	XXX
10	3	21.4667	XXX
18	3	23.3433	XXX
8	3	23.6833	XXX
14	3	23.8567	XXXX
25	3	24.8167	XXX
9	3	25.69	XX
27	3	27.51	XX
13	3	30.2867	XX
20	3	30.75	XX
21	3	31.2267	X
11	3	31.7633	X
26	3	36.6267	X
23	3	37.2767	X
6	3	38.97	X

8.6. Poder Calorífico superior.

El poder calorífico de las briquetas será en función del material de procedencia. Suponiendo que es madera y corteza sin aditivos su poder calorífico será el de la madera de la que proviene. Las dos briquetas de *Quercus* providente de Durango han tenido excelentes resultados en las propiedades mecánicas, y su PC sobrepasa a los resultados obtenidos por Herrera-Fernández *et al.* (2017) que reportan valores que varían de 15.78 (corteza de *Quercus rugosa*) a 17.92 MJ/kg (albura de *Quercus laurina*). Mientras Martínez *et al.* (2012) sus resultados van de 14.45 MJ a 17.06 MJ en diferentes especies de latifoliadas.

Los valores caloríficos para la mayoría de los materiales leñosos están entre 17 y 19 MJ / kg; para la mayoría de los residuos agrícolas, los valores de calentamiento son de aproximadamente 15-17 MJ / kg (Stahl *et al.* 2004). Un estudio de 22 especies de árboles de

uso común mostró que las tres cuartas partes tenían valores caloríficos entre 14 y 19 MJ / kg de madera secada al horno (Jain, 1991). Teniendo valores mayores a los mencionados en la literatura siendo predominantes todas las especies de pinos. En coníferas el PC es un 2% superior que en frondosas; la variabilidad del poder calorífico anhidro se debe en parte a la ligera variabilidad del contenido de hidrógeno y a la variabilidad del contenido en cenizas (Francescato *et al.* 2008).

Mitchual (2015) menciona que los procesos de pre-tratamiento como la torrefacción y la explosión de vapor pueden tener un efecto significativo sobre el valor calorífico del producto obtenido final y aumentarlos a 20 - 22 MJ / kg. Sin embargo, los resultados de las 28 briquetas como lo muestra la tabla de rangos múltiples (Tabla 17). 25 de las briquetas tienen un PC mayor de 20 MJ/kg sin ningún pre-tratamiento.

En la Figura 32 se aprecia como la briqueta 18 astilla de *Pinus* spp. de Durango seguida por la briqueta 16 *Pinus* spp. son las más altas en PC esto se debe fundamentalmente al mayor contenido en lignina y en parte también al mayor contenido en resina, ceras y aceites- de las coníferas (Francescato *et al.* 2008). Sin embargo, los resultados de las especies de Quintana Roo son inferiores a las obtenidas por Mitchual (2015b) que van de 20.16 a 22.22 MJ/Kg en seis especies de latifoliadas.

Las muestras tienen una diferencia estadística significativa con un valor cero de *P*, como se aprecia en el análisis de varianza (Tabla 16).

Tabla 16. Análisis de varianza para Poder Calorífico de las briquetas (MJ/kg).

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	39.9861	27	1.48097	36.08	0.0000
Intra grupos	2.29892	56	0.0410521		
Total (Corr.)	42.285	83			

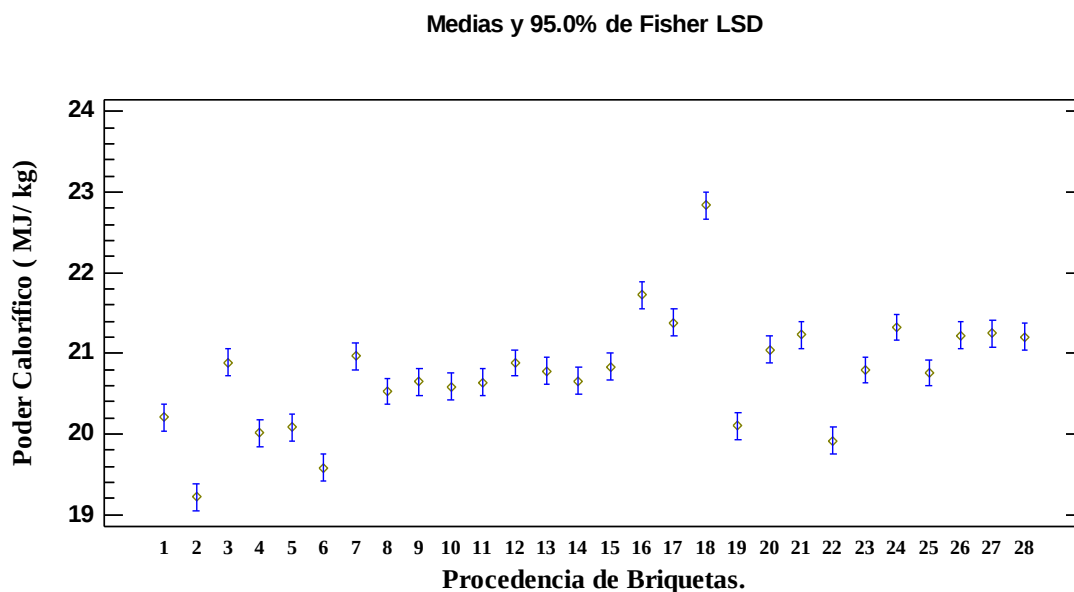


Figura 31. Gráfico de medias para el Poder Calorífico superior de las diferentes briquetas (MJ/kg).

