



Efecto de la intemperización y proceso en las características físicas, mecánicas y energéticas de briquetas

Weathering and process effects on physical, mechanical and energy characteristics of briquettes

Artemio Carrilo-Parra¹, Esteban Contreras Ortiz², Fortunato Garza-Ocañas^{2*}, Maginot Ngangyo Heya³ y José Guadalupe Rutiaga-Quiñones⁴

Abstract:

Forest industries produce sawdust waste that is not used and which may accumulate for years, becoming a risk of fire and a potential source of pollution. The main objectives of this study were to compare the energy properties between fresh sawdust and weathered sawdust from *Pinus pseudostrabus* wood and determine the physical and mechanical properties of briquettes made from both types of sawdust. The sawdust was characterized according to the particle size distribution, moisture content, volatile material, ash, and fixed carbon, in accordance with European standards UNE-EN14774-3 and UNE-EN14775. The briquettes were produced in a laboratory machine (LIPPEL) at pressures of 10-15 MPa and temperatures of 50, 70 and 90 °C. The quality of the briquettes was determined by proximal analysis, and by their physical and mechanical properties. The mean values and standard errors were calculated for all the variables of each type of sawdust, pressure and temperature. Data were statistically analyzed as a randomized complete block, and variance analyses were conducted to determine the existence of statistical differences ($p < 0.05$) between treatments. When statistical differences were found, Tukey tests were performed. The weathered sawdust showed the best energy properties, as it exhibited the lowest moisture content (9.12 %) and the highest fixed carbon (13.84 %); however, it had the highest percentage of ash (0.84 %). The briquettes with the best quality were obtained by using fresh sawdust at a pressure of 15 MPa and a temperature of 70 °C.

Key words. Weathering sawdust, solid biofuels, ash content, density, higher heating value, *Pinus pseudostrabus* Lindl.

Resumen:

Las industrias forestales generan residuos de aserrín que son subutilizados, frecuentemente estos se acumulan durante años, lo que puede propiciar incendios y contaminación. Los objetivos de la presente investigación fueron comparar las propiedades energéticas entre el aserrín fresco e intemperizado de la madera de *Pinus pseudostrabus*, y determinar algunas propiedades físicas y mecánicas de briquetas elaboradas a partir de ellos. El aserrín se caracterizó según su distribución granulométrica, contenido de humedad, material volátil, cenizas y carbono fijo, de acuerdo con las normas europeas UNE-EN14774-3 y UNE-EN14775. Las briquetas se elaboraron en una máquina marca LIPPEL a presiones de 10 y 15 MPa, y temperaturas de 50, 70 y 90 °C; su calidad se determinó mediante análisis proximales, propiedades físicas y mecánicas. Los valores medios y errores estándares se calcularon a las variables: tipo de aserrín, presión y temperatura. Los datos se analizaron estadísticamente como bloques completos al azar y se realizaron análisis de varianza para determinar la existencia de diferencias estadísticas ($p < 0.05$) entre tratamientos. Cuando las hubo, se hicieron pruebas de Tukey. El aserrín intemperizado 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 %). Las briquetas con mejor calidad se obtuvieron cuando se utilizó aserrín fresco a 15 MPa de presión y temperatura de 70 °C.

Palabras clave. Aserrín intemperizado, biocombustibles sólidos, contenido de ceniza, densidad, poder calorífico, *Pinus pseudostrabus* Lindl.

Fecha de recepción/Reception date: 15 de marzo de 2018

Fecha de aceptación/Acceptance date: 28 de septiembre de 2018

¹Instituto de Silvicultura e Industria de la Madera, Universidad Juárez del Estado de Durango. México.

²Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma de Nuevo León. México. Correo-e: fortunatofgo@gmail.com

³Facultad de Ciencias Biológicas, Universidad Autónoma de Nuevo León. México.

⁴Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. México.

Introducción

La densificación de la biomasa es un pretratamiento que permite reducir el volumen y homogenizar el material, para después usarlo más eficientemente como combustible (Filbakk *et al.*, 2011).

La producción global en el año 2014 de productos densificados como *pellets* fue un poco más de 24 Mt, con Europa como el principal productor, con alrededor de 62 %, seguido por América del Norte con 34 % (Purohit y Chaturvedi, 2016).

Por otra parte, durante los aprovechamientos forestales y la industria forestal se generan residuos que son subutilizados, los cuales consisten en ramas y puntas de árboles, astillas, costeras y aserrín. García *et al.* (2015) señalan que el potencial energético de los residuos industriales corresponde a 3.5 % de la producción total potencial de México, de 1 713 PJ (petajoules), que equivale a generar, de ese residuo, 59.9 PJ. No obstante, estos no se utilizan eficientemente, y en la mayoría de las ocasiones son acumulados por años en áreas cercanas a los sitios de transformación (Oyedepo *et al.*, 2014; Ekhuemelo *et al.*, 2016). Lo anterior resulta de la falta de mercado o de la lejanía de los centros de transformación (Walker, 2013).

La opción más empleada, es quemar los subproductos a cielo abierto, que representa serios problemas para el ambiente y los seres humanos, por el humo que se produce.

