

Valorización de pellets combustibles usando aserrín de 23 especies de maderas mexicanas

Valorization of fuel pellets using sawdust from 23 Mexican species

M.A. Ramírez-Ramírez¹, A. Carrillo-Parra², F. Ruiz-Aquino³, C. Luján-Álvarez⁴, J.J. Hernández-Solís⁵, N. Carrillo-Ávila⁶, L.F. Pintor-Ibarra¹, J.G. Rutiaga-Quiñones^{1*}

¹ Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, Av. Fco. J. Múgica s/n, Col. Felicitas del Rio, Morelia, Michoacán, C.P. 58040, México.

² Universidad Juárez del Estado de Durango, Instituto de Silvicultura e Industria de la Madera, Boulevard del Guadiana 501, Ciudad Universitaria, Durango, Durango, C.P. 34120, México.

³ Universidad de la Sierra Juárez, Instituto de Estudios Ambientales, Av. Universidad s/n, Ixtlán de Juárez, Oaxaca, C.P. 68725, México.

⁴ Universidad Autónoma de Chihuahua, Facultad de Ciencias Agrícolas y Forestales, Carretera km 2.5 Delicias, Chihuahua, C.P. 33000, México.

⁵ Tecnológico Nacional de México – Campus Instituto Tecnológico de la Zona Maya, Carretera Chetumal – Escárcega km 21.5, Ejido Juan Sarabia, Quintana Roo, C.P. 77695, México.

⁶ Instituto de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, San Martinito, Carretera Federal México – Puebla km 56.5, San Martinito, Municipio de Tlahuapan, Puebla, C.P. 74100, México.

*Correspondencia: rutiaga@umich.mx (José Guadalupe Rutiaga-Quiñones)

DOI: <https://doi.org/10.54167/tch.v19i1.1829>

Recibido: 29 de enero de 2025; Aceptado: 07 de marzo de 2025

Publicado por la Universidad Autónoma de Chihuahua, a través de la Dirección de Investigación y Posgrado.

Editor de Sección: Dr. Rubén Francisco González-Laredo

Resumen

Se ha observado un deterioro medioambiental debido al crecimiento económico enlazado al respectivo consumo de combustibles fósiles a nivel mundial, pero también se han desarrollado investigaciones sobre biocombustibles alternativos para intentar reducir el uso de energía fósil. En este sentido, la biomasa lignocelulósica, como energía renovable, juega un rol importante para la generación de biocombustibles sólidos densificados, procurando disminuir la utilización de hidrocarburos fósiles y promoviendo una energía ecoeficiente. En el presente estudio se elaboraron pellets combustibles con 23 muestras de aserrín obtenido en diferentes empresas forestales en 5 estados de la República Mexicana. Se realizó una evaluación física, mecánica y energética de los

pellets obtenidos. Se encontraron diferencias estadísticas significativas en las evaluaciones realizadas. Los resultados más relevantes variaron como sigue: contenido de humedad (2.69 – 8.73 %), densidad de partícula (1.08 – 1.32 g/cm³), densidad a granel (532 – 668 kg/m³), índice de resistencia al impacto (100 a 250 %), resistencia a la compresión (178 – 1542 N/mm), poder calorífico (15.42 – 20.85 MJ/kg) y densidad energética (9.32 – 13.07 GJ/m³). De acuerdo con la evaluación física, mecánica y energética, los pellets elaborados con las diferentes muestras de aserrín tienen en general buena calidad para su uso residencial local o industrial.

Palabras clave: madera de pino, maderas latifoliadas, biocombustibles densificados, biomasa residual, bioenergía

Abstract

Environmental deterioration has been observed due to economic growth linked to the global consumption of fossil fuels. However, research has also focused on developing alternative biofuels to reduce fossil energy consumption. In this context, lignocellulosic biomass plays a crucial role as a renewable energy in producing densified solid biofuels, promoting reduced dependence on fossil fuels, and supporting cleaner energy initiatives. In the current study, fuel pellets were made using 23 samples of sawdust collected from various forest mills across five states in Mexico. A physical, mechanical and energetic assessment of the obtained pellets was conducted, revealing significant statistical differences in the evaluations. The most notable results were as follows: moisture content ranged from 2.69 to 8.73 %; particle density varied from 1.08 to 1.32 g/cm³; bulk density was found to be between 532 and 668 kg/m³; impact strength index ranged from 100 to 250 %, compressive strength values varied from 178 to 1542 N/mm; calorific value was between 15.42 and 20.85 MJ/kg; and energy density ranged from 9.32 to 13.07 GJ/m³). Based on the physical, mechanical and energetic evaluations, the pellets produced from the diverse sawdust samples appear suitable for local residential or industrial use.

Keywords: Pine wood, hardwoods, densified biofuels, residual biomass, bioenergy

1. Introducción

En recientes décadas se ha observado un deterioro ambiental derivado del acelerado crecimiento económico con el respectivo consumo de energía fósil a nivel mundial (García *et al.*, 2016; Adebayo *et al.*, 2021; Yuping *et al.*, 2021), lo que también ha propiciado investigaciones y desarrollos sobre biocombustibles alternativos buscando la reducción del uso de combustibles fósiles (Østergaard *et al.*, 2020; Baasch, 2021). Estas acciones promueven el interés sobre la aplicación y adopción de prácticas y tecnologías más amigables, sustentables, respetuosas, limpias y renovables con el medio ambiente (Amador-Hernández, 2015; Rennkamp *et al.*, 2017; Qazi *et al.*, 2019).

En ese escenario, los recursos renovables, como la biomasa, destaca como fuente abundante y versátil, que puede tener alto significado en el proceso de cambio hacia una matriz energética más ecológica, e inversiones en este campo de las energías renovables podrían ayudar en la solución de esta problemática (Moran *et al.*, 2017; Wang *et al.*, 2017). La biomasa, referida como la materia prima orgánica no fosilizada proveniente de animales y plantas, supone una fuente renovable de energía,

ya que se puede transformar en los llamados biocombustibles (Velázquez-Martí, 2018). Existen diversas fuentes y tipos de biomasa generados principalmente de las actividades de producción marina, agrícola y forestal, y en esencia se pueden distinguir dos grandes grupos: biomasa derivada de plantaciones energéticas y la biomasa procedente de residuos o restos de las actividades antropogénicas (Velázquez-Martí, 2018). Las diferentes fuentes de biomasa tienen potencial para ser transformada y generar biocombustibles gaseosos, líquidos o sólidos (Velázquez-Martí, 2018).

La biomasa forestal usada sustentablemente puede generar energía neutra en carbono y puede ser potencialmente una solución para reemplazar a los combustibles fósiles (Hiloidhari *et al.*, 2019; Sulaiman *et al.*, 2020). Es conocido que a lo largo del proceso del procesamiento de la madera se generan grandes cantidades de subproductos lignocelulósicos, como aserrín, corteza y viruta. Además, existen algunas evidencias de que este material puede usarse para la generación de biocombustibles sólidos densificados (Morales-Máximo *et al.*, 2020; Bandara *et al.*, 2021) y al emplearlos en procesos de combustión pueden promover estrategias para la reducción de compuestos responsables del efecto invernadero (Morales-Máximo *et al.*, 2022; Nwabueze y Leggett, 2024).

En este contexto, el objetivo de este estudio fue la elaboración de biocombustibles sólidos densificados, *i.e.* pellets, usando aserrín de 23 especies de madera derivado del proceso de aserrío y recolectado en cinco estados de la República Mexicana. Este material de estudio fue previamente caracterizado para conocer sus propiedades físicas, químicas y energéticas (Rutiaga-Quñones *et al.*, 2020; Chávez-Rosales *et al.*, 2021; Gutiérrez-Acosta *et al.*, 2021) y se ha reportado la elaboración y caracterización de sus briquetas bicomcombustibles (Ramírez-Ramírez *et al.*, 2021; 2022). Los resultados obtenidos no solamente contribuyen al conocimiento científico de estos pellets, sino que también promoverían su uso local, ayudando a mitigar la degradación medioambiental, e impactando en la gestión sostenible de los recursos lignocelulósicos.