Tabla 17. Pruebas de Múltiple Rangos para Poder Calorífico superior
(Método: 95.0 porcentaje LSD)

	Casos	Media	Grupos Homogéneos
2	3	19.2151	X
6	3	19.5819	X
22	3	19.9193	X
4	3	20.0134	X
5	3	20.0824	X
19	3	20.1033	X
1	3	20.2077	XX
8	3	20.5307	XX
10	3	20.5862	XX
11	3	20.6379	XXX
9	3	20.6506	XXX
14	3	20.6583	XXX
25	3	20.7594	XXXX
13	3	20.779	XXXX
23	3	20.7924	XXXX
15	3	20.8333	XXXX
12	3	20.881	XXXX
3	3	20.8912	XXXXX
7	3	20.9664	XXXXX
20	3	21.0481	XXXXX
28	3	21.2025	XXXXX
26	3	21.2226	XXXX
21	3	21.2268	XXX
27	3	21.2481	XXX
24	3	21.3223	XX
17	3	21.3817	X
16	3	21.7269	X
18	3	22.8353	X

8.7. Cenizas, material volátil y carbono fijo.

El contenido de cenizas de las 28 briquetas de los diferentes estados, concuerdan a la literatura, al no tener ningún tipo de aglomerante, las cenizas de las briquetas al igual que el poder calorífico será igual al de la biomasa usada. Los contenidos de cenizas más elevados corresponden a las latifoliadas de Quintana Roo y la briketa de Sonora que oscilan entre 1.69 y 3.94 % (Tabla 19). Mitchual (2014b) reporta un contenido de ceniza mayores, para especies tropicales desde 0.60 a 5.04 %. El alto contenido de cenizas forma depósitos en las superficies de equipos de transferencia de calor, calderas o gasificadores que aceleran la corrosión de los tubos de intercambio y reduce la eficiencia de estos. Castilho (1984) evaluó 20 especies forestales procedentes del Amazonas, reportando un porcentaje de cenizas de 0.25 a 2.83 %.

Santiago *et al.* (2013) estudiaron 10 especies latifoliadas maderables potenciales de bosques secundarios y primarios residuales realizando el análisis de ceniza con y sin corteza de las muestras que van de 0.48 a 3.58 % sin corteza y con corteza 7.37 a 11.77 %.

Francescato *et al.* (2008) muestra valores típicos para materiales de madera virgen, madera de coníferas entre 0.2-0.5 %. Las briquetas de *Pinus* spp. obtuvieron valores de 0.1 a 1.06 % (Figura 33) sin importar el estado de donde provenían, sin embargo, la biomasa de algunas briquetas contenía residuos de corteza que pudo aumentar su contenido de cenizas.

En la Tabla 18 se aprecia el análisis de varianza donde las muestras tienen una diferencia estadística significativa con un valor cero de *P*.

La briketa 19 y 22 revelan un contenido de cenizas de 1.47 y 1.23 % respectivamente siendo valores bajos en comparación con Meetei *et al.* (2015) que analizaron propiedades de cinco maderas para la combustión entre ellas *Quercus serrata* en su estudio reportaron un contenido de cenizas para esta especie de 4.73 ± 2.16 %. Honorato y Hernández (1998) dan a conocer los principales componentes químicos de cinco especies de encinos del estado de Puebla; declaran un porcentaje de cenizas que oscila de 0.87 a 1.38% siendo similares a los resultados de la briketa 19 y 22. Cuanto mayor es el contenido de cenizas, mayor es la cantidad de material inerte, es decir, no produce calor (Gonçalves *et al.* 2009).

Tabla 18. Análisis de varianza para Cenizas en las briquetas (%).

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	78.4285	27	2.90476	49.56	0.0000
Intra grupos	1.64105	28	0.0586089		
Total (Corr.)	80.0696	55			

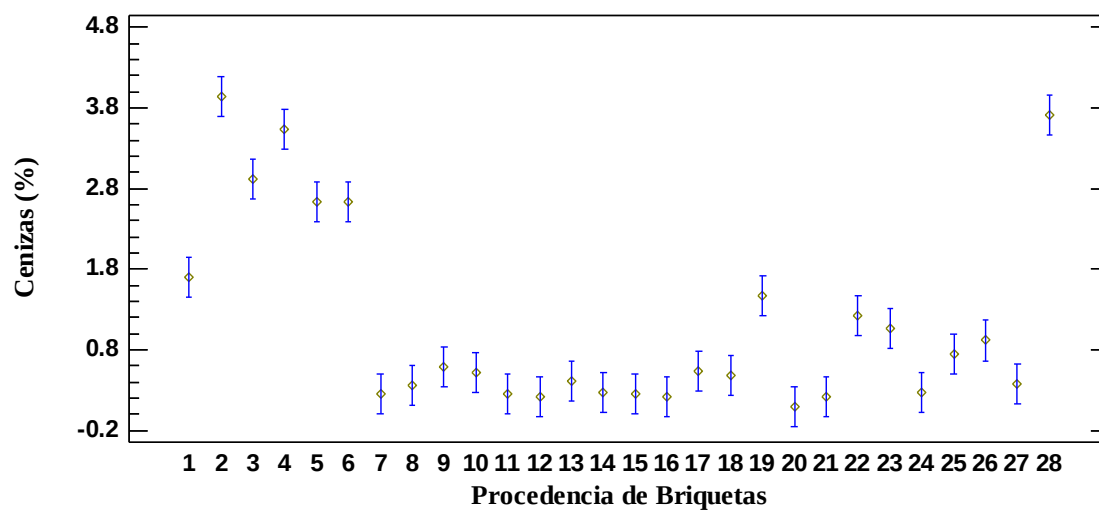
Medias y 95.0% de Fisher LSD**Figura 32.** Gráfico de medias para las Cenizas en las diferentes briquetas (%).

