

Evaluación de los parámetros de producción de pellets de *Pinus patula* para una estandarización de calidad en México

Patricia Aguilar-Sánchez ^{1,*}, Noel Carrillo-Ávila ¹, Artemio Carrillo-Parra ², Abraham Pérez-Martínez ¹, V. Daniel Núñez- Retana ²

¹ Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. San Martinito Tlahuapan, Puebla, México

² Universidad Juárez del Estado de Durango. Durango, México.

*aguilar.patricia@inifap.gob.mx; Tel.: +52 2223109960

Energías Renovables (Biomasa).

Resumen: Los pellets de madera es una tecnología desarrollada en la Unión Europea, Estados Unidos y otros países, como energía alterna para la industria y hogares; sin embargo, en México, está aún en desarrollo un método estandarizado. El presente estudio muestra los parámetros básicos para la producción de pellets de aserrín de *Pinus patula* con la finalidad de estandarizar el proceso y ser competente en calidad para aplicaciones comerciales y residenciales. Se determinaron los parámetros que determinan la clasificación para los densificados de acuerdo con la norma española UNE-EN ISO 17225-2:2014. Los resultados muestran que los pellets de *Pinus patula* tuvieron un contenido de humedad de 10.8 y 11.1 %, una compresión de 6:1, tamaño de partícula entre 6 y 12 mm. Además con una densidad aparente de 682 kg/m³, durabilidad mecánica de 96.8 %, un poder calorífico de 20.48 MJ/kg y un contenido de ceniza de 0.3 %. Se observó que los parámetros analizados para los pellets de *Pinus Patula* en general calificaron para ser competentes en calidad para aplicaciones comerciales y residenciales, según lo especificado en la norma internacional.

Palabras clave: Poder calorífico, materiales lignocelulósicos, cenizas, análisis fisicoquímicos, contenido de humedad.

Evaluation for the parameters of pellets production of *Pinus patula* for a quality standardization in Mexico

Abstract: Wood pellets are a technology developed in the European Union, the United States and other countries, fully identified as alternative energy for industry and homes, however, for Mexico, it is still under development to find a standardized method. This document shows the basic parameters for the production of pellets of *Pinus patula* sawdust in order to standardize the process for a competent market. The parameters that determine the classification for the densified ones were determined according to the Spanish standard UNE-EN ISO 17225-2: 2014. The results show that the *Pinus patula* pellets had a moisture content of 10.8 and 11.1 %, a ratio of compression of 6: 1, particle size between 6 and 12 mm, also with an apparent density of 682 kg/m³, mechanical durability of 96.8 %, a calorific value of 20.48 MJ/kg and ash content of 0.3 %. It was observed that the parameters for the pellets of *Pinus Patula* in general were suitable to be competent in quality for commercial and residential applications, as specified in the international standard.

Keywords: Calorific value, lignocellulosic materials, ashes, physico-chemical analysis, moisture content.

Introducción

Muchas tecnologías en el tema de bioenergía están maduras y están ampliamente implementadas, mientras que otras, que pueden desempeñar un papel importante para proporcionar una contribución en el tema de energía sostenible, aún no están completamente desarrolladas o comercializadas (IEA, 2017). Esto debido a que las características físicas y químicas de la amplia gama de materias primas de biomasa difieren notablemente de las de los combustibles fósiles y también dependen de los diversos métodos de recolección y cosecha utilizados, por lo que se debe contar con un proceso adecuado y optimizado (IEA, 2017; Abdoli *et al.*, 2018; Faraca *et al.*, 2019).