2. Materiales y métodos

Veintitrés muestras de aserrín, sin corteza y sin tratamiento químico, derivado del procesamiento primario de la madera se recolectaron como donación en varias compañías y ejidos forestales en cinco estados mexicanos: Quintana Roo [Ejido Noh-Bec (19°08'26" N, 88°09'23" O), Ejido Petcacab (19°17'00" N, 88°13'21" O) y Ejido Tres Garantías (18°11'21" N, 88°59'11" O)], Chihuahua [El Largo (29°41'12" N, 108°17'02" O), Agua azul (26°51'00" N, 106°56'24" O), Grupo Gazo (26°56'09" N, 105°38'12" O) y Multimaderas (26°55'41" N, 105°41'45" O)], Michoacán [Maderería Zamora (18°45'39" N, 103°11'21" O), Maderas Preciosas Don Jesús (18°48'08" N, 102°55'40" O) y Lázaro Cárdenas (18°44'34" N, 102°46'52" O)], Durango [Grupo Sezarik (25°03'15" N, 105°25'07" O), Maderas y Tarimas Alba (25°05'50" N, 105°26'44" O), Vencedores (24°25'41" N, 105°42'21" O), La Cañita (24°27'44" N, 106°01'32" O) y Pueblo Nuevo (23°46'36" N, 105°21'58" O)], y Oaxaca [Productora Comunal de Muebles Ixtlán (17°19'26" N, 96°28'37" O) y Aserradero Mapsi (17°19'25" N, 96°29'02" O)]. En la Tabla 1 se muestran datos sobre las maderas en proceso en las diferentes industrias y de las cuales se obtuvo el aserrín en orden de recolección. Para el caso de las maderas de pino y encino, no fue posible hacer una separación por especies debido a que la madera se transporta mezclada del bosque a la industria forestal. Para cada caso, aproximadamente 50 kg de aserrín fueron colectados. De cada pila de aserrín se eligió una al azar y de ella se tomaron muestras de aserrín de la parte alta, media y baja.

2.1 Producción de pellets

La humedad inicial de las muestras de aserrín recolectado varió ampliamente con valores reportados de 6.0 a 75.2 % (Rutiaga-Quñones *et al.*, 2020), pero previo al proceso de densificación, las muestras se dejaron secar al aire libre, hasta un contenido de humedad de aproximadamente 12 %. Todos los tipos de aserrín se usaron sin hacer separación por tamaño de partícula, debido a que un estudio previo con esta misma biomasa concluye que la granulometría de estos materiales es adecuada para la elaboración de biocombustibles sólidos densificados (Rutiaga-Quñones *et al.*, 2020). Se han reportado también resultados sobre las propiedades de briquetas obtenidas con estos mismos materiales (Ramírez-Ramírez *et al.*, 2021; 2022). Los pellets se produjeron utilizando una peletizadora industrial de discos planos (Marca ZSLP-R300), con canales de 8 mm de longitud y 6 mm de diámetro con una capacidad de 250 a 300 kg/h. Una vez enfriados los pellets fueron colocados en bolsas de plástico selladas herméticamente, hasta ejecutar los ensayos de caracterización.

2.2 Evaluación física, mecánica y energética de los pellets

Se determinó la humedad de los pellets en un horno de secado (Binder GmbH, model BD 260, Tuttlingen, Germany) por triplicado (EN 18134-3, 2015). De cada muestra de pellets, según su procedencia, se tomaron aleatoriamente 20 pellets para medir su diámetro y longitud usando un vernier (Sgarbossa *et al.*, 2015), además se midió su masa para calcular la densidad de partícula (Kocer y Kurklu, 2020). La densidad a granel se determinó por triplicado (EN ISO 17828, 2015).

El índice de resistencia al impacto se obtuvo a partir del número total de piezas de pellets producidas después de dejar caer al suelo cada uno de los 20 pellets, por procedencia, cuatro veces desde 1.8 m de altura (ASTM D440-68, 2007). La resistencia a la compresión en los pellets se efectuó por triplicado en una máquina universal (INSTRON 300 DX, Instron, Norwood, Ma, USA), con una capacidad de carga de 300 kN. Cada pellet se colocó horizontalmente en el probador de compresión, luego se aplicó la carga a una velocidad constante de 0.305 mm/min hasta que el pellet falló por agrietamiento (ASTM D2166-85, 2008).

El análisis proximal en los pellets sin humedad, comprendió la determinación por triplicado de cenizas (UNE-EN ISO 18122, 2023), material volátil (ASTM E872-82, 2013) y carbono fijo; este último fue calculado por diferencia de 100 menos contenido de cenizas y material volátil (Ramírez-Ramírez *et al.*, 2021). El poder calorífico superior de los materiales densificados se evaluó por triplicado (UNE-EN 14918, 2011), usando un calorímetro semiautomático (LECO AC600, MI, USA). La densidad energética de los pellets se determinó multiplicando su densidad por su poder calorífico.

2.3 Análisis estadístico

Para cada determinación, se efectuó un análisis de varianza y una prueba Tukey y los datos se analizaron con un nivel de confianza estadística de 95 %, usando el programa Statgraphics Centurion (Statgraphics Technologies, Inc., The Plains, VA, USA). Los resultados obtenidos se presentan con el valor medio y su desviación estándar ($\pm$).

3. Resultados y discusión

3.1 Evaluación física de los pellets

En la Tabla 1 se observan los resultados del contenido de humedad de los pellets, que variaron de 2.69 a 8.73 %, con diferencias estadísticas significativas ($p \leq 0.05$). En concordancia con la norma ISO 17225-2 (2021), los resultados aquí obtenidos están por debajo del valor recomendado, por lo que podría garantizarse buena combustión (Hansen *et al.*, 2009) debido a que un menor contenido de humedad incrementa el poder calorífico de los combustibles (Aguilar-Sánchez *et al.*, 2022). Para pellets de pino se ha reportado 4.8 % de humedad (Núñez-Retana *et al.* 2019) y otros estudios reportan diversos valores en pellets elaborados con diversas biomásas lignocelulósicas (8.41 – 8.68 %) (Acampora *et al.*, 2021), (7.9 – 11.1 %) (Bandara *et al.*, 2021), (7.7 – 10.1 %) (Ilari *et al.*, 2021).

Tabla 1. Nombre de las maderas, procedencia y humedad de los pellets obtenidos

Table 1. Name of woods, origin and moisture content of pellets

Clave	Nombre científico	Nombre común	Procedencia	Contenido de humedad (%)
1	<i>Swartzia cubensis</i> (Britt. and Willson) Sandl.	Kátalox	Quintana Roo	8.73 ± 0.01^m
2	<i>Lysiloma latisiliquum</i> L. Benth.	Tzalam		6.37 ± 0.01^i
3	<i>Manilkara zapota</i> (L.) v. Royen	Chicozapote		5.21 ± 0.03^g
4	<i>Swietenia macrophylla</i> King	Caoba		3.43 ± 0.00^b
5	<i>Pinus</i> spp.	Pino	Chihuahua	4.63 ± 0.03^e
6	<i>Pinus</i> spp.	Pino		4.04 ± 0.01^c
7	<i>Pinus</i> spp.	Pino		5.89 ± 0.02^h
8	<i>Pinus</i> spp.	Pino		4.58 ± 0.02^{de}
9	<i>Pinus</i> spp.	Pino	Michoacán	4.78 ± 0.01^e
10	<i>Pinus</i> spp.	Pino		5.48 ± 0.05^h
11	<i>Pinus</i> spp.	Pino		2.69 ± 0.01^a
12	<i>Pinus</i> spp.	Pino		5.77 ± 0.04^h
13	<i>Pinus</i> spp.	Pino		4.54 ± 0.02^d
14	<i>Pinus</i> spp.	Pino	Durango	6.68 ± 0.05^j
15	<i>Pinus</i> spp.	Pino		6.48 ± 0.05^j
16	<i>Pinus</i> spp.	Pino		6.43 ± 0.03^i
17	<i>Quercus</i> spp.	Encino		5.08 ± 0.01^f
18	<i>Pinus</i> spp.	Pino		4.59 ± 0.03^{de}
19	<i>Pinus</i> spp.	Pino		6.87 ± 0.02^k
20	<i>Quercus</i> spp.	Encino		6.58 ± 0.01^j
21	<i>Pinus</i> spp.	Pino		6.02 ± 0.04^i
22	<i>Pinus</i> spp.	Pino	Oaxaca	7.17 ± 0.03^l
23	<i>Pinus</i> spp.	Pino		5.84 ± 0.03^h