Tabla 19. Pruebas de Múltiple Rangos para las Cenizas en las briquetas
(Método: 95.0 porcentaje LSD)

	Casos	Media	Grupos Homogéneos
20	2	0.1	X
12	2	0.21	X
16	2	0.21	X
21	2	0.21	X
11	2	0.26	XX
15	2	0.26	XX
7	2	0.26	XX
14	2	0.265	XX
24	2	0.265	XX
8	2	0.365	XX
27	2	0.375	XX
13	2	0.41	XX
18	2	0.475	XXX
10	2	0.52	XXX
17	2	0.53	XXX
9	2	0.585	XXXX
25	2	0.75	XXXX
26	2	0.915	XXX
23	2	1.065	XXX
22	2	1.23	XXX
19	2	1.475	XX
1	2	1.695	X
5	2	2.63	X
6	2	2.64	X
3	2	2.92	X
4	2	3.535	X
28	2	3.705	X
2	2	3.945	X

En material volátil (MV), las briquetas de biomasa frondosa indican un valor que va de 79.6 a 88.55 %, las briquetas de *Quercus* spp. 19 y 22 con 89.2 y 90.95%, respectivamente, siendo esta última la más alta del resto de las briquetas y las de especie *Pinus* spp. con valores de 82.95 a 90.7% (Tabla 21) (Figura 34) el alto contenido de materia volátil de un material de biomasa indica que durante la combustión, la mayor parte se volatilizará. Los datos obtenidos son altos, con similitud a Carrillo *et al.* (2018) declaran que la materia volátil tiene una relación con la presión y la temperatura utilizada en la densificación, así como la recolección de la muestra y su almacenamiento. El mayor porcentaje en material volátil se presentó en las briquetas elaboradas con aserrín intemperado a una presión de 10 MPa, a 70 ° C con 81.01% M.V, por lo que la briqueta con menos porcentaje se preparó con material intemperado a 10 MPa y 50 ° C con 78.62%.

Gallipolit *et al.* (2012) argumentan que como regla general se puede afirmar que carbones con alto contenido de volátiles combustionan más fácilmente y con llama larga; elaboraron briquetas fabricadas con aserrín de pino y almidón de mandioca como aglomerante, hallado un valor de MV de 60,9%. Aun teniendo aglutinante es inferior a la briqueta 28 que es la más baja de porcentaje. Mitchual (2014b) reporta un porcentaje de materia volátil menor para especies tropicales desde 75.23% hasta 83.70%. Sostienen que la materia volátil se refiere a la parte de un material de biomasa que se libera como gases volátiles cuando se calienta de 400°C a 500°C. La biomasa generalmente tiene un alto contenido de materia volátil de alrededor del 70% al 86% y un bajo contenido de carbón.

En la Tabla 20 se aprecia el análisis de varianza donde las muestras tienen una diferencia estadística significativa con un valor cero de *P*. Las cenizas y los contenidos volátiles son índices importantes para las briquetas, ya que están relacionados con el potencial energético del material (Gonçalves *et al.* 2009).

Soares *et al.* (2015) al combinar aserrín con café molido 50% / 50% reportan que el porcentaje de MV fue $85.57 \pm 1.30\%$.

Tabla 20. Análisis de varianza para Material Volátil (%)

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Entre grupos	352.409	27	13.0522	13.41	0.0000
Intra grupos	27.25	28	0.973214		
Total (Corr.)	379.659	55			

Medias y 95.0% de Fisher LSD

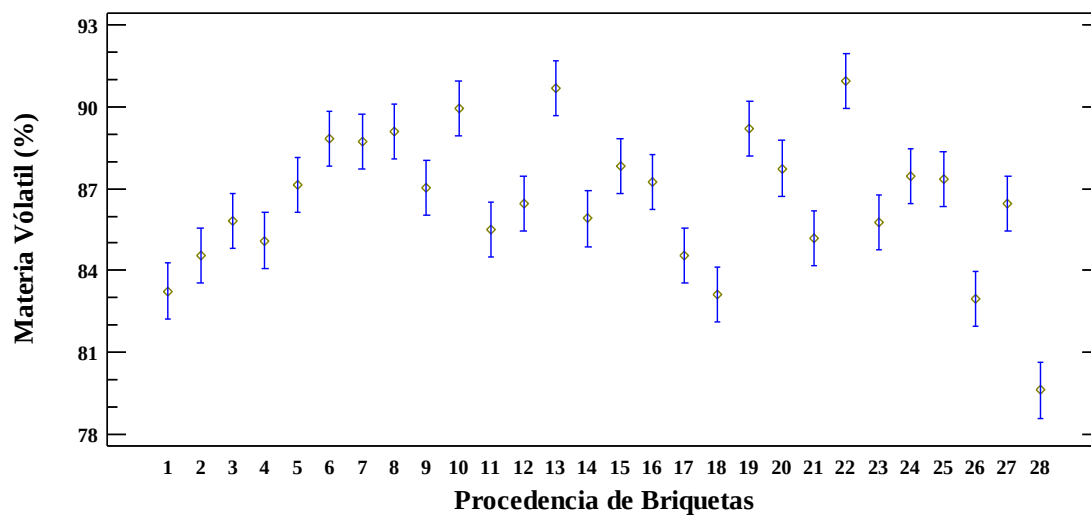


Figura 33. Gráfico de medias para la Material Volátil en las diferentes briquetas (%).