Una alternativa viable para el uso de esos subproductos, consiste en la elaboración de productos densificados, como *pellets* y briquetas. En algunas investigaciones se ha determinado el efecto del almacenamiento a cielo abierto en la calidad del aserrín de los *pellets* (Arshadi *et al.*, 2008); sin embargo, su impacto en la de las briquetas es limitado. Por lo anterior, los objetivos de la presente investigación fueron comparar las propiedades energéticas entre el aserrín fresco y el intemperizado de la madera de *Pinus pseudostrobus* Lindl., así como determinar la densidad, resistencia a la compresión, resistencia al impacto y poder calorífico superior de briquetas elaboradas con ambos tipos de aserrín.

Materiales y Métodos

Recolecta y caracterización del aserrín

A un año de intemperización se recolectó aserrín de *Pinus pseudostrobus* en el aserradero del ejido La Luz, localizado en el municipio Iturbide, Nuevo León, México. El material fresco se obtuvo después de aserrar trozas. Ambos tipos de aserrín se acondicionaron a 65 % de humedad relativa y 20 °C, hasta alcanzar peso constante. Se determinó el porcentaje de partículas retenidas en cada uno de los tamices de número 4, 6, 8, 20 y 40; asimismo se obtuvo la distribución normal del tamaño de partículas, con el procedimiento *Kolmogorov-Smirnov* (Razali y Wah, 2011). Los análisis proximales (contenido de humedad, material volátil, cenizas y carbono fijo) y densidad a granel del aserrín se hicieron de acuerdo a las normas ASTM D 1762 – 84 (2001), UNE-EN-14774 (UNE-EN, 2010) y UNE-EN-15149-2 (UNE-EN, 2011).

Elaboración de briquetas

Las briquetas se elaboraron en una máquina briqueteadora de laboratorio, de orientación vertical de la marca *LIPPEL*®. El equipo presenta una base sólida, con un cilindro de 20 mm de diámetro y termostato integrado que permite modificar la temperatura, dos pistones que aplican la presión y facilitan la extracción de la briqueta. Cada una se elaboró con 200 cm³ de aserrín; las presiones fueron de 10 y 15 MPa, y las temperaturas de 50, 70 y 90 °C, para cada tratamiento se hicieron cinco briquetas de 3.3 cm de diámetro y 8.0 cm de longitud.

Caracterización de las briquetas

La densidad se determinó conforme a la norma UNE-EN-16127 (UNE-EN, 2012). Las mediciones se efectuaron después de 48 horas de preparadas, para que la briqueta se estabilizara y que el efecto de dilatación no afectara los resultados (Križan *et al.*, 2015).

La resistencia a la compresión se obtuvo al aplicar una carga a lo largo de la briqueta, conforme a lo establecido por Borowski y Hycnar (2013) y la norma ASTM D 143-83 (1994) (Ecuación 1). El valor registrado fue la fuerza hasta el punto de ruptura de la

briqueta; las pruebas se desarrollaron en una máquina universal *SHIMADZUC*, con una capacidad de 100 KN.

$$RC = L_f \quad (1)$$

Donde:

RC = Resistencia a la compresión

L_f = Fuerza al punto de falla

La resistencia al impacto se determinó por el número de piezas que se formaron al dejar caer cada briqueta, por tres ocasiones al suelo de una altura de dos metros (Chaiklangmuang *et al.*, 2008; Rajaseenivasan *et al.*, 2016) (Ecuación 2).

$$RI = NP \quad (2)$$

Donde:

RI = Resistencia al impacto

NP = Número de piezas formadas

El poder calorífico del aserrín y de las briquetas se calculó con la ecuación desarrollada por Cordero *et al.* (2001), que relaciona el porcentaje de carbono fijo y el de material volátil (Ecuación 3).

$$PCS = 0.3563 CF + 0.1755 MV \quad (3)$$

Donde:

PCS = Poder calorífico superior (KJ kg⁻¹)

CF = Carbono fijo (%)

MV = Material volátil (%)

Análisis estadísticos

La normalidad de los datos de las variables se determinó con la prueba de *Kolmogorov-Smirnov* (Razali y Wah, 2011). Las variables en porcentaje se transformaron, antes de realizar los análisis estadísticos, con la raíz cuadrada del arcoseno (Steel y Torrie, 1960). Se utilizó un diseño factorial ($2 \times 2 \times 3$), en el que las fuentes de variación fueron: a) tipo de aserrín, b) presión y c) temperatura. Cada tratamiento tuvo cinco repeticiones.