Letras diferentes en la misma columna indica diferencia estadística significativa entre las muestras de pellets (Tukey, $p \leq 0.05$)

El diámetro de los pellets varió de 5.81 a 6.00 mm (Tabla 2), observándose diferencias estadísticas significativas ($p \leq 0.05$). El diámetro de la matriz del equipo es precisamente de 6.00 mm, pero suele haber ciertas variaciones. Por ejemplo, usando la misma peletizadora, se han reportado diámetros de 6.03 a 6.05 mm en pellets de aserrín de maderas tropicales (Carrillo-Parra *et al.*, 2018) y de 5.80 a 6.14 mm en pellets elaborados con aserrín de diversas biomásas lignocelulósicas (Carrillo-Parra *et al.*, 2021). El diámetro de los pellets aquí producidos satisface el requerimiento de la norma UNE EN 14961-6 (2012) de tener un valor de 6 ± 1 mm (Tabla 2).

La longitud de los pellets varió de 10.74 a 26.29 mm (Tabla 2) con diferencias estadísticas significativas ($p \leq 0.05$) que corresponde a los pellets de maderas de pino; los otros resultados de las maderas tropicales y de los encinos se encuentran dentro de este rango. Valores de 20.44 y 24.65 mm han sido reportados para pellets de aserrín de pino (Carrillo-Parra *et al.*, 2021). En el caso del aserrín de las maderas tropicales, los resultados variaron de 15.48 a 20.44 mm; mientras que se han reportado longitudes de 13.17 a 17.37 mm para pellets elaborados con aserrín de maderas tropicales (Carrillo-Parra *et al.*, 2018). Para los encinos, los valores aquí encontrados fueron de 15.77 y 25.46 mm; para pellets de aserrín de encino se han reportado longitudes de 26.23 y 33.69 mm (Carrillo-Parra *et al.*, 2021). Es común que en el proceso de densificado se obtengan diferentes longitudes (Michelena y Martín, 2008) y en este estudio los valores obtenidos cumplen con los requerimientos para pellets clase D06, según la norma UNE EN 14961-2 (2012).

El peso de los pellets varió de 0.33 a 0.88 g (Tabla 2), con diferencias estadísticas significativas ($p \leq 0.05$). Como era de esperarse, los resultados más bajos de peso corresponden a los pellets de menor longitud. Valores de 0.72 a 1.79 g se han reportado para pellets elaborados con diferentes tipos de biomasa lignocelulósica (Carrillo-Parra *et al.*, 2021).

La densidad de partícula varió de 1.08 a 1.32 g/cm³ (Tabla 1), con diferencias estadísticas significativas ($p \leq 0.05$). En los pellets de aserrín de pino, la densidad de partícula promedio fue de 1.17 g/cm³ (1.08 – 1.22 g/cm³), ligeramente menor al promedio de 1.25 g/cm³ reportada para pellets de aserrín de pino (Carrillo-Parra *et al.*, 2021). Mientras que para los pellets de encino el valor promedio fue de 1.20 g/cm³ (1.15 – 1.25 g/cm³), cercano a 1.29 g/cm³ reportado para pellets de aserrín de encino (Carrillo-Parra *et al.*, 2021). Para los pellets de aserrín de maderas tropicales, los resultados variaron de 1.14 a 1.32 g/cm³ con valor promedio de 1.21 g/cm³. Finalmente, la densidad de partícula de los pellets es cercana a los valores reportados (1.12 – 1.13 g/cm³) en el manual de pellets (Thek y Obernberger, 2012), los que se encuentran dentro del rango sugerido por Mostafa *et al.* (2019) que va de 1.0 a 1.4 g/cm³.

La densidad a granel varió de 532 a 668 kg/m³ con diferencias estadísticas significativas ($p \leq 0.05$), como se muestra en la Tabla 2. En algunas investigaciones se han dado a conocer diversos valores de densidad a granel para pellets de madera de pino. Por ejemplo, se han reportado valores de 574 a 677 kg/m³ (Sher *et al.*, 2017) y de 690 kg/m³ (García *et al.*, 2018). En general, para pellets de madera Bala-Litwiniak y Radomiak (2019) encontraron una densidad de 590 kg/m³, mientras que Park *et al.* (2019) reportan un valor de 667 kg/m³ y Stolarski *et al.* (2022) dan a conocer un valor de 569 kg/m³. Solamente 17 de las 23 muestras de pellets aquí estudiados, cuya densidad a granel es superior a 600 kg/m³, cumplen con la recomendación de la norma DIN 51731 (1996). La densidad a granel es inherente a la densidad básica del material lignocelulósico, humedad y tamaño de partícula, así como de otros aspectos relacionados con el proceso de fabricación como la presión aplicada y la temperatura alcanzada durante el densificado, que juega un rol importante en el manejo de estos biocombustibles densificados, así como en el costo logístico (Michelena y Martín, 2008).

Tabla 2. Evaluación física de los pellets elaborados de 23 fuentes de biomasa lignocelulósica**Table 2.** Physical evaluation of pellets produced from 23 lignocellulosic biomass sources

