



Elaboración de pélets artesanales con aserrín obtenido de carpinterías disponibles a nivel local colombiano. Estudio preliminar

Production of artisanal pellets using sawdust obtained from locally available carpentry shops in Colombia. Preliminary study

Laura Cristina Fúquene-Giraldo  ¹ y Luis Octavio González-Salcedo  ²

Fecha de Recepción: 23 de enero de 2025

Fecha de Aceptación: 28 de junio de 2025

Cómo citar: L. C. Fúquene-Giraldo, y L. O. González-Salcedo, "Elaboración de pélet artesanal con aserrín obtenido de carpinterías disponibles a nivel local colombiano. Estudio preliminar", *Tecnura*, 29(84), 67-85. <https://doi.org/10.14483/22487638.23178>

Resumen

Contexto: en Colombia, el mercado de pélets y briquetas aún es un tema de exploración. Su industria forestal y maderera genera un volumen alto de residuos, el cual motiva el desarrollo de propuestas para su mitigación, y, además, puede evaluarse para la fabricación de pélets.

Objetivo: realizar un estudio preliminar en la elaboración de pélets artesanales con aserrín obtenido como residuo de carpinterías locales del municipio de Palmira.

Metodología: en este estudio, se usó como materia prima un residuo maderero, aserrín de carpintería, y se fabricaron pélets artesanales a nivel de laboratorio. Sus propiedades dimensionales, densidad aparente, resistencia a la compresión, resistencia a la tracción indirecta, durabilidad mecánica a partir del índice de friabilidad y del índice de resistencia al impacto, así como el tiempo de incineración, fueron evaluadas.

Resultados: se elaboraron dos grupos de pélets, diferenciados por el tiempo de calentamiento a 105 °C (5 y 10 minutos, respectivamente). Los resultados son similares entre ambos grupos, excepto en las resistencias a compresión y a tracción indirecta. Sus propiedades físicas y mecánicas fueron comparadas con diversas normas internacionales. Se encontraron coincidencias de los resultados con estudios similares que elaboraron pélets con solo aserrín y aglomerantes.

Conclusiones: los pélets artesanales elaborados con aserrín, residuo de carpintería, son acordes con los parámetros dimensionales de los pellets HP4-HP5 y D 25 de las normas DIN 51731 y EN 14961-2, respectivamente. Sin embargo, la densidad está por debajo de los valores recomendados. Los pélets elaborados acorde con los índices de friabilidad y de resistencia al impacto se clasifican como de alta durabilidad. La resistencia a la compresión está por encima de las normas. Este estudio abre una agenda futura para motivar nuevas investigaciones que evalúen la capacidad

¹Diseñadora industrial, magíster en Desarrollo a Escala Humana y Economía Ecológica. Consultora de Gobierno y Políticas Públicas. Correo electrónico: lcfuqueneg@unal.edu.co

²Ingeniero civil, M. C. en Ingeniería Civil, Ph. D. en Ingeniería: Ingeniería de Materiales. Profesor asociado de la Universidad Nacional de Colombia, sede Palmira . Correo electrónico: logonzalezsa@unal.edu.co

calorífica de los pélets, para así mejorar su densidad aparente y el diseño de estufas mejoradas para su uso.

Palabras clave: aprovechamiento de residuos sólidos, recursos maderables, aglomerado orgánico, pélets, material biológico.

Abstract

Context: In Colombia, the pellet and briquette market are still a topic of exploration. Its forestry and wood industry generates a high volume of waste, which motivates the development of proposals for its mitigation. In these terms, this waste can be evaluated for the manufacture of pellets.

Objective: Conduct a preliminary study on the production of artisanal pellets using sawdust obtained as waste from local carpentry shops in the Municipality of Palmira.

Methodology: In this study, wood waste, carpentry sawdust, was used as raw material and artisanal pellets were manufactured at laboratory level. Their dimensional properties, apparent density, compressive strength, indirect tensile strength, mechanical durability from the friability index and the impact resistance index, as well as the incineration time, were evaluated.

Results: Two groups of pellets were produced, differentiated by the heating time at 105 °C (5 and 10 minutes, respectively). The results show similar results between both groups, except for the compressive and indirect tensile strengths. Their physical and mechanical properties were compared with various international standards. The results were found to be in agreement with similar studies that produced pellets with only sawdust and binders.