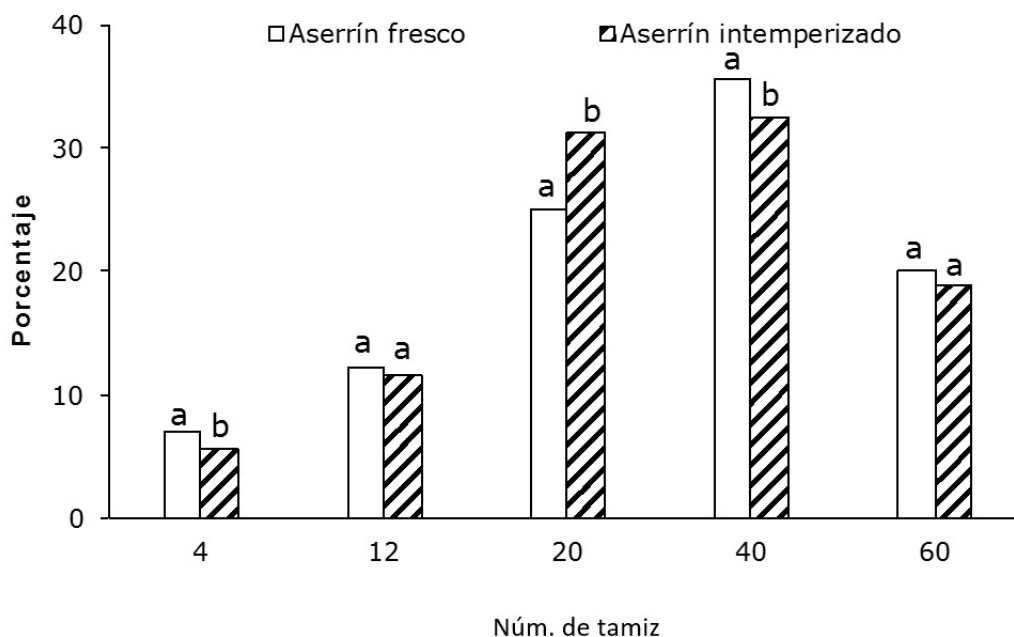
A los datos con distribución normal se les aplicó un análisis de varianza para determinar la existencia de diferencias estadísticas entre tratamientos ($p < 0.05$); cuando se presentaron, se realizaron pruebas de *Tukey*. Si la distribución no fue normal, se llevó a cabo la prueba de *Kruskal Wallis*. Todos los análisis estadísticos se efectuaron con el paquete R 3.1.2 (Bolker, 2012).

Resultados y Discusión

Tamaño de partícula

Los porcentajes de partículas entre los dos tipos de aserrín en los tamices 4, 20 y 40 fueron diferentes estadísticamente (Figura 1). El aserrín fresco presentó valores más altos en los tamaños de partículas de los tamices 4 y 40. De acuerdo con Žandeckis *et al.* (2014), partículas en el intervalo de 0.1 a 0.85 mm generan productos de mayor calidad. Grover y Mishra (1996) indican que se requieren partículas de tamaño menor para incrementar la adhesión con las más grandes. No obstante, la resistencia mecánica de las briquetas elaboradas está en función del equilibrio en la proporción entre partículas pequeñas con las de mayor tamaño.





Barras seguidas por la misma letra en cada tamiz, no difieren estadísticamente a un nivel de 95 % de probabilidad para la prueba de comparación de medias de *Tukey*.

Figura 1. Porcentaje del aserrín fresco e intemperizado de los tamices de 4 (4.76 mm), 12 (1.68 mm), 20 (0.84 mm), 40 (0.42 mm) y 60 (0.35 mm).

Análisis proximales

El contenido de humedad fue inferior en el aserrín intemperizado (Cuadro 1), lo que indica que en condiciones similares de acondicionamiento, este absorbe menos humedad debido a la histéresis y emisión de oxígeno durante el almacenaje (Alakoski *et al.*, 2016). Aunque en ambos tipos de aserrín, el contenido de humedad corresponde al intervalo de 6.39 a 12.4 % establecido por Ghaffar *et al.* (2015) y Žandeckis *et al.* (2014) para elaborar briquetas de calidad, pero es inferior a 15 % considerado por Grover y Mishra (1996).

Cuadro 1. Contenido de humedad, material volátil, cenizas y carbono fijo de aserrín fresco e intemperizado de *Pinus pseudostrobus* Lindl.

Aserrín	Contenido de humedad (%)	Material volátil (%)	Cenizas (%)	Carbono fijo (%)
Fresco	9.83±0.13 a	75.74±0.90 a	0.24±0.04 b	14.19±0.92 a
Intemperizado	9.12±0.12 b	73.72±0.78 a	0.83±0.05 a	16.33±0.83 a

Valores seguidos por la misma letra en cada columna, no difieren estadísticamente a un nivel de 95 % de probabilidad para la prueba de comparación de medias de *Tukey*.

El material volátil en el aserrín fresco coincide con el establecido por Brito y Barrichelo, (1982) citado por Hansted *et al.* (2016), de 75 a 85 %; mientras que, el intemperizado fue ligeramente inferior.

Respecto al contenido de ceniza, el porcentaje en el aserrín intemperizado fue superior estadísticamente ($p < 0.05$) que en el fresco, esto por la concentración de elementos inorgánicos durante el almacenaje y manipulación (Thek y Obernberger, 2012; Correa-Méndez *et al.*, 2014). El porcentaje de ceniza es un factor importante para considerar durante la combustión a temperaturas altas por la formación de escoria en las calderas (Alakoski *et al.*, 2016). Un valor de 0.83 %, como el registrado en el aserrín intemperizado rebasa el límite (0.50 %) aceptado para la producción de briquetas (ÖNORM, 2000). En cambio, para el aserrín fresco, el resultado fue similar a lo citado por Correa-Méndez *et al.* (2014) para *Pinus leiophylla* Schiede. ex Schltidl. & Cham., *P. montezumae* Lamb. y *P. pseudostrobus*.

El porcentaje de carbono fijo en las briquetas elaboradas con ambos tipos de aserrín no registró diferencias estadísticas significativas, el valor en las briquetas de las dos fuentes de biomasa fue mayor al señalado por Freitas *et al.* (2016).