Clave	Procedencia	D (mm)	L (mm)	P (g)	DP (g/cm ³)	DG (kg/m ³)
1	Quintana Roo	5.81 ± 0.02 ^f	20.44 ± 9.51 ^{cdef}	0.62 ± 0.31 ^{de}	1.14 ± 0.08 ^{fgh}	593 ± 8.59 ^d
2		5.90 ± 0.00 ^e	15.48 ± 4.62 ^{fgh}	0.52 ± 0.18 ^{ef}	1.21 ± 0.07 ^{bcd}	643 ± 3.67 ^l
3		5.90 ± 0.00 ^e	20.11 ± 8.35 ^{bcd}	0.73 ± 0.33 ^{abc}	1.32 ± 0.07 ^a	668 ± 10.30 ^m
4		5.92 ± 0.06 ^d	16.42 ± 6.22 ^{fgh}	0.53 ± 0.24 ^{efg}	1.15 ± 0.09 ^{efg}	573 ± 8.58 ^b
5	Chihuahua	5.92 ± 0.05 ^d	11.28 ± 2.67 ^{klm}	0.34 ± 0.09 ^{ij}	1.10 ± 0.06 ^{hi}	590 ± 6.67 ^{c,d}
6		5.93 ± 0.07 ^{cd}	10.47 ± 2.97 ^m	0.33 ± 0.11 ^j	1.12 ± 0.07 ^{ghi}	601 ± 3.06 ^{d,e}
7		5.90 ± 0.02 ^e	11.90 ± 2.68 ^{klm}	0.39 ± 0.09 ^{hij}	1.20 ± 0.08 ^{cd}	606 ± 4.23 ^{e,f}
8		5.90 ± 0.00 ^e	10.74 ± 1.99 ^{lm}	0.35 ± 0.07 ^{ij}	1.18 ± 0.07 ^{def}	618 ± 11.60 ^{f,g,h,i}
9	Michoacán	5.92 ± 0.09 ^{cd}	13.58 ± 2.51 ^{hij}	0.44 ± 0.09 ^{fgh}	1.16 ± 0.05 ^{efg}	630 ± 2.69 ^{i,j,k}
10		5.93 ± 0.09 ^c	17.58 ± 3.91 ^{bcde}	0.58 ± 0.12 ^{cd}	1.20 ± 0.04 ^{cde}	614 ± 5.26 ^{f,g,h}
11		6.00 ± 0.00 ^{ab}	12.22 ± 2.20 ^{ijkl}	0.40 ± 0.08 ^{hi}	1.14 ± 0.06 ^{gh}	622 ± 1.97 ^{h,i}
12		6.00 ± 0.00 ^{ab}	13.00 ± 3.16 ^{ijk}	0.43 ± 0.12 ^{gh}	1.15 ± 0.08 ^{fg}	609 ± 7.32 ^{e,f,g}
13		6.00 ± 0.00 ^{ab}	15.60 ± 5.79 ^{ghi}	0.54 ± 0.22 ^{ef}	1.21 ± 0.07 ^{bcd}	639 ± 2.69 ^{k,l}
14		6.00 ± 0.00 ^{ab}	26.29 ± 7.90 ^a	0.88 ± 0.27 ^a	1.18 ± 0.05 ^{def}	612 ± 7.82 ^{e,f,g}
15		6.00 ± 0.00 ^{ab}	15.73 ± 5.28 ^{fgh}	0.54 ± 0.19 ^{de}	1.20 ± 0.08 ^{bcd}	635 ± 3.56 ^{j,k,l}
16		6.08 ± 0.16 ^a	21.38 ± 6.08 ^{ab}	0.67 ± 0.22 ^{bc}	1.08 ± 0.06 ⁱ	532 ± 2.24 ^a
17		6.00 ± 0.00 ^{ab}	15.77 ± 4.16 ^{efgh}	0.51 ± 0.15 ^{de}	1.15 ± 0.05 ^{fg}	581 ± 2.66 ^{b,c}
18		6.00 ± 0.00 ^{ab}	16.73 ± 4.57 ^{defg}	0.58 ± 0.17 ^{cde}	1.21 ± 0.06 ^{bcd}	618 ± 5.97 ^{f,g,h}
19		6.00 ± 0.00 ^{ab}	21.14 ± 7.18 ^{abc}	0.75 ± 0.28 ^{ab}	1.25 ± 0.06 ^b	627 ± 16.37 ^{i,j,k}
20		6.00 ± 0.00 ^{ab}	25.46 ± 8.94 ^a	0.88 ± 0.33 ^{ab}	1.22 ± 0.05 ^{bc}	626 ± 14.07 ^{i,j}
21		6.00 ± 0.00 ^{ab}	11.67 ± 1.89 ^{klm}	0.39 ± 0.07 ^{hi}	1.19 ± 0.07 ^{cde}	590 ± 6.17 ^{c,d}
22	Oaxaca	5.92	11.35	0.38	1.21	613

	$\pm 0.08^{cd}$	$\pm 1.55^{klm}$	$\pm 0.05^{hij}$	$\pm 0.06^{bc}$	$\pm 5.22^{f,g,h}$
23	5.99	14.47	0.50	1.22	619
	$\pm 0.06^b$	$\pm 4.30^{hij}$	$\pm 0.16^{efg}$	$\pm 0.06^{bc}$	$\pm 8.54^{g,h,i}$

D = diámetro; L = longitud; P = peso; DP = diámetro de partícula; DG = densidad a granel. Letras diferentes en la misma columna indica diferencia estadística significativa entre las muestras de pellets (Tukey, $p \leq 0.05$)

3.2 Evaluación mecánica de los pellets

El índice de resistencia al impacto varió de 100 a 215 % (Tabla 3), con diferencias estadísticas significativas ($p \leq 0.05$). Una investigación realizada en pellets de aserrín de pino da a conocer índices de 96.67 a 125 % (Núñez-Retana *et al.*, 2019), mientras que para maderas tropicales se encontraron valores de 177 a 160 % (Carrillo-Parra *et al.*, 2018).

Tabla 3. Evaluación mecánica de los pellets elaborados de 23 fuentes de biomasa lignocelulósica

Table 3. Mechanical evaluation of pellets made from 23 lignocellulosic biomass sources

Clave	Procedencia	IRI (%)	RC (N/mm)
1	Quintana Roo	100.00 ± 19.86^i	1542 ± 413.72^a
2		190.00 ± 75.39^{abc}	629 ± 133.05^{ab}
3		172.50 ± 67.81^{abcde}	861 ± 21.13^{ab}
4		133.75 ± 47.48^{fgh}	294 ± 30.51^{efg}
5	Chihuahua	176.25 ± 76.72^{abcde}	178 ± 9.54^i
6		166.25 ± 72.67^{cdefg}	220 ± 46.58^{ghi}
7		207.50 ± 78.26^{ab}	258 ± 29.74^{fgh}
8		182.50 ± 71.22^{abcd}	206 ± 21.73^{hi}
9	Michoacán	160.50 ± 76.39^{cdefg}	312 ± 77.16^{ef}
10		151.25 ± 56.47^{cdefg}	870 ± 170.99^{ab}
11		215.00 ± 79.63^a	208 ± 62.04^{ghi}
12		175.00 ± 76.95^{abcde}	293 ± 108.32^{efg}
13		168.75 ± 72.49^{abcde}	460 ± 19.50^{bc}
14	Durango	142.50 ± 43.75^{defg}	690 ± 33.00^{ab}
15		186.25 ± 79.25^{abcd}	301 ± 76.00^{efg}
16		167.50 ± 59.11^{abcde}	358 ± 6.56^{cde}
17		136.25 ± 61.49^{gh}	423 ± 35.25^{bcd}
18		115.00 ± 46.17^{hi}	334 ± 96.06^{def}
19		143.75 ± 59.53^{efg}	351 ± 10.53^{def}
20		147.50 ± 58.99^{defg}	509 ± 69.42^{bcd}
21		173.75 ± 78.42^{bcdef}	347 ± 29.46^{cdef}
22	Oaxaca	181.25 ± 83.06^{abcde}	222 ± 41.31^{ghi}
23		160.00 ± 75.39^{cdefg}	317 ± 70.95^{ef}

IRI = índice de resistencia al impacto; RC = resistencia a la compresión. Letras diferentes en la misma columna indica diferencia estadística significativa entre las muestras de pellets (Tukey, $p \leq 0.05$)

Las diferencias podrían atribuirse a la densidad de las maderas (Michelena y Martín, 2008). Por los índices aquí encontrados, se puede afirmar que los pellets pueden considerarse de buena calidad, ya que la norma ASABE (2006) refiere que pellets con índice mayor a 97.5 % son considerados biocombustibles de alta calidad por su buena adhesión, lo que permitiría su buen manejo y transportación; al contrario, podría esperarse mal manejo por desintegración del material densificado (Michelena y Martín, 2008).

Los resultados de la resistencia a la compresión (Tabla 3) presentaron diferencias estadísticas significativas ($p \leq 0.05$). Además de la longitud, diámetro y densidad de partícula, la resistencia a la compresión es otro de los criterios relevantes en la caracterización técnico-funcional de los pellets (Sette *et al.*, 2018). Los resultados de la resistencia a la compresión variaron de 178 a 1542 N/mm, y para pellets de aserrín de pino se han encontrado valores de 537 a 786 N/mm, mientras que para pellets de aserrín de encino se han dado a conocer resultados que van de 1142 a 1792 N/mm (Carrillo-Parra *et al.*, 2021). Estas diferencias pudieran explicarse por el tiempo y temperatura alcanzados en el proceso de densificación de los materiales.