Tabla 21. Pruebas de Múltiple Rangos para Material Volátil en las briquetas
(Método: 95.0 porcentaje LSD)

	Casos	Media	Grupos Homogéneos
28	2	79.6	x
26	2	82.95	x
18	2	83.1	xx
1	2	83.25	xxx
2	2	84.55	xxxx
17	2	84.55	xxxx
4	2	85.1	xxxx
21	2	85.2	xxxx
11	2	85.5	xxxx
23	2	85.75	xxxxx
3	2	85.8	xxxxx
14	2	85.9	xxxxxx
27	2	86.45	xxxxxx
12	2	86.45	xxxxxx
9	2	87.05	xxxxxx
5	2	87.15	xxxxxx
16	2	87.25	xxxxxx
25	2	87.35	xxxxxx
24	2	87.45	xxxxxx
20	2	87.75	xxxxxx
15	2	87.85	xxxx
7	2	88.75	xxxx
6	2	88.85	xxxx
8	2	89.1	xxxx
19	2	89.2	xxx
10	2	89.95	xx
13	2	90.7	xx
22	2	90.95	x

En el carbono fijo Batista *et al.* (1983) aseguran que el comportamiento de la madera, durante el proceso de carbonización, puede ser representado por la sumatoria de los comportamientos aislados de sus tres componentes principales: celulosa, hemicelulosa y lignina.

Según Inga y Castillo (2016) y sus autores citados existen evidencias de que las maderas ricas en carbohidratos son las que dan menos carbón y más piroleñoso. A la inversa, las maderas que contienen mucha lignina y extractivos tienen mejor rendimiento en carbón. Asimismo, se ha determinado que una fuerte correlación positiva entre la madera y el carbón en cuanto al contenido de cenizas (Aguinellio y Batista, 1980; Martins, 1980; Petroff y Doat, 1978).

Las briquetas de *Quercus* spp. mostraron un porcentaje de carbono fijo de 7.82 a 16.69 % teniendo los resultados más bajos entre las briquetas; las briquetas de biomasa frondosas van de 8.51 a 16.69 % siendo similar con las briquetas de *Pinus* spp. con 8.89 a 16.42 % (Tabla 23). Apolinar *et al.* (2017) estudiaron las propiedades energéticas de la madera, como materia prima para combustible, en promedio, la de *Acacia pennatula* tuvo 12.37 % de carbono fijo; *Trema micrantha* registró 16.31 %.

Carrillo *et al.* (2018) mostraron que el aserrín intemperizado dio mejores propiedades energéticas, con mayor contenido de carbono fijo 13.84 %. Y la briketa de aserrín fresco con el porcentaje de carbón fijo fue de 14.07 ± 0.29 % a 15 bar y 70 °C. En la Figura 35 se aprecia la dispersión de las briquetas donde los valores están dentro de la literatura; entre más alto sea este valor, más material sólido se tendrá para ser quemado; esto es importante para calcular la eficiencia en equipos de combustión (Severs *et al.* 2007).

Boada y Vargas (2015) determinaron el contenido del carbono fijo de la muestra de pellets a partir de mezclas 50/50 carbón bituminoso/madera residual fue de 48.12 en porcentaje de masa; aunque no hay parámetro de comparación en alguna norma. En la Tabla 22 el análisis de varianzas muestra la diferencia estadística significativa con un valor *P* de 0.0000.

Tabla 22. Análisis de varianzas para Carbono Fijo (%).

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	308.375	27	11.4213	10.32	0.0000
Intra grupos	30.998	28	1.10707		
Total (Corr.)	339.373	55			

Medias y 95.0% de Fisher LSD

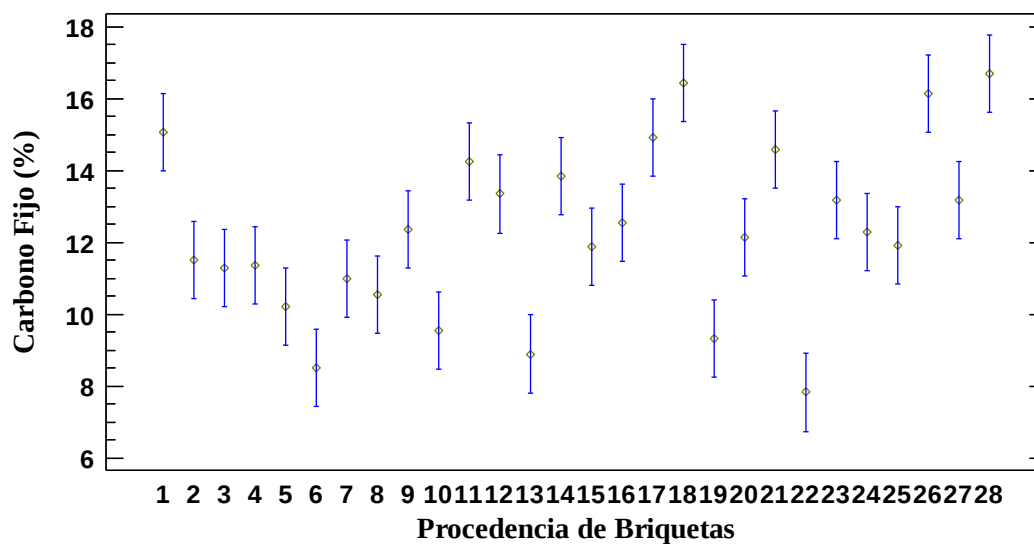


Figura 34. Gráfico de medias para el Carbono Fijo en las diferentes briquetas (%).