Briquetas

Análisis proximales. El menor contenido de humedad (6.63 %) se registró en las briquetas elaboradas con aserrín fresco, presión de 15 MPa y 70 °C (Cuadro 2). La interacción tipo de aserrín:temperatura evidenció diferencias estadísticas significativas ($P < 0.001$) (Cuadro 3). A mayor contenido de humedad, la pérdida de energía aumentó durante la combustión por la evaporación del agua, lo cual redujo el poder calorífico del material (Onyenanu *et al.*, 2015). Un bajo contenido de humedad también es deseable para reducir la pudrición por hongos, así como el desmoronamiento en el transporte.

Cuadro 2. Análisis inmediatos de briquetas elaboradas con aserrín fresco e intemperizado de *Pinus pseudotrobus* Lindl. a diferentes condiciones de temperatura y presión.

Presión (Mpa)	Temperatura (°C)	Contenido de Humedad (%)	Material volátil (%)	Cenizas (%)	Carbono fijo (%)
Aserrín fresco					
10	50	9.41±0.15 a	78.62±0.23 cd	1.02±0.13 a	10.96±0.23 c
	70	6.76±0.16 c	79.76±0.34 abcd	0.87±0.05 ab	12.62±0.23 ab
	90	7.15±0.14 bc	80.87±0.24 ab	0.88±0.10 ab	11.10±0.31 bc
15	50	9.34±0.16 a	78.75±0.45 bcd	0.90±0.09 ab	11.01±0.37 c
	70	6.63±0.06 c	78.52±0.28 cd	0.77±0.05 abc	14.07±0.29 a
	90	7.39±0.27 bc	79.43±1.11 abcd	0.73±0.07 bc	11.56±0.20 bc
Aserrín intemperizado					
10	50	7.72±0.15 b	80.98±0.32 a	0.28±0.05 e	11.03±0.36 c
	70	7.48±0.09 bc	81.01±0.27 a	0.26±0.05 e	11.25±0.20 bc
	90	8.92±0.21 a	78.52±0.26 cd	0.62±0.03 cd	11.94±0.28 bc
15	50	7.14±0.14 bc	80.26±0.32 abc	0.28±0.01 e	12.32±0.40 bc
	70	7.86±0.16 b	80.47±0.48 abc	0.42±0.21 de	11.25±0.28 bc
	90	8.86±0.42 a	77.77±0.13 d	0.77±0.07 abc	12.62±0.47 ab

Valores seguidos por la misma letra en cada columna, no difieren estadísticamente a un nivel de 95 % de probabilidad para la prueba de comparación de medias de *Tukey*.

Cuadro 3. Análisis de varianza de los análisis proximales de briquetas elaborados con aserrín fresco e intemperizado de *Pinus pseudotrobus* Lindl. a diferentes condiciones de temperatura y presión.

Fuente de variación	Contenido de humedad		Material volátil		Cenizas		Carbono fijo	
	<i>F</i>	<i>p</i>	<i>F</i>	<i>p</i>	<i>F</i>	<i>p</i>	<i>F</i>	<i>p</i>
Tipo aserrín (A)	1.568	0.216	3.424	0.070	76.358	0.000	0.235	0.630
Temperatura (T)	1.705	0.197	2.174	0.146	7.793	0.007	1.964	0.167
Presión (P)	0.042	0.839	7.420	0.009	0.001	0.991	5.149	0.027
Interacción (A × T)	54.605	<0.001	33.935	<0.001	22.377	<0.001	0.135	0.715
Interacción (A × P)	0.083	0.775	0.091	0.764	3.711	0.060	0.002	0.967
Interacción (T × P)	0.764	0.386	1.367	0.248	0.144	0.706	0.025	0.874
Interacción (A × T × P)	0.048	0.827	1.311	0.257	0.485	0.489	0.609	0.439

F = Valor de F; *p* = Nivel de significancia.

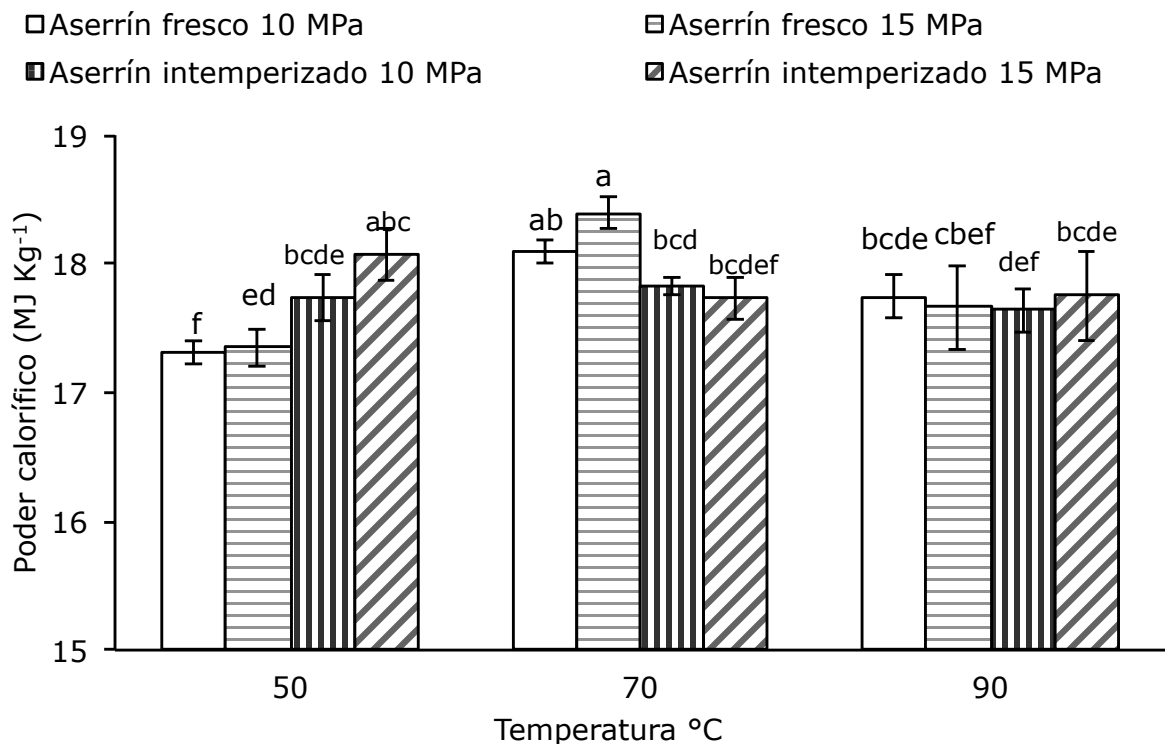
El porcentaje de material volátil (81.01 %) más alto se presentó en las briquetas elaboradas con aserrín intemperizado a una presión de 10 MPa, a 70 °C (Cuadro 2). La variable presión y la interacción tipo de aserrín:temperatura mostraron diferencias estadísticas significativas ($p < 0.05$) (Cuadro 3).