3.2 Evaluación energética de los pellets

El contenido de cenizas varió de 0.40 a 3.85 % con diferencias estadísticas significativas ($p \leq 0.05$) como se aprecia en la Tabla 4. El contenido de sustancias inorgánicas en los pellets de aserrín de pino es menor a 1.0 %, mientras que en los de encino y de maderas tropicales se encontraron valores mayores, lo que es consistente con estudios recientes (Carrillo-Parra *et al.*, 2018; Rutiaga-Quñones *et al.*, 2020). En pellets elaborados con aserrín de maderas tropicales, se han reportado resultados de cenizas de 2.41 a 3.22 % (Carrillo-Parra *et al.*, 2018) que son comparables con los aquí obtenidos. Tomando en consideración el esquema de certificación sobre la calidad de los pellets elaborados con madera, los aquí obtenidos, cuyo valor de contenido de cenizas sea ≤ 0.7 % podrían alcanzar la calidad A1, los de contenido ≤ 1.2 % serían calidad A2 y los de ≤ 2.0 % podrían ser calidad B (Manual ENplus, 2015), esto en caso de exportación de los pellets. Sin embargo, visualizando el consumo local y sobre todo el rural, los pellets obtenidos podrían ser usados y las cenizas obtenidas podrían tener aplicación en el compostaje de materiales lignocelulósicos, evaluando la presencia de elementos pesados y su toxicidad.

El material volátil de los pellets varió de 80.94 a 92.47 % (Tabla 4) con diferencias estadísticas significativas ($p \leq 0.05$). En el caso de los pellets de maderas tropicales, los resultados variaron de 80.94 a 85.78 %, mayores a los reportados (72 – 79 %) para pellets de maderas tropicales (Carrillo-Parra *et al.*, 2018). Con relación a los pinos, el contenido de material volátil varió de 83.07 a 92.47 %, con cierta similitud a los resultados encontrados en pellets de aserrín de pino (83.9 – 85.21 %) (Carrillo-Parra *et al.*, 2021). Se estima que un valor de 82.8 % de material volátil es adecuado para pellets con fines comerciales (Chen *et al.*, 2015), por lo que de acuerdo con los resultados aquí obtenidos prácticamente todos los pellets cumplen con este parámetro. El material volátil es importante por su relación con los gases liberados en su combustión y afectan su desempeño y estabilidad física (Forero-Núñez *et al.*, 2015), siendo además un parámetro que se puede disminuir con un proceso de pirólisis controlado (Ruiz-Aquino *et al.*, 2019).

Tabla 4. Evaluación energética de los pellets elaborados de 23 fuentes de biomasa lignocelulósica**Table 4.** Energy evaluation of pellets produced from 23 lignocellulosic biomass sources

Clave	Procedencia	CE (%)	MV (%)	CF (%)	PC (MJ/kg)	DE (GJ/m ³)
1	Quintana Roo	2.18	81.86	15.96	17.68	10.48
		± 0.16 ^{abc}	± 0.94 ^h	± 0.81 ^a	± 0.46 ^{fghi}	± 0.41 ^{fghi}
2		3.85	80.94	15.21	16.84	10.84
		± 0.01 ^a	± 2.02 ^h	± 2.01 ^a	± 2.43 ^{ghij}	± 1.60 ^{efgh}
3		2.84	85.78	11.38	16.79	11.21
		± 0.25 ^{ab}	± 0.15 ^{fgh}	± 0.09 ^{abcd}	± 0.82 ^{ghij}	± 0.49 ^{defg}
4		2.73	85.39	11.88	16.25	9.32
		± 0.04 ^{ab}	± 1.05 ^{fgh}	± 1.02 ^{abc}	± 0.20 ^{ij}	± 0.18 ^k
5	Chihuahua	0.57	90.56	8.87	15.90	9.38
		± 0.26 ^{hij}	± 0.33 ^{ab}	± 0.59 ^{efgh}	± 0.43 ^{ij}	± 0.25 ^k
6		0.54	89.72	9.74	15.83	9.51
		± 0.13 ^{ij}	± 1.24 ^{abcd}	± 1.18 ^{cdef}	± 0.60 ⁱ	± 0.36 ^{ijk}
7		0.55	86.28	13.16	15.59	9.45
		± 0.13 ^{ij}	± 0.58 ^{efgh}	± 0.48	± 0.87 ⁱ	± 0.47 ^{jk}
8		0.62	83.07	16.31	19.38	11.98
		± 0.06 ^{ghi}	± 10.15 ^{defg}	± 1.19 ^{abc}	± 0.47 ^{abcde}	± 0.31 ^{abcd}
9	Michoacán	0.75	85.77	11.81	18.47	11.62
		± 0.06 ^{efg}	± 0.19 ^{fgh}	± 1.41 ^{abcd}	± 0.50 ^{cdefg}	± 0.35 ^{def}
10		0.40	90.67	8.93	19.78	12.14
		± 0.08 ⁱ	± 1.16 ^{ab}	± 1.13 ^{efgh}	± 0.99 ^{abcd}	± 0.70 ^{abcd}
11		0.56	89.91	9.54	18.81	11.70
		± 0.06 ^{ij}	± 1.17 ^{abc}	± 1.22 ^{defgh}	± 1.39 ^{cdef}	± 0.88 ^{de}
12		0.54	85.29	14.16	19.39	11.81
		± 0.09 ^{ij}	± 0.92 ^{gh}	± 1.00 ^{ab}	± 0.44 ^{bcde}	± 0.29 ^{bcde}
13		0.67	89.05	10.29	18.40	11.75
		± 0.06 ^{fgh}	± 1.26 ^{bcd}	± 1.20 ^{cdef}	± 0.55 ^{defg}	± 0.31 ^{bcde}
14	Durango	0.56	92.47	6.97	19.05	11.66
		± 0.03 ^{ij}	± 1.05 ^a	± 1.05 ^h	± 0.13 ^{bcdef}	± 0.21 ^{cde}
15		0.63	89.66	9.71	19.84	12.61
		± 0.05 ^{ghi}	± 0.82 ^{abcd}	± 0.77 ^{cdefg}	± 0.70 ^{abcd}	± 0.39 ^{ab}
16		0.90	88.95	10.15	19.53	10.39
		± 0.09 ^{cde}	± 1.16 ^{bcde}	± 1.24 ^{cdef}	± 0.48 ^{acbd}	± 0.29 ^{ghij}
17		2.65	88.32	9.02	19.75	11.47
		± 0.04 ^{ab}	± 1.09 ^{bcdefg}	± 1.07 ^{efgh}	± 0.16 ^{abc}	± 0.10 ^{defg}
18		0.82	91.96	7.22	20.36	12.58
		± 0.17 ^{ef}	± 0.84 ^a	± 0.80 ^{gh}	± 0.69 ^{ab}	± 0.53 ^{abc}
19		0.57	89.72	9.71	20.85	13.07
		± 0.02 ^{ij}	± 5.96 ^{bcdef}	± 1.95 ^{bcde}	± 0.21 ^a	± 0.46 ^a
20		1.22	89.13	9.66	18.09	11.31
		± 0.09 ^{bcd}	± 1.21 ^{bcde}	± 1.14 ^{cdef}	± 2.22 ^{efgh}	± 1.16 ^{defg}
21		0.83	90.65	8.52	16.32	9.64
		± 0.14 ^{def}	± 1.35 ^{ab}	± 1.50 ^{fgh}	± 0.74 ^{hij}	± 0.52 ^{ijk}
22	Oaxaca	0.85	88.38	10.45	16.73	10.26