Tabla 23. Pruebas de Múltiple Rangos para carbono fijo en las briquetas.

(Método: 95.0 porcentaje LSD)

	Casos	Media	Grupos Homogéneos
22	2	7.82	X
6	2	8.51	XX
13	2	8.89	XXX
19	2	9.325	XXXX
10	2	9.53	XXXXXX
5	2	10.22	XXXXXX
8	2	10.535	XXXXXXX
7	2	10.99	XXXXXX
3	2	11.28	XXXXXX
4	2	11.365	XXXXXX
2	2	11.505	XXXXX
15	2	11.89	XXXXX
25	2	11.9	XXXXX
20	2	12.15	XXXXXX
24	2	12.285	XXXXXX
9	2	12.365	XXXXXX
16	2	12.54	XXXXXX
27	2	13.175	XXXXXX
23	2	13.185	XXXXXX
12	2	13.34	XXXXXX
14	2	13.835	XXXXX
11	2	14.24	XXXXX
21	2	14.59	XXXXX
17	2	14.92	XXX
1	2	15.055	XXX
26	2	16.135	XX
18	2	16.425	X
28	2	16.695	X

9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

9.1. Conclusiones

El aserrín generado durante la transformación primaria de la madera y recolectado de los 28 establecimientos de diferentes estados de la república, en las condiciones utilizadas en esta investigación, contienen en su mayoría una alta proporción de partículas adecuadas para la fabricación de briquetas, al contener partículas no homogéneas que ayudan a mejorar la adherencia entre partículas en la aglomeración, esto indica que los costos de reducción granulométrica del aserrín son potencialmente menores a los de otros residuos.

El porcentaje de humedad de las briquetas después del acondicionamiento fue mínimo; teniendo valores de 4.1 a 8.8 %, aunque las briquetas cambiaron su volumen, el porcentaje de humedad no contribuyó al aumento de este, la higroscopicidad de las briquetas es aceptable.

Bajo las condiciones de esta experimentación se pudieron producir exitosamente en el laboratorio las briquetas, fueron muy duraderas y alcanzaron una densidad de hasta 1200 Kg/m³ aceptada en la literatura como una buena compactación; existe un efecto positivo en la densidad, a presiones medias.

En los resultados obtenidos en las briquetas podemos observar que tener una alta densidad no está relacionado a tener buenas propiedades físicas. Las briquetas con menos contenido de humedad fueron las briquetas que tuvieron menos resistencia al impacto y resistencia longitudinal, esto se puede explicar a que el contenido de agua en la briketa ayuda al enlace entre partículas con los puentes de hidrógeno formados en su interior. Teniendo resultados favorables a partir de un 5 a un 9 % de CH en las briquetas.

El poder calorífico es sin duda una de las principales características de un buen combustible, en los resultados las briquetas con mayor cantidad de volátiles tuvieron un mayor poder calorífico, esto se debe que en general cuanto más volátiles mayor es el PC sin embargo a mayor cantidad de cenizas menor es este, respecto a la influencia de carbón fijo en el poder calorífico depende del material y aun no hay una estandarización respecto al contenido de carbono fijo. El PC superior de las 28 muestras supera a los reportados en la literatura con algún tipo de aglutinante.

Por último, la mayoría de las briquetas cumplieron con las exigencias de la norma UNE 17225-3, 2014.

9.2. Recomendaciones.

- Manipular el tamaño de partícula en la elaboración, así tener un sistema más eficiente en los desechos de aserrío.
- Realizar pre-tratamientos de la biomasa con técnicas como la torrefacción y/o la hidrólisis.
- Elaborar un estudio de factibilidad económica para los 28 establecimientos que cuentan con una gran merma de residuos de aserrío para la producción de briquetas.
- Evaluar temperaturas de fabricación más altas a la utilizada en este estudio con el fin de lograr la termoelasticidad de la madera.
- Probar el uso de aditivos comburentes (residuos de lignina, resina o almidón) para mejorar las características de formación y propiedades energéticas como el poder calorífico.
- De acuerdo con esta investigación, se recomienda la fabricación de las briquetas con un CH mínimo de 10% máximo 13 %, en su elaboración perderá agua, que se verá reflejado en las pruebas físico mecánicas, en su PC se espera no afectará, puesto que de acuerdo a su PSF será adecuado para su higroscopicidad. Al igual mantener varios segundos la carga luego de la formación de las briquetas para evitar la recuperación elástica del material la cual provoca un rebote en las dimensiones como se mostró en este estudio.

10. BIBLIOGRAFIA

Aguinelio, G., Batista De Oliveira. (1980). Uso da Madeira para Fins Energeticos; Teoria da Carbonización da Madeira. Belo Horizonte, Fundação - Centro Tecnológico de Minas Gerais/CITEC. Serie Publicaciones Técnicas. pp. 29-41p.

Apolinar, H., Honorato-Salazar, J. A., Colotl, H. (2017). Energetic characterization of the wood of *Acacia pennatula* Schltdl. & Cham. and *Trema micrantha* (L.) Blume. Revista Mexicana de Ciencias Forestales, 8(39), 71-81p.

Ávila, P., Álvaro, E., Leiva, B., Rodrigo, F., Darghan, C., Enrique, A. (2017). Friabilidad y su relación con algunas propiedades físicas y químicas de suelos cultivados con caña de azúcar. Revista de Ciencias Agrícolas, 34(2), 19-32p.