El índice de reacción es calculado a partir de material volátil/carbono fijo, e indica la posible reacción del material durante la pirolisis (Purohit y Chaturvedi, 2016); por lo que la briqueta más reactiva fue la que se preparó con material intemperizado a 10 MPa y 50 °C.

El contenido de ceniza tuvo diferencias estadísticas significativas ($p < 0.05$) en las variables tipo de aserrín, temperatura e interacciones tipo de aserrín:temperatura y aserrín: presión (Cuadro 3). El carbono fijo varió de 10.96 a 14.07 % (Cuadro 2), el cual es menor a 17.87 %, citado por Ballarin *et al.* (2010) para briquetas de aserrín de *Cupressus lusitanica* Mill.

Poder calorífico

El poder calorífico correspondió al intervalo de 17.35 a 18.40 MJ kg⁻¹, cuyo valor más alto fue para las briquetas elaboradas con aserrín fresco, temperatura de 70 °C y 15 MPa de presión (Figura 2). Los resultados concuerdan con el intervalo de 16.374 a 19.774 MJ kg⁻¹ citado por Onyenanu *et al.* (2015) para briquetas elaboradas con aserrín de diferente granulometría, menor a 19.678 MJ kg⁻¹ indicado por Cardoso *et al.* (2016) para briquetas de coníferas, y superiores a 14.68 MJ kg⁻¹ documentados por Rahaman y Salam (2017) para las de cáscara de arroz.



Barras seguidas por la misma letra en cada temperatura, no difieren estadísticamente a un nivel de 95 % de probabilidad para la prueba de comparación de medias de *Tukey*.

Figura 2. Poder calorífico de briquetas producidas con aserrín fresco e intemperizado de *Pinus pseudostrobus* Lindl. a diferentes condiciones de presión y temperatura.