	$\pm 0.13^{\text{def}}$	$\pm 0.95^{\text{bcdefg}}$	$\pm 0.82^{\text{cdef}}$	$\pm 0.33^{\text{ghij}}$	$\pm 0.20^{\text{ghijk}}$
23	1.20	87.95	10.84	15.42	9.56
	$\pm 0.06^{\text{bcd}}$	$\pm 4.00^{\text{cdefg}}$	$\pm 1.94^{\text{bcde}}$	$\pm 1.72^{\text{ij}}$	$\pm 1.18^{\text{hijk}}$

CE = cenizas; MV = material volátil; CF = carbono fijo; PC = poder calorífico; DE = densidad energética. Letras diferentes en la misma columna indica diferencia estadística significativa entre las muestras de pellets (Tukey, $p \leq 0.05$)

El carbono fijo varió de 6.97 a 16.31 % con diferencias estadísticas significativas ($p \leq 0.05$). Estos valores corresponden precisamente a las muestras de pellets elaborados con aserrín de pino (Tabla 4). Para los pellets elaborados con aserrín de maderas tropicales, los valores variaron de 11.38 a 15.96 % (Tabla 4), y prácticamente se ubican en el rango reportado para pellets elaborados con aserrín de algunas especies tropicales (12 – 21 %) (Carrillo-Parra *et al.*, 2018). Se han dado a conocer valores que van de 14.39 a 15.62 % en pellets de pino y de 15.15 a 17.37 % en pellets de encino (Carrillo-Parra *et al.*, 2021). Estos últimos valores son mayores a los aquí encontrados en las muestras de pellets de encino. En conocido que este parámetro tiene singular importancia en el proceso de combustión promoviendo mayor generación térmica cuanto más alto es el contenido de carbono fijo (Onochie *et al.*, 2017).

El poder calorífico superior (Tabla 4), presenta diferencias estadísticas significativas ($p \leq 0.05$), variando de 15.42 a 20.85 MJ/kg. En cuanto a las muestras de maderas tropicales, los resultados son ligeramente inferiores a los datos encontrados en pellets de aserrín de algunas maderas tropicales (17.8 – 19.64 MJ/kg) (Carrillo-Parra *et al.*, 2018). Con respecto a pellets de pino, se han publicado valores de 20.69 a 20.91 MJ/kg) (Carrillo-Parra *et al.*, 2021). Los valores aquí encontrados en los pellets de encino se ubican ligeramente por debajo de algunos datos reportados para pellets de aserrín de encino (19.98 – 20.38 MJ/kg) (Carrillo-Parra *et al.*, 2021). El poder calorífico constituye un parámetro obligatorio ha determinar al margen de la materia prima o vía de obtención del biocombustible (Pinilla *et al.*, 2022). Es de suma importancia en biocombustibles densificados y pellets con poder calorífico superior a 16.5 MJ/kg sugerido por la norma ISO 17225-2 (2021), por lo que pudieran sugerirse para uso residencial o industrial.

La densidad energética de los pellets varió de 9.32 a 13.07 GJ/m³ con diferencias estadísticas significativas ($p \leq 0.05$), como se aprecia en la Tabla 4. En el caso de las maderas tropicales, los resultados variaron de 9.32 a 11.21 GJ/m³; para los pellets de pino, de 9.38 a 12.61 GJ/m³; y para los de encino, los valores fueron cercanos entre sí (11.31 – 11.47 GJ/m³). La mayor proporción de los hallazgos registrados en esta parte se encuentran por debajo del límite inferior (12.0 – 14.5 GJ/m³) que ha sido reportado para pellets de pino (Peng *et al.*, 2015; García *et al.*, 2018).

4. Conclusiones

Usando aserrín de 23 especies de maderas colectado en el proceso de aserrío en cinco estados de la República Mexicana se elaboraron pellets y se llevó a cabo su evaluación física, mecánica y energética. Se encontraron diferencias estadísticas significativas en las evaluaciones realizadas. La humedad de los pellets fue menor al valor recomendado, por lo que se esperaría buena combustión. Respecto a la densidad de partícula obtenida, los pellets son considerados de buena calidad. Aproximadamente el 74 % de los pellets presentan una densidad superior a 600 kg/m³, valor

sugerido por la norma DIN. De acuerdo a la evaluación mecánica, los pellets pueden ser considerados de buena calidad. Solamente el 21 % de las muestras de pellets presentan un contenido de cenizas superior a 2.0 %, por lo que resto de ellos pudiera alcanzar al menos la clasificación B, de acuerdo al Manual ENplus. Por los resultados de material volátil, los pellets pueden considerarse aptos para uso comercial. Se encontró que el 74 % de los pellets tiene un poder calorífico mayor a 16.5 MJ/kg, recomendado por la norma ISO. Finalmente, de acuerdo a los resultados obtenidos, los pellets pudieran tener aplicación local, y podrían promover la disminución de la degradación medioambiental e impactar en la gestión sostenible de los recursos o biomasa lignocelulósica localmente.

Contribuciones de los autores

"Conceptualización, J.G.R.Q.; investigación, M.A.R.R.; recursos, J.G.R.Q., A.C.P., F.R.A., C.L.A., J.J.H.S., y N.C.A.; redacción-redacción del borrador original, M.A.R.R., A.C.P. y J.G.R.Q.; redacción-revisión y edición, J.G.R.Q., F.R.A. y L.F.P.I.; visualización, J.G.R.Q., L.F.P.I., F.R.A., J.J.H.S., C.L.A. y N.C.A.; supervisión, J.G.R.Q.; administración del proyecto, J.G.R.Q.; obtención de financiación, J.G.R.Q. Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito".

Agradecimientos

Nuestro agradecimiento a SENER-CONACYT (proyecto: FSE-SENER-2014-246911), a ejidos y empresas forestales por la donación del material lignocelulósico, así como a Axel Correa Ranguel por el apoyo en la preparación de los materiales densificados.

Conflicto de interés

Los autores declaran no tener algún tipo de conflicto de interés.

Nomenclatura

N	Newton
MJ	Megajoules
GJ	Gigajoules
kN	kilonewton
D	Diámetro
L	Longitud
P	Peso
DP	Densidad de partícula
DG	Densidad a granel
IRI	Índice de resistencia al impacto
RC	Resistencia a la compresión
CE	Contenido de ceniza