Al-Widyan, M. I., Al-Jalil, H. F., Abu-Zreig, M. M., Abu-Hamdeh, N. H. (2002). Physical durability and stability of olive cake briquettes. Canadian Biosystems Engineering, 44, 3-41p.

ASTM D 440-68 (2007). ASTM Standard D 440-68. Standard Test Method of Drop Shatter Test for Coal.

Bamgboye, A. I., Bolufawi, S. J. (2009). Physical Characteristics of Briquettes from Guinea corn (sorghum bi-color) Residue. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*. Manuscript 1364.

Batista de Oliveira, Vivacqua, F., Guimaraes, M., Aguielio, G. (1983) Manual de carbón vegetal; Producción de carbón vegetal. Guatemala, I Curso sobre carbón vegetal para Centro América. OLACE / CETEC / FORESTAS ACESITA.- Aspectos técnicos pp. 38-65p.

Bustamante, C. A. G., Cerutti, O. M. (2017). Estado del arte de la bioenergía en México. Guadalajara: Imagia Comunicación S. de RL. de CV.

Boada, L. E. A., Vargas, F. E. S. (2015). Caracterización físico-química de pellets producidos a partir de mezclas 50/50 carbón bituminoso/madera residual. *Informador técnico*, 79(1), 18-25p.

Borowycz, M., da Rocha, S., Saulo H., Steinmetzger, T., Bruns, D. Leandro, L., Assunção, G., Da Silva, G. (2018). Análise da resistência mecânica de briquetes de resíduos de biomassa para utilização em processos metalúrgicos. Contribución técnica al 48º Seminario de reducción de mineral de hierro y materias primas y al 6º Simposio brasileño de aglomeración de mineral de hierro, parte integral de la Semana ABM, celebrada 02 al 04 de octubre de 2018, São Paulo, SP, Brasil.

Carrillo-Parra, A., Contreras Ortiz, E., Garza-Ocañas, F., Ngangyo Heya, M., Rutiaga-Quiñones, J. G. (2018). Efecto de la intemperización y proceso en las características físicas, mecánicas y energéticas de briquetas. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 9(50), 496-513p.

Carrillo-Parra, A., Conteras-Ortiz E., Pérez-Pérez, E., Bustamante-García, V., Corral-Rivas, J., Goche-Télles, J. (2016). Capítulo 6 “Briquetas”. In: *Biocombustibles Sólidos*, p13-155, Carrillo-Parra, A., & Rutiaga-Quiñones J.: Editorial Sierke Verlag. Germany.

Castilho, M. (1984). Determinación del poder calorífico de 20 especies forestales de la Amazonia peruana. *Revista Forestal del Perú*, 12(1-2), 1-15p.

Comportamiento de la madera frente al fuego 2014 N/G descargado 08 agosto 2019 de <http://asmadera.com/wp-content/uploads/2014/11/P5.pdf>

Correa-Méndez, F., Carrillo-Parra, A., Rutiaga-Quiñones, J. G., Márquez-Montesino, F., González-Rodríguez, H., Jurado-Ybarra, E., Garza-Ocañas, F. (2014). Contenido de humedad y sustancias inorgánicas en subproductos maderables de pino para su uso en pellets y briquetas. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 20(1), 77-88p.

Correa Méndez, F. (2013). Contenido de humedad, ceniza, inorgánicos y granulometría en subproductos de seis especies maderables para bioenergía (Doctoral dissertation, Universidad Autónoma de Nuevo León, Mexico).

De la Biomasa a la Energía Renovable. Dendroenergía en Argentina. (2015-2019). Recuperado de <http://www.fao.org/alc/cursos/biomasa/home/pag/3>.
Revisado: 04 marzo 2019 al 31 diciembre 2019.

Dutta, A. (2007). Achieving millenium development goals. Web site <http://sfc-mtm.ai3.net/class/20070041/materials/03/20070041-Dutta-03-6in1.pdf>.

FAO (1990). The briquetting of agricultural wastes for fuel. FAO, Environment and Energy Paper. Web site <http://www.fao.org/docrep/t0275e/T0275E03.htm>: Revisado 12 mayo 2019.

Fengel, D., Wegener, G. (1989). Wood Chemistry, Ultrastructure and Reactions, Walter de Gruyter, Berlin.

Fernández, J. (2004). Energía de la biomasa. 2004: La energía en sus claves, Madrid, Fundación Iberdrola, 397-445p.

Fonseca Cuenca, E. G., Tierra Tingo, L. F. (2011). Desarrollo de un Proceso Tecnológico para la Obtención de Briquetas de Aserrín de Madera y Cascarilla de Arroz, y Pruebas de Producción de Gas Pobre (Bachelor's thesis, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo) Ecuador.

Francescato, V., Antonini, E., Zuccoli, L. (2008). Manual de combustibles de madera. Producción, Requisitos de Calidad, Comercialización. AIEL (Italian Agriforestry Energy Association). Available online: http://www.cederprodesse.org/_CederProdesse/documents/COMBUSTIBLES_BTC_Handbook_Espa%20C3%B1ol_Completo.pdf. Revisado

Freitas, P. C., Silva, M. F., Silva, R. T., Coneglian, A., Sette Jr, C. R. (2016). Evaluation of briquettes from bamboo species produced under different temperatures. *International Journal of Current Research*, 8(9), 39260-39265p.

Gallipoliti, V., Martina, P., Corace, J., Aeberhardt, R., García Solá, E. (2012). Fabricación de briquetas con aserrín blanco de pino, análisis inmediato y obtención de su poder calorífico. *Revista AVERMA*, 16, 06-35p.