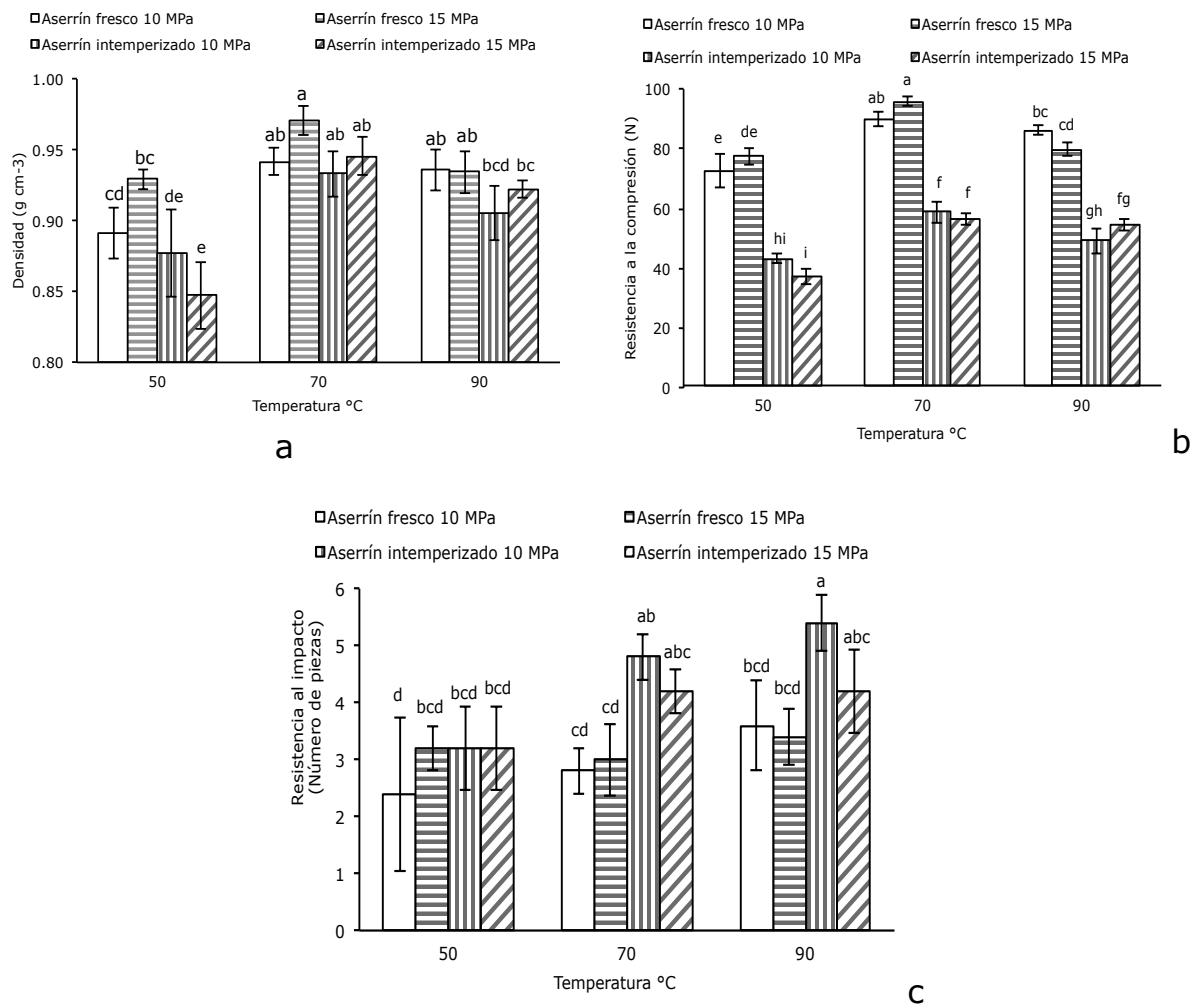
Densidad

La densidad de las briquetas presentó diferencias estadísticas significativas ($p < 0.05$) en las variables tipo de aserrín, temperatura e interacción tipo de aserrín:temperatura:presión (Cuadro 4). La mayor densidad se obtuvo con el aserrín fresco a temperatura de 70 °C y presión de 15 MPa (Figura 3a). En un ensayo similar realizado por Filbakk *et al.*, (2011), registraron *pellets* más densos preparados con aserrín fresco. Por otra parte, Silva *et al.* (2011) señalan que diferentes porcentajes en las dimensiones de partículas producen diferencias en la densidad de los biocombustibles. La mayor densidad también se atribuye a un porcentaje más grande de extractos en el aserrín fresco, lo que podría reducir la fricción durante el prensado, esto genera más movilidad de las partículas y mejor acomodo durante el prensado.

Cuadro 4. Análisis de varianza de las propiedades físicas y mecánicas de briquetas elaborados con aserrín fresco e intemperizado de *Pinus pseudotrobus* Lindl. a diferentes condiciones de temperatura y presión.

Fuente de variación	Densidad		Resistencia a compresión		Resistencia al impacto	
	<i>F</i>	<i>p</i>	<i>F</i>	<i>p</i>	<i>F</i>	<i>p</i>
Tipo aserrín (A)	14.948	<0.001	317.411	0.000	30.944	<0.001
Temperatura (T)	17.768	<0.001	17.712	0.000	22.548	<0.001
Presión (P)	2.188	0.145	0.016	0.899	0.710	0.403
Interacción (A × T)	2.194	0.145	0.559	0.458	3.452	0.069
Interacción (A × P)	2.166	0.147	0.418	0.521	4.802	0.033
Interacción (T × P)	0.046	0.832	0.000	0.997	5.157	0.027
Interacción (A × T × P)	5.676	0.021	5.804	0.020	0.043	0.837

F = Valor de F; *p* = Nivel de significancia.



a = Densidad; b = Resistencia a la compresión; c Resistencia al impacto.

Barras seguidas por la misma letra en cada tamiz, no difieren estadísticamente a un nivel de 95 % de probabilidad para la prueba de comparación de medias de *Tukey*.

Figura 3. Propiedades físicas y mecánicas de briquetas producidas con aserrín fresco e intemperizado de *Pinus pseudostrobus* Lindl. a diferentes condiciones de presión y temperatura.



Resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión de las briquetas presentó diferencias estadísticas ($p < 0.05$) entre el tipo de aserrín, temperatura e interacción tipo de aserrín:temperatura:presión (Cuadro 4). La Figura 3b muestra que las briquetas más resistentes a la compresión se elaboraron con aserrín fresco a 70 °C y 15 MPa. La resistencia más alta de las briquetas de aserrín fresco resulta de una mayor adhesión entre partículas en esta condición. Otro aspecto que afecta positivamente la resistencia es el porcentaje más grande de partículas menores a 0.42 mm (Tamiz Núm. 40). Al respecto, Mitchual *et al.* (2013) y Chin y Siddiqui (2000) señalan que el tamaño de partícula afecta inversamente la durabilidad mecánica de los productos densificados. Se considera que el porcentaje de tamaño de partícula pequeña mejora la resistencia mecánica hasta cierto límite, después del mismo, esta disminuye al reducir la resistencia al impacto.

Resistencia al impacto

La resistencia al impacto evidenció diferencias estadísticas entre el tipo de aserrín, temperatura e interacción temperatura:presión (Cuadro 4). Las briquetas de aserrín fresco a 50 °C y 10 MPa fueron más resistentes al impacto, al generar menor número de piezas.