Conclusions: The artisanal pellets made from wood waste sawdust are in accordance with the dimensional parameters of HP4-HP5 and D 25 pellets of DIN 51731 and EN 14961-2 standards, respectively. However, the density is below the recommended values. The pellets made according to the Friability and Impact Resistance indices are classified as highly durable. The compressive strength is above the standards. This study opens a future agenda to motivate new research addressing the evaluation of the calorific capacity of the pellets, explorations to improve their apparent density, and the design of improved stoves for their use.

Keywords: Utilization of solid waste, wood resources, organic agglomerate, pellets, biological material.

Introduction

Las comunidades producen residuos sólidos que conllevan problemáticas ambientales (1,2); al mismo tiempo, explotan recursos para generar materias primas necesarias para el desarrollo de productos o servicios acordes a las necesidades de su vida diaria (3,4). Dentro de la problemática ambiental, a manera de antecedentes, se ha demostrado que el ser humano, en busca de satisfacer sus necesidades, ha explotado a gran escala todos los recursos que el entorno le ha brindado, y las consecuencias de esto se evidencian en la actualidad (5,6): cada vez son más grandes e ignoradas las grandes cantidades de desechos generadas por el consumo exagerado de productos con un ciclo de vida inconcluso (7,8). Al respecto, en la búsqueda de soluciones que mitiguen este deterioro acelerado del medio ambiente se encuentran estudios que brindan diferentes propuestas de manejo sostenible de estos residuos (9,10).

En el contexto latinoamericano el problema no radica en el reciclaje en sí, sino en una escasa cobertura y limitada implementación de sistemas eficientes de recolección y reutilización de residuos. El diseño y aplicación de nuevos sistemas en esta vía permitirían ampliar dicha cobertura y generar ingresos, motivando la participación de la comunidad en prácticas de reciclaje (11). De igual manera, diversos programas ambientales orientados al reciclaje de residuos sólidos han mostrado resultados positivos en la región (12–17), entre los que se destacan: promover la comercialización de cultivos hortícolas, generar hábitos de clasificación y separación de residuos y crear de elementos diversos. La similitud demográfica y cultural entre las comunidades de América Latina (18, 19) ayuda a anticipar que los resultados exitosos en estos programas son potencialmente replicables en otras áreas de la región, lo cual permite plantear la hipótesis de que iniciativas similares podrían implementarse con éxito en el contexto nacional (20).

En Colombia, el impacto del sector forestal es aún incipiente, pues representa únicamente entre el 0,4 % y el 0,5 % del producto interno bruto (PIB), a través de la contribución de los sectores silvícola (la producción obtenida del aprovechamiento de bosques naturales, plantados y reforestados, y los productos como látex, gomas, resinas, cortezas, madera en bruto y leña) y el manufacturero (muebles y madera, y la industria de pulpa de papel y el cartón), como lo mencionan (21). El 84,1 % del volumen de madera en bruto que consume el país procede de bosques naturales; el 12,4 %, de plantaciones forestales, y el restante 3,5 %, de maderas importadas (22). En el proceso productivo del recurso forestal se genera un alto volumen de residuos (23, 24). En la primera operación, relacionada con remoción de la corteza del árbol, se desperdicia el 43 % del material; luego, en el proceso industrial de transformación de la materia prima, se requieren diferentes intervenciones para adecuarse a sus requerimientos como corte, lijado y formado, lo cual produce desperdicios como aserrín, virutas y recortes del material, lo que representa un 36 %. También, durante el secado y en el descarte de piezas con defectos, se genera una reducción del volumen de materia prima disponible, lo que supone un incremento de residuos equivalente al 17 % del total procesado (25, 26).

Estos desperdicios son utilizados generalmente en alojamientos pecuarios (27, 28), en hornos para la fabricación de cemento y ladrillos (29), y como biomasa para fines energéticos (30); aunque, en la mayoría de los casos estos residuos son subutilizados y desperdiciados (31), con lo cual ocasionan problemas para su disposición final. Sin embargo, la práctica de procesos de manejo sostenible permite el aprovechamiento de dichos residuos sólidos para ser convertidos en materia prima; al respecto, la literatura muestra la elaboración de diversos “nuevos productos” a partir de residuos derivados de la explotación de recursos forestales (23, 32–35).