Gonçalves, José E.; Sartori, Maria M. P.; Leão, Alcides Lopes. (2009). Energia de briquetes produzidos com rejeitos de resíduos sólidos urbanos e madeira de *Eucalyptus grandis*. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 13, n. 5, 657-661p.

González Martínez, I. D. (2013) Potencial del aserrín generado en la transformación primaria de *Pinus patula* para la fabricación de pellets /por Iván Dario González Martínez. (Universidad Autónoma de Chapingo, México).

Grover, P. D., Mishra, S. K. (1996). Biomass briquetting: technology and practices (Vol. 46). Bangkok, Thailand: Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Gutiérrez-Pulido H, de la Vara-Salazar R. (2004). Análisis y diseño de experimentos. McGrawHill. México.

Herrera-Fernández, A. C., Carrillo-Parra, A. Pedraza-Bucio, F. E., Correa-Méndez, F., Herrera-Bucio, R., López-Albarrán, P. Rutiaga-Quñones, J. G. (2017). Densidad, composición química y poder calorífico de la madera de tres especies de encinos (*Quercus candicans*, *Q. laurina* y *Q. rugosa*). *Ciencia Nicolaita*, (72) 136-154p.

Honorato, J. A., Hernández, J. (1998). Determinación de componentes químicos de la madera de cinco especies de encino del estado de Puebla. *Madera y Bosques*, 4(2), 79-93p.

Inga, P. R., Castillo, M. U. (2016). Características físico-químicas de la madera y carbón de once especies forestales de la Amazonia Peruana. *Revista Forestal del Perú*, 14(2) 1-8 p.

Jamradloedluk, J., Wiriyampaiwong, S. (2007). Production and characterization of rice husk based charcoal briquettes. *Engineering and Applied Science Research*, 34(4), 391-398p.

Jain, S. K. (1991). *Dictionary of Indian Folk Medicine and Ethnobotany*. New Delhi: Deep Publications.

Maradiaga Rodriguez, W. D., Wagner Evangelista, A., Sette Jr, C. R., Alves Júnior, J., Fernandes da Silva, M. (2017). Producción de briquetas con residuos de cáscara de piñón manso (*Jatropha curcas*) y bagazo de caña de azúcar. *Bosque (Valdivia)*, 38(3), 527-533p.

Martínez-Pérez, R., Pedraza-Bucio, F. E., Apolinar-Cortes, J., López-Miranda, J., Rutiaga-Quiñones, J. G. (2012). Poder calorífico y material inorgánico en la corteza de seis árboles frutales. *Revista Chapingo serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 18(3), 375-384p.

Martins, H. (1980). *Uso da Madeira para fins Energeticos - Madeira corno Fonte de Energia*. Fundação Centro Tecnológico de minas Gerals. 11-26p.

Martin, F. M. (1994). Pélest y Briquetas. *Revista Asociación de investigación técnica de las industrias de la madera*, 171p.

Meetei, S. B., Singh, E. J., Das, A. K. (2015). Fuel wood properties of some oak tree species of Manipur, India. *Journal of Environmental Biology*, 36(4), 1007-1010p.

Mitchual, S. J. (2015). *Densification of sawdust of tropical hardwoods and maize cobs at room temperature using low compacting pressure without a binder (Doctoral dissertation)* Department Of Wood Science And Technology, Kwame Nkrumah University. Africa.

Mitchual, S. J., Frimpong-Mensah, K., Darkwa, N. A. (2014a). Relationship between physico-mechanical properties, compacting pressure and mixing proportion of briquettes produced from maize cobs and sawdust. *Journal of Sustainable Bioenergy Systems*, 4(1), 50.

Mitchual, S. J., Frimpong-Mensah, K., Darkwa, N. A. (2014b). Evaluation of fuel properties of six tropical hardwood timber species for briquettes. *Journal of Sustainable Bioenergy Systems*, 4(1), 1.

Mitchual, S. J., Frimpong-Mensah, K., Darkwa, N. A., Akowuah, J. O. (2013c). Briquettes from maize cobs and *Ceiba pentandra* at room temperature and low compacting pressure without a binder. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 4(1), 38.

Neves, T.A., Protásio, T.P., Couto, A.M., Trugilho, P.F., Silva, V.O., Vieira, C.M.M. (2011). Avaliação de clones de *Eucalyptus* em diferentes locais visando à produção de carvão vegetal. *Pesqui Florest Bras.*, 31:273–83p.

Lima Rojas, L. (2013). Evaluación de la composición química y propiedades físicas de madera y corteza de cuatro coníferas para la producción de bioenergía (Doctoral dissertation, Universidad Autónoma de Nuevo León, México).

Liu, H., Li, Y. (2000). High-pressure densification of wood residues to form an upgraded fuel. *Biomass and Bioenergy* 19 p.177-86.

Ordoñez, O. (2015). Evaluación de la influencia de la formulación de combustibles sólidos densificados de aserrín de pino blanco (*Pinus pseudostrobus* Lindl), reciclado de carbón activado y almidón de yuca (*Manihot esculenta*), sobre las propiedades fisicoquímicas y fisicomecánicas de los combustibles sólidos densificados en general. Tesis de pregrado en Facultad de Ingeniería. Universidad de San Carlos de Guatemala.

Oliveira, L.H., Barbosa, P.V.G., Lima, P.A.F., Yamaji, F.M., Sette Júnior, C.R. (2017). Aproveitamento de resíduos madeireiros de *Pinus* sp. com diferentes granulometrias para a

produção de briquetes. Revista de Ciências Agrárias, v.40, p.683-691. DOI: <http://dx.doi.org/10.19084/RCA17010>.