Una de las formas más comunes y eficientes de mejorar los parámetros negativos de la aplicación de biomasa, puede ser aumentando su densidad aparente mediante densificación mecánica o termoquímica. Generalmente, cualquier proceso que conduzca a una menor densidad física y mayor densidad de energía puede considerarse como un proceso de densificación, ya que hay un aumento en la densidad aparente de la biomasa (40–200 kg m³ a 600–800 kg m³) y mejora las propiedades de manejo, transporte, almacenamiento y combustión, así como lograr mejoras en la regularidad de la forma (Abdoli *et al.*, 2018). Los pellets son uno de los tipos más famosos de biocombustible sólido que tienen la mayor densidad entre la biomasa mecánicamente densificada. Son combustibles de forma cilíndrica uniforme de longitud inferior a 38 mm (1,5 pulgadas) y un diámetro de alrededor de 7 mm (0,3 pulgadas) (IEA, 2017;

Abdoli *et al.*, 2018). La clasificación de las materias prima para producción de pellets incluye a los cultivos energéticos, cultivos y residuos agrícolas, residuos forestales, cultivos acuáticos, residuos municipales y desechos de animales (Döring, 2013; Abdoli *et al.*, 2018; Zawislak *et al.*, 2020). La calidad de los pellets de madera está determinada por algunos parámetros clave, entre ellos el contenido de humedad, valor o poder calorífico, cantidad de finos o durabilidad mecánica, tamaño de partícula, contenido cenizas y el punto de fusión de las cenizas (Tarasov *et al.*, 2013). Estos parámetros forman parte de las especificaciones que se deben seguir para una clasificación en aplicaciones comerciales y residenciales de acuerdo con la normatividad ISO 17225-2:2014. Según la norma la clase de propiedad de un pellet se definirá como A1, A2 para madera virgen y residuos de madera que no fue tratada químicamente, A1 representa a los combustibles con bajo contenido de cenizas y nitrógeno, mientras que A2 tiene un poco más de ceniza y nitrógeno. La clase de propiedad B se refiere a los subproductos y residuos industriales de madera tratada químicamente y madera usada no tratada químicamente (UNE-EN-ISO 17225-2, 2014).

Actualmente la producción de pellet para energía en México se estima en 100 toneladas por año. La producción la realizan cuatro empresas localizadas en Veracruz, Guanajuato, Chihuahua y Durango; en donde las materias primas utilizadas son: residuos forestales, residuos de la industria alimenticia, esquilmos agrícolas y estiércol (Arias, 2018). Y aunque el mercado de pellets aún no está desarrollado, se dice que tienen un potencial prometedor. Ya que el potencial energético de mercado de los pellets de residuos forestales y agrícolas de disponibilidad inmediata varía de 131 a 233 Petajoules/año. Esto podría reemplazar la demanda de gas natural y gas licuado de petróleo para calefacción residencial y comercial. Además de que los pellets pueden mitigar potencialmente hasta un 18% de las emisiones de Gases de efecto invernadero de la producción de electricidad en México (Tauro *et al.*, 2018).

La materia prima disponible en México, se tiene que los recursos forestales que son accesibles son de 116 millones de toneladas métricas de base seca (tms) por año. Actualmente, se aprovechan 6 millones de tms para aserrar y 20 millones de tms para leña y carbón. El crecimiento remanente no aprovechado queda en el bosque y se pierde por mortalidad, descomposición e incendios (Agencia de la GIZ en México, 2015). En cuanto a la madera procesada en aserraderos, la mitad de esta queda como residuos en forma de costera, aserrín, cortezas y despunte. Evidentemente, los residuos de las industrias madereras son la biomasa forestal más barata y de más fácil acceso, porque están concentrados y sus costos de adquisición y extracción ya fueron pagados (Carrillo *et al.*, 2012; Agencia de la GIZ en México, 2015). Los desperdicios forestales han tomado mayor importancia como material energético, debido al balance neutro de nuevas emisiones de carbono, y también a la necesidad de algunos países por encontrar fuentes alternativas que sustituyan a los combustibles fósiles (Lauri *et al.*, 2014; Ayala-Mendivil and Sandoval, 2018). Se dice que el consumo energético de madera se incrementará en próximos años, ya que, en muchos países, las partes de madera que son utilizadas son los residuos leñosos, los cuales no compiten con la madera destinada para productos (Lauri *et al.*, 2014).