El uso de la madera en el país se ha enfocado en la fabricación de mobiliario, leña, tableros de aglomerados, entre otros (36). Diversos estudios relacionados con el aprovechamiento de este material como biocombustible muestran que sus propiedades de combustión mejoran al someterse a un proceso de densificación (23). La densificación de la madera en pélets consiste en la compactación del material lignocelulósico (37,38); después de secarlo y conservarlo a una humedad entre el 6 % y el 10 %, es prensado a altas temperaturas en matrices cilíndricas de diámetros de 7 mm a 22 mm, y longitudes de 22 mm a 70 mm; este es muy utilizado en Europa Occidental y América del Norte principalmente para calefacción (39,40). Dimensiones mayores corresponden a las briquetas usadas para los mismos fines (38,40). Los mayores productores de pélets son Suecia, Canadá, Estados Unidos, Australia y Alemania (41,42); son de un material de alto consumo y Suecia, por ejemplo, debe importar el producto para su abastecimiento interno (43). Los pélets de madera, al tener un bajo contenido de humedad, no producen humo ni alquitrán, y generan mayor calor en chimeneas y estufas con residuos de cenizas menores al 1 % (44–46).

En Colombia, el mercado de pélets y briquetas aún es un tema de exploración (45), que, aunado a la riqueza representada en la industria forestal y maderera, y los grandes desperdicios generados por estos, propician una oportunidad de investigación, innovación y desarrollo en propuestas ambiental y económicamente sostenibles en la generación de energía alternativa; además, puede ser una solución que beneficie sectores sociales vulnerables, localizados alrededor de los espacios de explotación del material. Vale la pena mencionar que, en los últimos años, la fabricación de pélets y briquetas a partir de biomasa residual forestal ha sido tema de estudio en el país (47–52).

La posibilidad de darles diversos usos a los residuos tiene una importancia ambiental y económica, pues disminuyen el uso de terrenos y costos de su disposición, a la vez que impulsan la economía local (53). Por tanto, el presente trabajo tiene como objetivo estudiar y evaluar un residuo maderero como materia prima para la fabricación de pélets; los residuos provienen de carpintería, en cuya actividad se pierde entre el 10 % y el 30 % del volumen de la materia prima básica, madera maciza y materiales derivados de la madera, en forma de residuos (54–56). Con esto se lograría la valorización del residuo y la prevención de los impactos ambientales causados por su disposición final (54). También, este estudio está orientado en el concepto de *desarrollo sostenible*, dado que pretende contribuir a la solución de los problemas asociados al uso extensivo de áreas de tierras para disposición de residuos. Lo anterior se direcciona con el Objetivo del Desarrollo Sostenible 12 (57): “garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles”.

Metodología

Materiales

El residuo maderero, objeto de estudio, fue obtenido de carpinterías de la ciudad de Palmira (Colombia); se trataban de aserrín proveniente de maderas aglomeradas obtenidas del corte de tableros de fibropanel de densidad media (MDF), de contrachapado (*triplay*), y madera compuesta de fibras, virutas y rechazos (*tríplex*), así como de piezas de madera maciza no identificadas, usadas para la fabricación de muebles. Estos residuos, que se denominan “materia prima”, no tuvieron tratamiento alguno ni separación por tipología al momento de su acopio. La materia prima se tamizó en un tamiz artesanal para separar el polvo y las partículas más pequeñas, y luego se homogenizó en una máquina tamizadora de tamices RETSCH, modelo AS200 BASIC. El tamaño de partícula utilizado fue filtrado por la abertura de 2 mm, durante 10 minutos a una amplitud de 100 % (figura 1). Después, la materia prima homogeneizada se secó a temperatura ambiente por 24 horas, y se procedió a remover, con imanes, los elementos metálicos presentes.