Conclusiones

Algunos parámetros de calidad energética, como el alto contenido de material volátil, alto índice de reactividad y bajo contenido de cenizas hacen que el aserrín intemperizado sea mejor biocombustible, en comparación con el de aserrín fresco. Sin embargo, cuando ambos tipos de aserrín se densifican en igualdad de condiciones, las briquetas producidas con material intemperizado presentan, en algunos parámetros menor calidad que las producidas con aserrín fresco.

Los parámetros bioenergéticos positivos que presentan las briquetas de aserrín intemperizado son menor contenido de humedad, carbono fijo y de cenizas, y un mayor porcentaje de material volátil. Mientras que, los parámetros negativos son

menos densidad y menor resistencia a la compresión, resultado del menor porcentaje de partículas pequeñas y temperaturas de producción de 70 y 90 °C.

No obstante, el aserrín intemperizado que se almacena en las industrias forestales puede generar briquetas con parámetros bioenergéticos de calidad, como bajo contenido de cenizas, alta densidad y resistentes a la compresión, si existe una selección de partículas y se usa una temperatura de 70 °C y presiones de 10 o 15 MPa.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Fondo de Sustentabilidad Energética, a través del proyecto Sener Conacyt 2014 246911 Clúster de Biocombustibles Sólidos para la Generación Térmica y Eléctrica y al Conacyt proyecto 166444 por el apoyo para la realización de la presente investigación.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Contribución por autor

Artemio Carrilo-Parra: realización del proyecto en el que se desarrolló la investigación, apoyo en la elección de variables, estructura y redacción del escrito; Esteban Contreras Ortiz: desarrollo del trabajo de laboratorio, captura y análisis de la información y redacción del escrito; Fortunato Garza-Ocañas: apoyo en la estructura, redacción y revisión final del escrito; Maginot Ngangyo Heya: análisis estadístico y revisión general del escrito; José Guadalupe Rutiaga-Quiñones: revisión general del manuscrito.

Referencias

- Alakoski, E., M. Jämsén, D. Agar, E. Tampio and M. Wihersaari. 2016. From wood pellets to wood chips, risks of degradation and emissions from the storage of woody biomass—A short review.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (54):376–83.
- American Society of Testing Materials (ASTM). 1994. D 143-83. 1994. Standard methods of testing small clear specimens of timber.” Num. 9. ASTM. West Conshohocken, PA, USA. 31p.
- American Society of Testing Materials (ASTM). D-1762-84. Standard method for chemical analysis of wood charcoal. Philadelphia, PA, USA. 2p.
- Arshadi M., G. R., P. Geladi, S. A. Dahlqvist and T. Lestander. 2008. The influence of raw material characteristics on the industrial pelletizing process and pellet quality. *Fuel Processing Technology* 89:1442–47.
- Ballarin, A., P. Wagner, H. Almeida, P. Lara and R. Colenci. 2010. Portable hardness tester for timber classification. *In: WCTE 2010—World Conference on Timber Engineering*. 20-24 June. Trentino, Italy. 8p.
- Brito, J. O. de y L. E. G. Barrichelo. 1982. Aspectos técnicos da utilização da madeira e carvão vegetal como combustíveis. *Seminário de Abastecimento Energético Industrial Com Recursos Florestais* 2: 101–37.
- Bolker, B. 2012. R Development Core Team, bbmle: tools for general maximum likelihood estimation. R package version. Vol. 1. Num. 5.2. <https://cran.rproject.org/web/packages/bbmle/index.html> (11 de noviembre de 2018).
- Borowski, G. and Hycnar, J. J. 2013. Utilization of fine coal waste as a fuel briquettes. *International Journal of Coal Preparation and Utilization* 33(4): 194-204.
- Chaiklangmuang, S., S. Supa and P. Kaewpet. 2008. Development of fuel briquettes from biomass-lignite blends. *Chiang Mai Journal of Science* 35 (1):43–50.
- Chin, O. C. and K. M. Siddiqui. 2000. Characteristics of Some Biomass Briquettes Prepared under Modest Die Pressures. *Biomass and Bioenergy* 18(3): 223–28.

Cordero, T., F. Marquez, J. Rodriguez-Mirasol and J. J. Rodriguez. 2001. Predicting heating values of lignocellulosics and carbonaceous materials from proximate analysis. *Fuel* 80(11):1567–71. doi:[http://dx.doi.org/10.1016/S0016-2361\(01\)00034-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0016-2361(01)00034-5).

Correa-Méndez, F., A. Carrillo-Parra, J. G. Rutiaga-Quiñones, F. Márquez-Montesino, H. González-Rodríguez, E. Jurado-Ybarra and F. Garza-Ocañas. 2014. Moisture and inorganic substance content in pine timber products for use in pellets and briquettes. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 20(1):77–88. doi:[10.5154/r.rchscfa.2013.04.012](https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2013.04.012).

Ekhuemelo, D. O., O. Ademu and E. Terzungwue T. 2016. Physical and strength properties of bricks produced from portland cement and saw dust of *danielia oliverii* wood. *Pro Ligno* 12(4):53-60.

Freitas, A. J., A. C. S. Costa, A. C. Oliveira, B. L. C. Pereira, M. F. V. Rocha e A. C. O. Carneiro. 2016. Efeito da pressão e do tempo de compactação nas propriedades de briquetes de resíduos madeireiros de paricá. *Pesquisas Agrárias e Ambientais Nativa Sinop* 4(6): 380-385.