El *Pinus patula* es uno de los pinos nativos de Centroamérica; en otros países ofrece grandes ventajas para plantaciones industriales en zonas tropicales y subtropicales de Sudáfrica y América del Sur. Se distribuye naturalmente sobre las formaciones montañosas de la Sierra Madre Oriental, Eje Neovolcánico y la Sierra Madre de Oaxaca, en los estados de Nuevo León, Tamaulipas, Hidalgo. Puebla, Veracruz, Oaxaca, Querétaro, Distrito Federal, Tlaxcala. En los estados de Hidalgo, Puebla y Veracruz, se encuentran las poblaciones más grandes y con los mejores desarrollos. Existen plantaciones en Puebla, México, Michoacán y Distrito Federal (Pérez Miranda *et al.*, 2018). Es un árbol de 30 a 35 m de altura y de 50 a 90 cm de diámetro normal en individuos plenamente desarrollados. Su copa es abierta y redondeada, tronco recto y libre de ramas hasta una altura de 20 m, tiene típicamente una raíz profunda y poco extendida. Es considerada como una especie de rápido crecimiento (CONAFOR 2007; Pérez Miranda *et al.*, 2018).

Por lo que en este documento se muestran los parámetros básicos para la producción de pellets de aserrín de la especie de *Pinus patula* con la finalidad de proporcionar claridad en la clasificación de los combustibles sólidos, que sirva como una herramienta para llevarlos a un mercado eficiente y competente según la norma española UNE-EN ISO 17225-2:2014.

Materiales y Métodos

Preparación de la materia prima. La materia prima se colectó en aserraderos de la zona de Chignahuapan, Puebla. Se llevo a cabo un censo en los aserraderos de la zona, cerciorándose que el aserrín fuera *Pinus Patula*, la muestra se unifico y de ahí se tomaron tres muestras de aserrín. Estas muestras fueron trasladadas al laboratorio, en el INIFAP-

San Martinito, Puebla para limpiarla de algunas impurezas, pasándolas por un tamiz del número 30 y retenida en otro número 70, de tal forma que el promedio de longitud de partícula fue 385 μ y posteriormente se expandió para provocar la pérdida de humedad. El material fue monitoreado con un medidor de humedad portátil ZOEYEC modelo TK 100H hasta llegar a un contenido de humedad del 12 %, En dicha condición de humedad se realizaron las pruebas de pelletizado, además de 10 y 8 % en cuanto al contenido de humedad en el aserrín. Para la determinación de propiedades fisicoquímicas se utilizó la norma Tappi T 257.

Pelletización. El proceso de pelletización se llevó a cabo con un tamaño de partícula entre 6 y 12 mm, este material paso por un molino pelletizador del tipo matriz plana, con una relación de compresión de 6:30 mm (diámetro: longitud). Se sometió la materia prima al 8, 10 y 12 % de humedad en el molino, con ayuda de un rodillo se ejerció presión sobre la biomasa para producir los pellets.

La variable aleatoria principal fue la durabilidad mecánica, la cual se supone está relacionada con densidad aparente, dos de las características determinantes en la calidad del pellet. Hay otras variables que fueron evaluadas pero que se relacionan con el tipo de material base y no con el proceso mecánico de la elaboración de los pellets, dichas propiedades son el análisis elemental, porcentaje de cenizas totales, poder calorífico y porcentajes de lignina, celulosa y hemicelulosa.

Análisis fisicoquímicos

Calorimetría. Para la determinación de poder calorífico, se utilizó una bomba calorimétrica Modelo PARR 1266, donde se somete una cantidad de entre 0.5 a 0.9 g de muestra densificada en una bomba calorimétrica hasta lograr combustión total. Los registros se tomaron mediante las lecturas de poder calorífico, aumento de temperatura, temperatura de camisa, así como la medición de los restos del alambre, desarrollando cinco repeticiones por muestra. El ajuste de los resultados de calorimetría se lleva a cabo con la ecuación 1 y 2.

$$Ee = \frac{Pab * Cc}{At} \quad (1)$$

Donde: Ee, Energía Equivalente [$\text{Cal} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$]; Pab, Peso de la pastilla de ácido benzoico [g]; Cc, Calor de combustión [$\text{Cal} \cdot \text{g}^{-1}$]; At, Aumento de la Temperatura [$^\circ\text{C}$].

$$PCt = \frac{At * Ee}{Ppm} \quad (2)$$

Contenido de humedad. Esta se determinó para saber la humedad que contenía el material al procesarlo en las pruebas de calorimetría, por lo que estas se llevaron a la par de dicha prueba y para el cálculo se utilizó la ecuación número 3:

$$CH = \left(\frac{Ph - Po}{Po} \right) * 100 \quad (3)$$

Donde: CH (%), Contenido de humedad en por ciento; Ph, Peso de la madera con humedad h; Po, Peso anhidro de la madera.