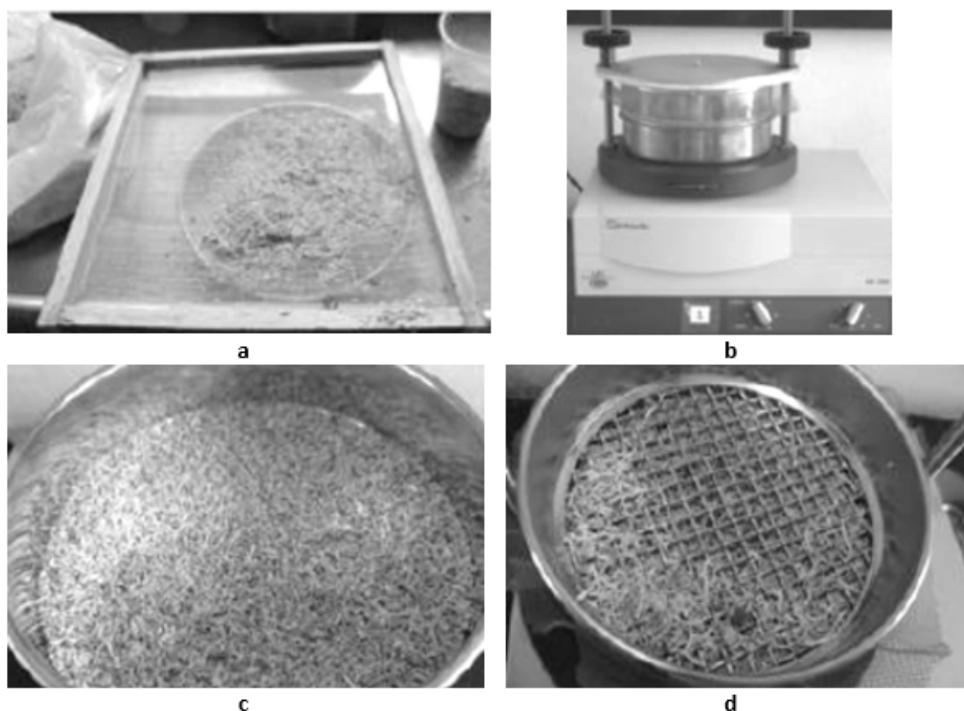


Figura 1. Tamizado manual y en tamizador de tamices RESTCH, modelo AS 200 BASIC: (a) tamizado manual para separación de partículas más pequeñas y polvo; (b) tamizado con tamizador de tamices; (c) material retenido no usado; (d) material a usar en las probetas.

Fuente: autores

Fabricación de pellets a nivel de laboratorio

Los pélets fueron fabricados en laboratorio, y a esta escala se abordaron las etapas de producción de pélets de residuos de madera, acorde con (58), conducentes a la compactación de la biomasa y obtención del material densificado. Las etapas de homogenización, limpieza y secado de la materia prima fueron explicadas en la subsección anterior, mientras que la de pelletizado se explica a continuación.

En la fabricación de los pélets no se usaron agentes aglomerantes, y la materia prima se humedeció con agua y se mezcló mecánicamente; la cantidad de agua añadida se ajustó hasta obtener una consistencia trabajable; posteriormente, la mezcla humedecida se colocó en una matriz para la etapa de prensado y conformación de los pélets. La limitación en este estudio de disponer de una matriz que realizara el control de temperatura de manera constante y simultáneamente aplicara la fuerza de prensado, implicó una variación en el proceso. Esta consistió en conformar las probetas en dos grupos denominados G1 y G2, respectivamente. Las probetas G1 se dispusieron en la matriz, se ingresaron al horno a una temperatura de 105 °C durante 5 minutos; después, se retiraron del horno y rápidamente se colocaron en la prensa hidráulica donde se comprimieron hasta su punto máximo. Se dejaron reposar por 5 minutos, para posteriormente retirar de la matriz. Para las probetas G2 se realizó el mismo proceso, con una variación de 10 minutos en el horno (figuras 2 y 3).