Filbakk, T., G. Skjevraak, O. Høibø, J. Dibdiakova and R. Jirjis. 2011. The influence of storage and drying methods for scots pine raw material on mechanical pellet properties and production parameters. *Fuel Processing Technology* 92(5): 871–878.

García, C. A., E. Riegelhaupt, A. Ghilardi, M. Skutsch, J. Islas, F. Manzini and O. Masera. 2015. Sustainable bioenergy options for Mexico: ghg mitigation and costs. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 43:545–52. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.11.062>.

Ghaffar, S., A. Nasir, M. Azhar A. and M. Usman F. 2015. *Journal of Agricultural Research* 53(4):555-565.

Grover, P. D. and S. K. Mishra. 1996. *Biomass Briquetting: Technology and Practices*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Bangkok, Thailand. 43p.

- Hansted, S. A. L., G. Tami N., M. Provedel M., H. Yamamoto and F. Minoru Y. 2016. Comparative analyses of fast growing species in different moisture content for high quality solid fuel production. *Fuel* 184:180–84.
- Cardoso J. R., M. A. Brand, P. D'angelo, A. Bayestorff e G. Allegretti. 2016. Análise da qualidade wnergética da falha de pinhão para a produção de briquetes analysis of the energy quality pinion fails to produce Bbriquettes. *Scientia Forestalis* 44(112): 821–29.
- Križan, P., M. Matú, Ľ. Šooš and J. Beniak. 2015. Behavior of beech sawdust during densification into a solid biofuel. *Energies* 8(7): 6382–98.
- Mitchual, S. J., K. Frimpong-Mensah and N. A. Darkwa. 2013. Effect of species, particle size and compacting pressure on relaxed density and compressive strength of fuel briquettes. *International Journal of Energy and Environmental Engineering* 4(1):1–6.
- Österreichisches Normungsinstitut (ÖNORM). 2000. ÖNORM 7135. Compressed wood or compressed bark in natural state, pellets and briquettes, requirements and test specifications. Österreichisches Normungsinstitut, Vienna, Austria. 10 p.
- Onyenanu, I. U., C. E. Ilochonwu and P. N. Atanmo. 2015. Measurement of energy value on different grain sizes of sawdust briquettes. *American Academic & Scholarly Research Journal* 7(5) 129–135.
- Oyedepo, O. J., S. D. Oluwajana and S. P. Akande. 2014. Investigation of properties of concrete using sawdust as partial replacement of sand. *Civil and Environmental Research* 6(2): 35–42.
- Purohit, P. and V. Chaturvedi. 2016. Techno-economic assessment of biomass pellets for power generation in India. Council on Energy, Environment and Water (CEEW) Working Paper. Thapar House. New Delhi, India. 42p.
- Rahaman, S. A. and P. A. Salam. 2017. Characterization of Cold Densified Rice Straw Briquettes and the Potential Use of Sawdust as Binder. *Fuel Processing Technology* 158:9–19.

- Rajaseenivasan, T., V. Srinivasan, G. S. Mohamed Q. and K. Srithar. 2016. An Investigation on the performance of sawdust briquette blending with neem powder. *Alexandria Engineering Journal* 55(3):2833–38.
- Razali, N. M. and Y. B. Wah. 2011. Power comparisons of shapiro-wilk, kolmogorov-smirnov, lilliefors and anderson-darling tests. *Journal of Statistical Modeling and Analytics* 2(1):21–33.
- Silva, G. G. D., S. Guilbert and X. Rouau. 2011. Successive centrifugal grinding and sieving of wheat straw. *Powder Technology* 208(2):266–70.
- Steel, R. G. D. and J. H. Torrie. 1960 *Principles and Procedures of Statistics*. Principles and Procedures of Statistics. McGraw-Hill. New York, NY USA. 633p.
- Thek, G. and I. Obernberger. 2012. *The pellet handbook: The production and thermal utilization of biomass pellets*. Routledge. London, UK. 549p.
- Una Norma Española-European Norm (UNE-EN). 2010. UNE-EN-14774. Biocombustibles sólidos. Determinación del contenido de humedad. Método de secado en estufa. Parte 3. H. Asociación Española de Normalización y Certificación. Madrid, España. 8p.
- Una Norma Española-European Norm (UNE-EN). 2011. UNE-EN-15149-2. Biocombustibles sólidos. métodos para la determinación de la distribución de tamaño de partícula. Parte 2: Método del tamiz vibrante con apertura de malla inferior o igual a 3.15 mm. Grupo 12. Asociación Española de Normalización y Certificación. Madrid, España. 14 p.
- Una Norma Española-European Norm (UNE-EN). 2012. UNE-EN-16127. Solid Biofuels—Determination of length and diameter of pellets. European Committee for Standardization: Brussels, Belgium. 11p.
- Walker, J. C. F. 2013. *Wood panels: Particleboards and fibreboards*. Primary Wood Processing: Principles and Practice. Springer. London, UK. p 419.480.
- Žandeckis, A., Fr. Romagnoli, A. Beloborodko, V. Kirsanovs, D. Blumberga, A. Menind and M. Hovi. 2014. Briquettes from mixtures of herbaceous biomass and wood: Biofuel investigation and combustion tests. *Chemical Engineering Transactions* 42:67–72.