Determinación de lignina. La determinación de la lignina se llevó a cabo según la Norma TAPPI 222 “Lignina insoluble en ácido para maderas y pulpas”, utilizando una concentración de ácido sulfúrico al 72%. El contenido de lignina se calculó de acuerdo con la siguiente ecuación 4:

$$Lignina [\%] = \frac{A * 100}{W} \quad (4)$$

Donde: A es el peso de la lignina (g) y W es el peso del espécimen de prueba (g).

Cenizas. El procedimiento se llevó a cabo de acuerdo con la norma Internacional UNE-EN ISO 18122. Se preparó un crisol aplicando energía térmica de 550 °C por 30 minutos, se enfrió y se registró el valor de la masa con precisión a 0.1 mg; posteriormente se le añadió aproximadamente 1 g de muestra molida, misma que fue tamizada en una malla 60 y se registró el valor exacto. Se colocó el crisol con muestra en una mufla aplicando calentamiento de 5 °C min⁻¹ hasta 250 °C, manteniendo esta temperatura durante 30 minutos. En seguida y sin sacar el crisol de la mufla se aplicó otro calentamiento de 10 °C min⁻¹ hasta 550 °C y manteniendo esta condición por 2 horas. Finalmente se extrae el crisol para un reposo de 10 minutos al exterior y finalmente se introduce en un desecador para un enfriamiento de 30 minutos, después de esto se pesa para registrar el nuevo valor de la masa. El cálculo para porcentaje de cenizas en la muestra fue con la siguiente expresión:

$$CC = \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} \times 100 \times \frac{100}{100 - CH} \quad (5)$$

Donde: CC es el contenido de cenizas [%]; m_1 , es la masa del crisol vacío [g]; m_2 , es la masa del crisol más la masa de la muestra fresca antes de la aplicación de estándar [g]; m_3 es la masa del crisol más la masa de la ceniza residual posterior a la aplicación de estándar [g]; CH, es el contenido de humedad de la muestra utilizada [%].

Análisis elemental. El análisis se realizó en un equipo AE 2400 series II CHONS Perkin Elmer, siguiendo la metodología recomendada por el proveedor: Se analizaron 2 ± 0.03 mg de cada biomasa (triplicado analítico), se utilizó como gas acarreador He (UAP) y una temperatura de oxidación de 975 C. Para la calibración del equipo se utilizó cistina.

Durabilidad mecánica. El procedimiento se siguió de acuerdo a la norma EN 15210-2. En donde 1.5 kg de muestra se sometió a golpes controlados durante 5 minutos mediante la colisión de los pellets entre ellos mismos y contra las paredes de una cámara de ensayo rotatoria definida. La durabilidad se calcula de acuerdo a la ecuación 6.

$$DU = \left(\frac{mA}{mE} \right) * 100 \quad (6)$$

Donde: DU, es la durabilidad mecánica (%); mE, es la masa de los pellets pre-cribadas antes del tratamiento en el tambor (g); mA es la masa de los pellets cribados después del tratamiento en el tambor (g).

Densidad a granel según se recibe. Se llevo a cabo bajo la norma UNE-EN 15103. Se utiliza un vaso con un volumen de 5 L y una relación diámetro-altura definida se llena con gránulos hasta que se forma un cono de desechos. Para garantizar la existencia de menos espacio vacío entre los gránulos, los gránulos se verterán desde una altura de 200–300 mm y el cilindro se dejará caer varias veces desde una altura de 150 mm sobre una superficie dura. Una vez que se haya eliminado el exceso de material y se hayan llenado las cavidades más grandes, se determina la masa de los gránulos de madera en el cilindro. La densidad aparente (BD) se calculará mediante la siguiente fórmula:

$$BD = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad (7)$$

Donde: BD, es la densidad aparente; m_1 , es la masa del recipiente vacío (kg), m_2 es la masa del recipiente lleno (kg) y V es el volumen neto del cilindro de medición (m³).