MV	Material volátil
CF	Carbono fijo
PC	Poder calorífico
DE	Densidad energética

5. Referencias

- Acampora, A., Civitarese, V., Sperandio, G., & Rezaei, N. (2021). Qualitative Characterization of the Pellet Obtained from Hazelnut and Olive Tree Pruning. *Energies* 14(14): 4083. <https://doi.org/10.3390/en14144083>
- Adebayo, T.S., Awosusi, A.A., Kirikkaleli, D., Akinsola, G.D., & Mwamba, M.N. (2021). Can CO₂ emissions and energy consumption determine the economic performance of South Korea? A time series analysis. *Environ Sci Pollut Res* 28: 38969–38984. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13498-1>
- Aguilar-Sánchez, P., Carrillo-Ávila, N., Carrillo-Parra, A., Pérez-Martínez, A., & Núñez- Retana, V.D. (2022). Evaluación de los parámetros de producción de pellets de *Pinus patula* para una estandarización de calidad en México. *Tendencias en Energías Renovables y Sustentabilidad* 1(1): 158–164. <https://doi.org/10.56845/terys.v1i1.166>
- Amador-Hernández, J.C. (2015). Ley de Transición Energética. Dirección General de Difusión y Publicaciones, México. <http://bibliodigitalibd.senado.gob.mx/handle/123456789/2315>
- ASABE Standards. (2006). S269.4: Cubes, pellets and crumbles definitions and methods for determining density, durability and moisture content. St. Joseph: *American Society of Agricultural and Biological Engineers*.
- ASTM D143. (2007). Standard methods of testing small specimens of timber. *ASTM International, West Conshohocken, PA, USA*.
- ASTM D2166–85. (2008). Standard test method of compressive strength of wood. *ASTM International, West Conshohocken, PA, USA*.
- ASTM D440–68. (2007). Standard test method of drop shatter test for coal. *ASTM International, West Conshohocken, PA, USA*.
- ASTM E872–82. (2013). Standard test method for volatile matter in the analysis of particulate wood fuels. *ASTM International, West Conshohocken, PA, USA*.
- Bala-Litwiniak, A., & Radomiak, H. (2019). Possibility of the Utilization of Waste Glycerol as an Addition to Wood Pellets. *Waste and Biomass Valorization* 10: 2193–2199. <https://doi.org/10.1007/s12649-018-0260-7>
- Bandara, J.C., Jaiswal, R., Nielsen, H.K., Moldestad, B.M.E., & Eikeland, M.S. (2021) Air gasification of wood chips, wood pellets and grass pellets in a bubbling fluidized bed reactor. *Energy* 233: 121149. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121149>
- Baasch, S. (2021). Energy transition with biomass residues and waste: Regional-scale potential and conflicts. A case study from North Hesse, Germany. *J. Environ. Policy Plan.* 23(2): 243–255. <https://doi.org/10.1080/1523908X.2021.1888701>

- Carrillo-Parra, A., Ngangyo-Heya, M., Colín-Urieta, S., Foroughbakhch, R., Rutiaga-Quñones, J.G., & Correa-Méndez, F. (2018). Physical, mechanical and energy characterization of wood pellets obtained from three common tropical species. *PeerJ* 6: e5504. <https://doi.org/10.7717/peerj.5504>
- Carrillo-Parra, A., Rutiaga-Quñones, J.G., Ríos-Saucedo, J.C., Ruiz-García, V.M., Ngangyo-Heya, M., Nava-Berúmen, C.A., & Núñez-Retana, V.D. (2021). Quality of Pellet Made from Agricultural and Forestry Waste in Mexico. *BioEnergy Research* 15, 977–986. <https://doi.org/10.1007/s12155-021-10327-8>
- Chávez-Rosales, J.S., Pintor-Ibarra, L.F., González-Ortega, N., Orihuela-Equihua, R., Ruiz-Aquino, F., Lujan-Álvarez, C., & Rutiaga-Quñones, J.G. (2021). Basic chemical composition of *Pinus* spp. sawdust from five regions of Mexico, for bioenergetic purposes. *BioResources* 16(1): 816-824. <https://doi.org/10.15376/biores.16.1.816-824>
- Chen, W.H., Peng, J., & Bi, X.T. (2015). A state-of-the-art review of biomass torrefaction, densification and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 44: 847-866. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.12.039>
- DIN 51731. (1996). Testing of solid fuels – Compressed untreated wood, requirements and testing. Deutsches Institut für Normung. Berlin.
- EN 18134–3. (2015). Biocombustibles Sólidos. Determinación del contenido de humedad. Método de secado en estufa. Parte 3: Humedad de la muestra para análisis general. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), Madrid, España.
- EN ISO 17828. (2015). Biocombustibles Sólidos. Determinación de la Densidad a Granel. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), Madrid, España.
- Forero-Núñez, C.A., Jochum, J., & Sierra, F.E. (2015). Effect of particle size and addition of cocoa pod husk on the properties of sawdust and coal pellets. *Ingeniería e Investigación* 35(1): 17–23. <https://doi.org/10.15446/ing.investig.v35n1.46157>
- García, C.A., Riegelhaupt, E., & Masera, O. (2016). Introducción. In: García-Bustamante, C.A., Masera, O. (Eds.) Estado del Arte de la Bioenergía en México. *Red Temática de Bioenergía (RTB) del CONACYT* (pp. 9–14). Imagia Comunicación: Guadalajara, Mexico.
- García, D.P., Caraschi, J.C., Ventorim, G., Viera, F.H.A., & Protásio, T.P. (2018). Comparative Energy Properties of Torrefied Pellets in Relation to Pine and Elephant Grass Pellets. *BioResources* 13(2): 2898-2906. <http://dx.doi.org/10.15376/biores.13.2.2898-2906>
- Gutiérrez-Acosta, J.M., Orihuela-Equihua, R., Pintor-Ibarra, L.F., González-Ortega, N., Hernández-Solís, J.J., Ruiz-Aquino, F., Navarrete-García, M.A., & Rutiaga-Quñones, J.G. (2021). On the Basic Chemical Composition of Selected Biomass Types from Four Regions of Mexico, for Bioenergetic Purposes. *BioResources* 16(3): 5694-5705. <http://dx.doi.org/10.15376/biores.16.3.5694-5705>
- Hansen, M.T., Jain, A.R., Hayes, S., & Bateman, P. (2009). English handbook for wood pellet combustion. EUBIA - European Biomass Industry Association.
- Hiloidhari, M., Baruah, D.C., Kumaria, M., Kumari, S., & Thakur, I.S. (2019). Prospect and potential of biomass power to mitigate climate change: A case study in India. *Journal of Cleaner Production* 220: 931-944. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.194>

- Ilari, A., Foppa Pedretti, E., De Francesco, C., & Duca, D. (2021). Pellet Production from Residual Biomass of Greenery Maintenance in a Small-Scale Company to Improve Sustainability. *Resources* 10(12): 122. <https://doi.org/10.3390/resources10120122>
- ISO 17225–2. (2021). Solid biofuels. Fuel specifications and classes. Part 2: Graded wood pellets.
- Kocer, A., & Kurklu, A. (2020). Production of pellets from pruning residues and determination of pelleting physical properties. *Energy Sources, Part A Recover Util Environ Ef* 44(4): 10346-10358. <https://doi.org/10.1080/15567036.2020.1752857>
- Manual ENplus. (2015). Esquema de certificación de calidad para pellets de madera. Parte 3: Requisitos de calidad de los pellets. European Pellet Council (EPC). Bruselas, Bélgica. <https://goo.su/7uSfn>
- Michelena, M.C., & Martín, F.M. (2008). *Los Biocombustibles*. Ediciones Mundi-Prensa.
- Morales-Máximo, M., Ruíz-García, V.M., López-Sosa, L.B., & Rutiaga-Quiñones, J.G. (2020). Exploitation of Wood Waste of *Pinus* spp. for Briquette Production: A Case Study in the Community of San Francisco Pichátaro, Michoacán, Mexico. *Appl. Sci.*10(8): 2933. <https://doi.org/10.3390/app10082933>
- Morales-Máximo, M., Rutiaga-Quiñones, J.G., Masera, O., & Ruiz-García, V.M. (2022). Briquettes from *Pinus* spp. Residues: Energy Savings and Emissions Mitigation in the Rural Sector. *Energies* 15(9): 3419. <https://doi.org/10.3390/en15093419>
- Moran, P., Goggins, J., & Hajdukiewicz, M. (2017). Super-insulate or use renewable technology? Life cycle cost, energy and global warming potential analysis of nearly zero energy buildings (NZEB) in a temperate oceanic climate. *Energy and Buildings* 139: 590–607. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.01.029>
- Mostafa, M., Hu, S., Wang, Y., Su, S., Hu, X., Elsayed, S., & Xiang, J. (2019). The significance of pelletization operating conditions: An analysis of physical and mechanical characteristics as well as energy consumption of biomass pellets. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 105: 332–348. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.01.053>
- Núñez-Retana, V.D., Escobedo-Bretado, M.Á., Quiñones-Reveles, M, Ruíz-Aquino, F., & Carrillo-Parra, A. (2019). Efecto del contenido de humedad sobre pélets de aserrín de madera de *Pinus* spp. *Revista Mexicana de Agroecosistemas* 6(2): 136-144. <https://revistaremaeitvo.mx/index.php/remae/article/view/121>
- Nwabueze, Q.A., & Leggett, S. (2024). Advancements in the Application of CO₂ Capture and Utilization Technologies—A Comprehensive Review. *Fuels* 5(3): 508-532. <https://doi.org/10.3390/fuels5030028>
- Onochie, U.P., Obanor, A.I., Aliu, S.A., & Igbodaro, O.O. (2017). Proximate and ultimate analysis of fuel pellets from oil palm residues. *Niger J Technol* 36(3): 987–990. <https://doi.org/10.4314/njt.v36i3.44>
- Østergaard, P.A., Duic, N., Noorollahi, Y., Mikulcic, H., & Kalogirou, S. (2020). Sustainable development using renewable energy technology. *Renewable Energy* 146: 2430–2437. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.08.094>