Pérez-Pérez, J. E., Carrillo-Parra, A., Rutiaga-Quñones, J. G., Bustamante-García, V., Garza-Ocañas, F. (2016). Efecto del tipo de material, presión y temperatura en la densidad de briquetas de residuos industriales de tres especies del género Pinus. *Ciencia Nicolaita*, (68), 80-89p.

Petroff, G., Doat, J. (1978). Pyrolyse des Bois Tropicaux Influencia de la Composition Chimique des Bois sur les Produits de Distillation. *Bols et Foret des Tropiques*. N° 177.

de Paula Protásio, T., Alves, I. C. N., Trugilho, P. F., Silva, V. O., Baliza, A. E. R. (2011). Compactação de biomassa vegetal visando à produção de biocombustíveis sólidos. *Pesquisa Florestal Brasileira*, 31(68), 273p.

Rajaseenivasan, T., Srinivasan, V., Qadir, G. S. M., Srithar, K. (2016). An investigation on the performance of sawdust briquette blending with neem powder. *Alexandria Engineering Journal*, 55(3), 2833-2838p.

Rahman, A. N. E., Aziz Masood, M., Prasad, C. S. N. Venkatesham, M. (1989). Influence of size and shape on the strength of briquettes. *Fuel Processing Technology*, 23, 185-195p.

Rivera, J. D. L., Valdivia, C. E. C., Camas, J. U. R., Aguilera, E. A. R., Reyes, N. R. O., Cruz, L. D. L. Á. M. (2015). Evaluación de los parámetros físicos y químicos de las briquetas obtenidas con la maquina briquetadora construida en FAREME stelí. *Revista Científica de FAREM-Estelí*, (16), 3-14p.

Rodríguez, L. B., Rionda, R. A., Félix, F. C., Ríos, S. B., Miranda, B. H., Hernández, M. G. (2018). Balance Nacional de Energía.

Santiago, P., Guevara, C., Espinoza, M. (2013). Manual de transformación de la madera: Proyecto de utilización industrial y mercado de diez especies maderables potenciales de bosques secundarios y primarios residuales. *Lima, PE. Ministerio de Agricultura. Dirección General Forestal y de Fauna Silvestre (DGFFS)*, 30.

Sánchez, E., B, Pasache, M., y E, García, M. Sánchez, E. A., Pasache, M. B., García, M. E. (2014). Development of Briquettes from Waste Wood (Sawdust) for Use in Low-income Households in Piura, Peru. In *Proceedings of the World Congress on Engineering* Vol. 2, 2-4p.

Severs, W., Degler, H., Miles, J. (2007). La producción de energía mediante vapor, aire o gas. (B. G. Ing. Jose, A cura di) Barcelona, España: Reverté.

Silva, D.A., Nakshima, G.T., Barros, J.L., Da Roz, A.L., Yamaji, F.M. (2015). Caracterização De Biomassas Para a Briquetagem. *Rev. Floresta*, 45:713–722p.

Sitkel, G. (1986). Mechanics of agricultural materials. United States.

Soares, L. D. S., Moris, V. A. D. S., Yamaji, F. M., Paiva, J. M. F. D. (2015). Utilização de resíduos de borra de café e serragem na moldagem de briquetes e avaliação de propriedades. *Matéria (Rio de Janeiro)*, 20(2), 550-560p.

Souza, F. (2014). Avaliação da qualidade de briquetes produzidos com seis biomassas agroflorestais por métodos não destrutivos. Universidade de Brasília.142p.

Stahl. R., Henrich, E., Gehrmann, H. J., Vodegel, S. Koch, M. (2004). Definition of a standard biomass, RENEW - Renewable fuels for advanced power trains.

Téllez-Sánchez, C., Ochoa-Ruiz, H G., Sanjuán-Dueñas, R., Rutiaga-Quñones, J. G. (2010). Componentes químicos del duramen de *Andira inermis* (W. Wright) DC. (*Leguminosae*). *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*. 16(1): 87-93p.

Tirado Jijón, P. A. (2015). *Estudio de compactación de la cáscara de nuez para mejorar la calidad de briquetas de biomasa* (Bachelor's thesis, Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica. Carrera de Ingeniería Mecánica).

UNE-EN 17225-3. (2014). Biocombustibles sólidos. Especificaciones y clases de combustibles. Parte 3: clases de briquetas de madera. AENOR. España. 8p.

UNE-EN 14774-2. (2010). Biocombustibles sólidos. Determinación del contenido de humedad. Método de secado en estufa. Parte 2: Humedad total. Método simplificado. AENOR. España. 9p.

UNE-EN 14775. (2010). Biocombustibles sólidos. Método para la determinación del contenido de cenizas. AENOR. España. 10p.

UNE-EN 14918. (2011). Biocombustibles sólidos. Determinación del poder calorífico. AENOR. España. 60p.

UNE-EN 18123. (2016). Biocombustibles sólidos. Determinación del contenido en materia volátil. AENOR. España. 12p.

Velázquez, B. (2019) “Caracterización de biomasa sólida” [Material de Aula]. Proceso de producción de biomasa agrícola y forestal para el uso energético y sus implicaciones logísticas, 20 mayo 2019, UNAM campus Morelia.

Yamaji, F.M.; Vendrasco, L.; Chrisostomo, W.; Flores, W. de P. (2013). Análise do comportamento higroscópico de briquetes. *Energia na Agricultura* 28: 11-15. DOI: <https://doi.org/10.17224/EnergAgric.2013v28n1p11-15p>.