Resultados y Discusión

A continuación, se presentan y analizan los principales resultados de la biomasa peletizada proveniente de los residuos de aserrín de *Pinus patula* para determinar su calidad. En la figura 1 se muestran los análisis físicos y químicos realizados a la materia prima seleccionada. Se muestra que el contenido de humedad de la muestra fue de 10.8 %, porcentaje que esta ligeramente por encima de lo que indican las especificaciones de la norma; el porcentaje de cenizas, carbón hidrógeno fue de 0.3, 49.1 y 6.2 respectivamente, valores que están dentro de los valores que indica la UNE 17225-2. En cuanto al contenido de nitrógeno el resultado que se obtuvo fue por abajo del 0.3 % que se menciona en las especificaciones para los pellets de calidad. Y uno de los valores que no cumple es el del azufre, ya que se obtuvo 0.7 % en este estudio y la norma marca un valor menor o igual a 0.04 % para los pellets de madera. En un estudio de

Monedero (2015) se reportan los parámetros importantes para diferentes biomásas ha reportado valores para pino de 0.7 % en cenizas, 51.43 % en contenido de carbón, siendo estos resultados más altos en porcentaje a lo que se estipula en las especificaciones de la norma.; por otro lado, obtuvo un valor similar en el hidrógeno con 6.03 % y en cuanto al nitrógeno con 0.06 % y azufre con 0.02 %, estos estuvieron por debajo de los valores obtenidos en este estudio. En otro estudio el contenido de cenizas para pino se reportó con 0.87 %, siendo más alto al de este estudio (Brand *et al.*, 2021). Por otra parte, también se han reportado resultados en el análisis elemental de biomasa de *Pinus sp.* de entre 53.67-64.17 % para carbono, 4.81-5.70 % en hidrógeno, para el nitrógeno 0.78- 0.84 % y para el oxígeno 29.27- 39.02 %, los cuales también tienen similitud con los resultados obtenidos (Bustamante García *et al.*, 2017).