- Peng, J., Wang, J., Bi, X.T., Lim, C.J., Sokhansanj, S., Peng, H., & Jia, D. (2015). Effects of thermal treatment on energy density and hardness of torrefied wood pellets. *Fuel Process. Technol.* 129: 168–173. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2014.09.010>
- Park, S., Kim, S.J., Oh, K.Ch., Cho, L., Kim, M.J., Jeong, I.S., Lee, Ch.G., & Kim, D. (2019). Investigation of agro-byproduct pellet properties and improvement in pellet quality through mixing, *Energy* 190: 116380. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116380>
- Qazi, A., Hussain, F., Rahim, N. A. B. D., Hardaker, G., Alghazzawi, D., Shaban, K., & Haruna, K. (2019). Towards Sustainable Energy: A Systematic Review of Renewable Energy Sources, Technologies, and Public Opinions. *IEEE Access* 7: 63837–63851. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2906402>
- Pinilla, J.C., Luengo K., Lobo, F., Navarrete, M., & Navarrete, F. (2022). Comparación de la normativa nacional y europea para la producción de pellet de madera. *Ciencia & Investigación Forestal* 28(1): 73-79. <https://doi.org/10.52904/0718-4646.2022.561>
- Ramírez-Ramírez, M.A., Carrillo-Parra, A., Ruíz-Aquino, F., Hernández-Solís, J.J., Pintor-Ibarra, L.F., González-Ortega, N., Orihuela-Equihua, R., Carrillo-Ávila, N., & Rutiaga-Quñones, J.G. (2022). Evaluation of selected physical and thermal properties of briquette hardwood biomass biofuel. *BioEnergy Research* 15: 1407-1414. <https://doi.org/10.1007/s12155-022-10391-8>
- Ramírez-Ramírez, M.A., Carrillo-Parra, A., Ruíz-Aquino, F., Pintor-Ibarra, L.F., González-Ortega, N., Orihuela-Equihua, R., Carrillo-Ávila, N., Luján-Álvarez, C., & Rutiaga-Quñones, J.G. (2021). Valorization of briquettes fuel using *Pinus* spp. sawdust from five regions of Mexico. *BioResources* 16(2): 2249-2263. <http://dx.doi.org/10.15376/biores.16.2.2249-2263>
- Rennkamp, B., Haunss, S., Wongsu, K., Ortega, A., & Casamadrid, E. (2017). Competing coalitions: The politics of renewable energy and fossil fuels in Mexico, South Africa and Thailand. *Energy Research & Social Science* 34: 214–223. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2017.07.012>
- Rutiaga-Quñones, J.G., Pintor-Ibarra, L.F., Orihuela-Equihua, R., González-Ortega, N., Ramírez-Ramírez, M.A., Carrillo-Parra, A., Carrillo-Ávila, N., Navarrete-García, M.A., Ruíz-Aquino, F., Rangel-Méndez, J.R., Hernández-Solís, J.J., & Luján-Álvarez, C. (2020). Characterization of Mexican Waste Biomass Relative to Energy Generation. *BioResources* 15(4): 8529-8553. <http://dx.doi.org/10.15376/biores.15.4.8529-8553>
- Ruiz-Aquino, F., Ruiz-Ángel, S., Santiago-García, W., Fuente-Carrasco, M.E., Sotomayor-Castellanos, J. R., & Carrillo-Parra, A. (2019). Energy characteristics of wood and charcoal of selected tree species in Mexico. *Wood Res.* 64(1): 71-82. <https://goo.su/4c5wbn>
- Sette, C.R.Jr., Santiago-Hansted, A.L., Novaes, E., Fonseca-e-Lima, P.A., Rodrigues-de-Souza-Santos, A., & Minoru-Yamaji, F. (2018). Energy enhancement of the eucalyptus bark by briquette production. *Ind Crops Prod* 122: 209–213. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.05.057>
- Sgarbossa, A., Costa, C., Menesatti, P., Antonucci, F., Pallotino, F., Zanetti, M., Grigolato, S., & Cavalli, R. (2015). A multivariate SIMCA index as discriminant in wood pellet quality assessment. *Renewable Energy* 76: 258–263. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.11.041>
- Sher, F., Pans, M.A., Afilaka, D.T., Sun, Ch., & Liu, H. (2017). Experimental investigation of woody and non-woody biomass combustion in a bubbling fluidised bed combustor focusing on gaseous emissions and temperature profiles. *Energy* 141: 2069-2080. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.11.118>

- Stolarski, M.J., Warmiński, K., Krzyżaniak, M., & Olba-Zięty, E. (2022). Cascaded use of perennial industrial crop biomass: The effect of biomass type and pre-treatment method on pellet properties. *Industrial Crops and Products* 185: 115104. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115104>
- Sulaiman, C., Abdul-Rahim, A.S., & Ofozor, C. A. (2020). Does wood biomass energy use reduce CO₂ emissions in European Union member countries? Evidence from 27 members. *Journal of Cleaner Production* 253: 119996. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.119996>
- Thek, G., & Obernberger, I. (2012). The pellet handbook: the production and thermal utilization of biomass pellets. Abingdon: Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781849775328>
- EN 14961–2. (2012). Biocombustibles sólidos. Especificaciones y clases de combustibles. Parte 2: Pélets de madera para uso no industrial. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), Madrid, España. <https://goo.su/Kd0Tp>
- UNE EN 14961–6. (2012). Biocombustibles sólidos. Especificaciones y clases de combustibles. Parte 6: Pélets no leñosos para uso no industrial. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), Madrid, España. <https://goo.su/rD1Ub>
- UNE-EN 14918. (2011). Determinación del poder calorífico. Norma Europea, CEN Comité Europeo para Estandarización. Madrid, España. <https://goo.su/Juu2>
- UNE-EN ISO 18122. (2023). Biocombustibles Sólidos. Determinación del contenido de ceniza. Estándar Europeo, CEN Comité Europeo para Estandarización. Madrid, España. <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0071397>
- Velázquez-Martí, B. (2018). Aprovechamiento de la biomasa para uso energético. *Editorial Reverté*.
- Wang, C., Chang, Y., Zhang, L., Pang, M., & Hao, Y. (2017). A life-cycle comparison of the energy, environmental and economic impacts of coal versus wood pellets for generating heat in China. *Energy* 120: 374–384. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.11.085>
- Yuping, L., Ramzan, M., Xincheng, L., Murshed, M., Awosusi, A.A., BAH, S.I., & Adebayo, T.S. (2021). Determinants of carbon emissions in Argentina: The roles of renewable energy consumption and globalization. *Energy Reports* 7: 4747-4760. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.07.065>

2025 TECNOCENCIA CHIHUAHUA.

Esta obra está bajo la Licencia Creative Commons Atribución No Comercial 4.0 Internacional.



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>