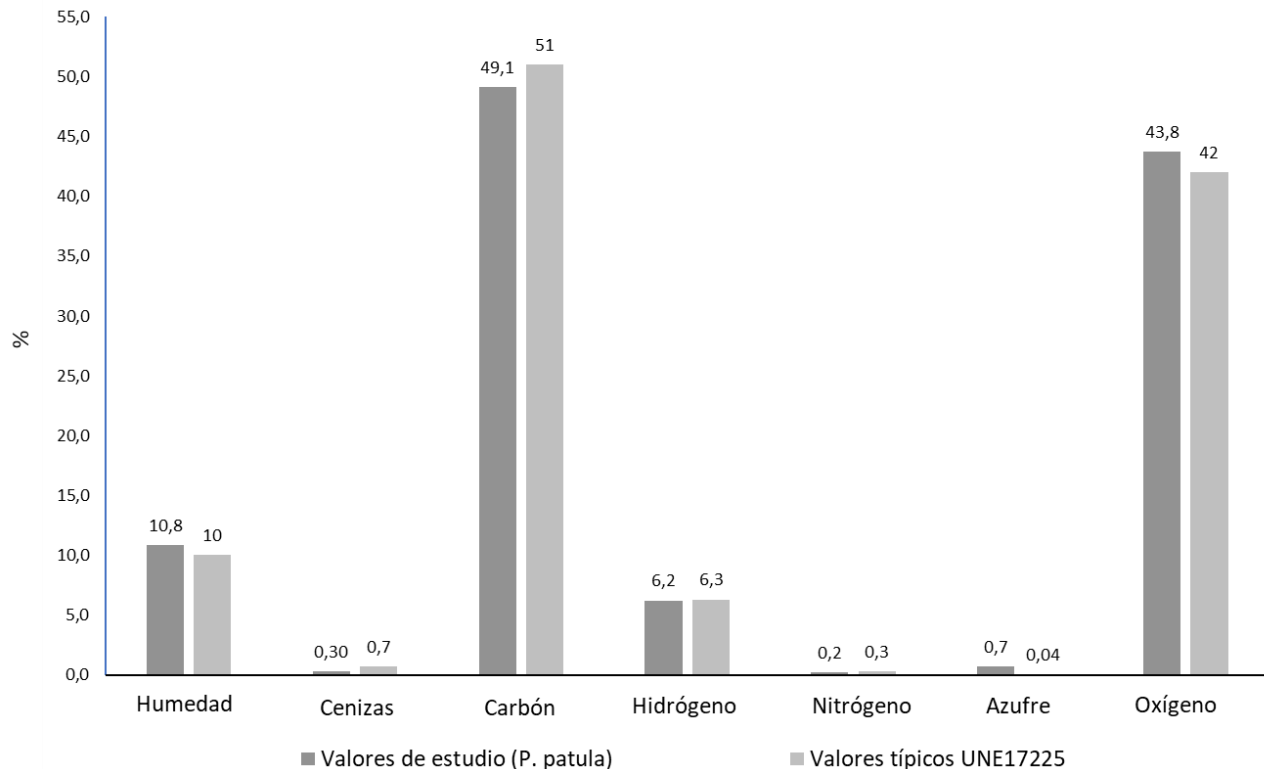


Figura 15. Valores promedio de los análisis fisicoquímicos de *Pinus patula* de este estudio Vs. Valores bajo las especificaciones de la norma UNE 17225-2:2014.

En la tabla 1 se observan otros parámetros que son fundamentales para la calidad de los pellets, uno de ellos es el poder calorífico (PC). El resultado de PC fue de 20.48 MJ/kg, siendo un valor más alto al de las especificaciones de la norma, que debe ser mayor o igual a 16.5 MJ/kg, sin embargo, en comparación con otras investigaciones, se ha encontrado que para este tipo de biomasa (género *Pinus*) los valores de PC se encuentran en un rango de 19.66 - 20.36 MJ/kg, por lo que el resultado obtenido entra dentro de este rango (Telmo and Lousada, 2011; Monedero, 2015; Brand *et al.*, 2021).

El contenido de lignina (CL), si bien no se encuentra dentro de las especificaciones de la UNE 17225-2, en este trabajo se consideró importante tomarlo en cuenta para mostrar que el pellet no contiene aglutinante extra, más que el propio, en este caso presento un 27.61 % de contenido de este componente químico principal. Este valor se encuentra dentro del rango obtenido para algunas coníferas que se han estudiado como posibles materiales para bioenergía, en donde han obtenido valores desde 24 % hasta 28.6 % (Bernabé-Santiago *et al.*, 2013; Honorato Salazar *et al.*, 2017; Abdoli *et al.*, 2018; Pegoretti Leite de Souza *et al.*, 2021)

Además, en la tabla 1 se muestran las especificaciones, así como la calidad del pellet correspondiente a la biomasa de *Pinus patula*, en donde se puede definir si las especies seleccionadas entran dentro de los parámetros para un pellet de calidad A1, A2 y B1. En este trabajo se encontró que la calidad de los pellets se refiere a una propiedad A1 en casi todos sus parámetros con excepción del azufre que fue un valor muy alto. De acuerdo con lo que menciona Bustamante

García (2017), el azufre podría causar efectos negativos al reducir la temperatura en el proceso, limita la expulsión de gases y al oxidarse se forma SO_3 . Sin embargo, se han reportado valores de azufre en otras maderas del género *Pinus* en un rango del 1.4- 6.2 % (Bernabé-Santiago et al., 2013).

Para que un pellet tenga calidad se deben de considerar los factores como la humedad, la cual debe estar entre un 10-15 % para tener una buena combustión (UNE 17225-2, 2014; Abdoli et al., 2018). El contenido de cenizas también es un gran influyente para el proceso de una buena combustión, además de que esta ceniza podría afectar con la formación de escoria y su temperatura de fusión también se vería afectada (Abdoli et al., 2018).

Tabla 1. Especificaciones de los pellets de madera de *Pinus patula* clasificados para aplicaciones comerciales y residenciales, de acuerdo a la norma UNE-EN-ISO 17225-2, 2014.

Clase de propiedad	Muestra: <i>Pinus Patula</i>	Calidad
Origen y fuente	Aserrín de aserradero	A1
Diámetro, Db y longitud, Lc	6 mm	-
Humedad, M	10.80 %	A1
Aditivos	Ninguno	-
Contenido de Lignina	27.61 %	-
Cenizas, CC	0.30 %	A1
Nitrógeno, N	0.21 %	A1
Azufre, S	0.70 %	B
Poder calorífico neto, PC	20.48 MJ/kg	A1
Densidad a granel, BD	682.66 kg/m ³	A1
Durabilidad mecánica, DU	96.8%	A1

Las propiedades como densidad a granel (BD) y la durabilidad mecánica (DU) en este trabajo resultaron de 682.66 kg/m³ y 96.8 % respectivamente, estos valores permiten que su calidad sea calificada como A1. Los estándares indican que estos valores deben estar para BD mayor o igual a 600 kg/m³ y para DU mayor o igual a 96.5 (UNE-EN-ISO 17225-2, 2014; Abdoli et al., 2018).

Conclusiones

El poder calorífico (20.48 MJ/kg) del aserrín de *Pinus patula* resulto superior a lo registrado en estudios previos con *Pinus*, variables importantes para comercializar los pellets, mientras que las cenizas fue menor al especificado por la norma (0.3 %). El contenido de lignina (27.61 %) mostró ser un aglutinante natural para lograr un buen densificado cumpliendo con la norma internacional. Finalmente, se observó que los pellets de *Pinus patula* calificaron como idóneos para combustible y competente en calidad para aplicaciones comerciales y residenciales. El contenido de azufre fue alto a lo especificado en la norma internacional, sin embargo esta es una característica propiamente natural de la madera, ya que esta no tuvo tratamiento previo. Considerar una reducción en el contenido de azufre conlleva a tratamientos químicos que generarían un gasto energético, insumos y posibles daños al medio ambiente.

Bibliografía

- Abdoli, M.A., Golzary, A., Hosseini, A., and Sadeghi, P. (2018). Wood Pellet as a Renewable Source of Energy (Cham: Springer International Publishing).
- Agencia de la GIZ en México. (2015). Tecnologías de aprovechamiento de biomasa forestal para energía en México Programa Energía Sustentable en México. Viabilidad y recomendaciones generales para su selección. 20.
- Arias, Ch. T. (2018). Situación actual y escenarios para el desarrollo de biocombustibles sólidos en México hacia 2024 y 2030. Red Temática de Bioenergía A. C. 22.
- ASTM D1103. (1977). Method of test for Alph- Cellulose in Wood. ASTM International. 60th Edition. 4 p.
- Ayala-Mendivil, N., and Sandoval, G. (2018). Bioenergía a partir de residuos forestales y de madera. Madera y Bosques 24.
- Bernabé-Santiago, R., Ávila-Calderón, L.E.A., and Rutiaga-Quiñones, J.G. (2013). Componentes químicos de la madera de cinco especies de pino del municipio de Morelia, Michoacán. MYB 19.
- Brand, M.A., Mariano Rodrigues, T., Peretti da Silva, J., and de Oliveira, J. (2021). Recovery of agricultural and wood wastes: The effect of biomass blends on the quality of pellets. Fuel 284, 118881.
- Bustamante García, V., Carrillo Parra, A., Prieto Ruíz, J.Á., Corral-Rivas, J.J., and Hernández Díaz, J.C. (2017). Química de la biomasa vegetal y su efecto en el rendimiento durante la torrefacción: revisión. RMCF 7, 5–24.

- Carrillo, A. N., Fuentes, L. M. E., Aguilar, S. P., Flores, V. R., Ordóñez, P. C. Buendía, R. E. (2012). Uso de los residuos forestales en la producción de bioenergía. Folleto técnico Núm. 71. INIFAP- CIRGOC. Puebla, México. 30 p.
- CONAFOR. (2007). Pinus patula- Ficha técnica para la reforestación <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/ver.aspx?articulo=975&grupo=13> (Fecha de consulta: 13 de agosto 2021)
- Döring, S. (2013). Power from Pellets. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. 226 p.
- Faraca, G., Boldrin, A., and Astrup, T. (2019). Resource quality of wood waste: The importance of physical and chemical impurities in wood waste for recycling. Waste Management 87, 135–147.
- Honorato Salazar, J.A., Apolinar Hidalgo, F., and Colotl Hernández, G. (2017). Composición lignocelulósica de Pinus ayacahuite Ehrenb. ex Schltdl., P. leiophylla Schlecht. & Cham. y P. herrerae Martínez. RMCF 7, 047–056.
- International Energy Agency (IEA). (2017). Technology Roadmap: Delivering Sustainable Bioenergy. 94.
- Lauri, P., Havlík, P., Kindermann, G., Forsell, N., Böttcher, H., and Obersteiner, M. (2014). Woody biomass energy potential in 2050. Energy Policy 66, 19–31.
- Monedero, E. (2015). Pellet blends of poplar and pine sawdust: Effects of material composition, additive, moisture content and compression die on pellet quality. Fuel Processing Technology 9.
- Pegoretti Leite de Souza, H.J., Muñoz, F., Mendonça, R.T., Sáez, K., Olave, R., Segura, C., de Souza, D.P.L., de Paula Protásio, T., and Rodríguez-Soalleiro, R. (2021). Influence of lignin distribution, physicochemical characteristics and microstructure on the quality of biofuel pellets made from four different types of biomass. Renewable Energy 163, 1802–1816.
- Pérez Miranda, R., Moreno Sánchez, F., González Hernández, A., and Arreola Padilla, V. (2018). Escenarios de la distribución potencial de Pinus patula Schltdl. et Cham. y Pinus pseudostrabus Lindl. con modelos de cambio climático en el Estado de México. RMCF 4, 073–086.
- Rowell, R.M., R. Pettersen, J.S. Han, J.S. Rowell y M.A. Tshabalala. (2005). Cell Wall Chemistry. In: R.M. Rowell, ed. Handbook of wood chemistry and wood composites. CRC Press. Boca Raton, Florida, EUA. p:35-74.
- Telmo, C., and Lousada, J. (2011). Heating values of wood pellets from different species. Biomass and Bioenergy 35, 2634–2639.
- Tauro, R., García, C.A., Skutsch, M., and Masera, O. (2018). The potential for sustainable biomass pellets in Mexico: An analysis of energy potential, logistic costs and market demand. Renewable and Sustainable Energy Reviews 82, 380–389.
- Tarasov, D., Shahi, C., and Leitch, M. (2013). Effect of Additives on Wood Pellet Physical and Thermal Characteristics: A Review. ISRN Forestry 2013, 1–6.
- Technical Association for the Pulp and Paper Industries. (1998). Acid-insoluble lignin in wood and pulp. TAPPI Test Method T 222 om-88. TAPPI Press. Atlanta, Georgia. USA. 3 p.
- Technical Association for the Pulp and Paper Industries. (1998). Sampling and Preparing Wood for Analysis. TAPPI Test Method T 257. TAPPI Press. Atlanta, Georgia. USA. 5 p
- UNE- EN 15210-1. (2010). Biocombustibles sólidos, determinación de la durabilidad mecánica de pellets y briquetas. Parte 1: Pellets. AENOR. 12 p.
- UNE-EN ISO 17225-2. (2014). Biocombustibles sólidos, especificaciones y clases de combustibles. Parte 2: clases de pélets de madera. AENOR. 14 p.
- UNE-EN ISO 18122. (2015). Biocombustibles sólidos. Determinación del contenido de cenizas. AENOR .10 p.
- Zawiślak, K., Sobczak, P., Kraszkiewicz, A., Niedziółka, I., Parafiniuk, S., Kuna-Broniowska, I., Tanaś, W., Żukiewicz-Sobczak, W., and Obidziński, S. (2020). The use of lignocellulosic waste in the production of pellets for energy purposes. Renewable Ene