Figura 2. Proceso de fabricación de los pélets

Fuente: autores

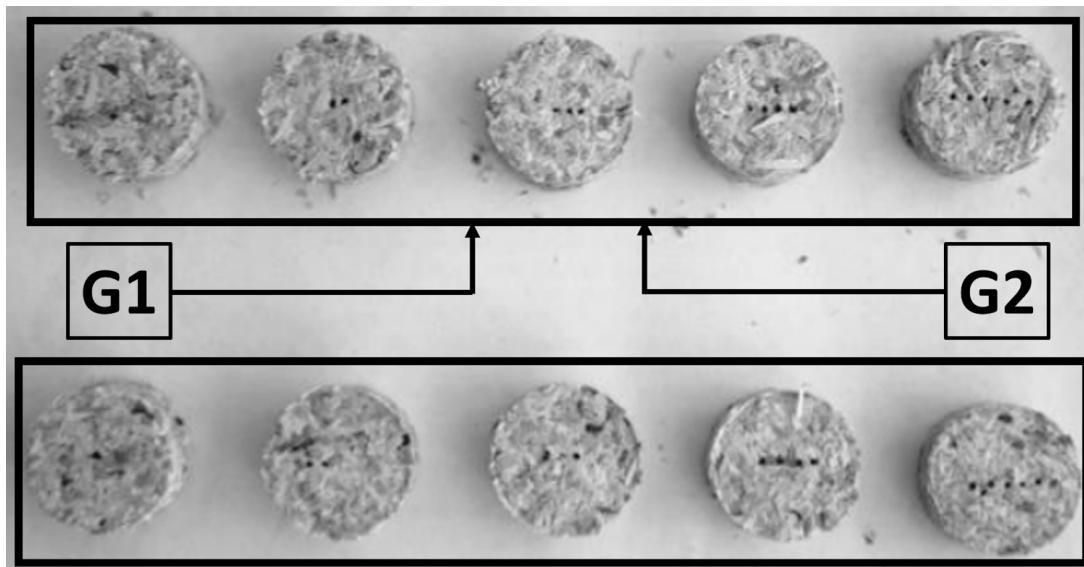


Figura 3. Pélets fabricados con residuos madereros, específicamente aserrín proveniente de carpintería

Fuente: autores

Para los pélets fabricados se determinaron las dimensiones de su longitud y su diámetro, por medio de un calibrador Vernier digital de precisión $\pm 0,01$ mm; el volumen y el peso se midieron para determinar la densidad aparente; para el peso, se usó una balanza calibrada con una precisión de $\pm 0,01$ g; mientras que el volumen se calculó a partir de las dimensiones.

Se llevaron a cabo los ensayos de resistencia a la compresión o al aplastamiento, y a la tracción indirecta, de acuerdo con la norma ASTM C39-96; para tal fin, se usó una máquina universal de ensayos marca SHIMADZU®, modelo AGIC100, a una velocidad de 0,6 mm/min. También, se realizó la prueba de incineración, para lo cual los pélets fueron ubicados sobre una rejilla metálica, a una llama de fuego continuo de mechero de alcohol convencional; y así evitar corrientes externas de aire; el ensayo se efectuó en una cámara extractora de gases marca MASER®, modelo EX135.

Por último, como indicadores de durabilidad mecánica, los pélets se sometieron a una prueba de friabilidad y a otra de resistencia al impacto. Para la primera, se evaluó el fraccionamiento del pélet a la caída a 100 cm sobre una base cerámica, y se observó en cuántas partes se rompía, para ser evaluado por el índice de friabilidad (IF) (ecuación 1), a partir del número de pélets al inicio de la prueba N_i y el número de pélets (enteros y fraccionados) resultantes al final de la prueba N_f , acorde con (59). Para la segunda prueba, se evaluó el fraccionamiento del pélet a una caída de 180 cm sobre una base cerámica, y que es evaluado por el índice de resistencia

(IRI) (ecuación 2), a partir de la masa inicial de la prueba M_i y la masa final M_f , después de las caídas, al repetirse la prueba por triplicado como lo establece la norma ASTM D440-86:

$$IF = 100 * \left(\frac{N_i}{N_f} \right) \quad (1)$$

$$IRI = 100 * \left(\frac{M_f}{M_i} \right) \quad (2)$$

Resultados

En la tabla 1, se presentan los resultados de las dimensiones, peso, densidad aparente, resistencia a la compresión o al aplastamiento, resistencia a la tracción indirecta, el IF, el IRI y la prueba de incineración.

Las dimensiones de la matriz para la elaboración de los moldes condicionaron las dimensiones de los pélets. Por lo general, estos tienen un diámetro menor a su longitud; sin embargo, en este estudio el diámetro es mayor a su longitud. Al comparar las dimensiones con las establecidas en diversas normas, el diámetro es acorde con la norma DIN 51731 (>6 mm), EN 14961-2 (Pellet D 25: 24-26 mm); mas no con las normas CTI R04/05 (6-8 mm), CEN/TC 335 (6-10 mm), ÖNORM M7135 (4-10 mm), SS 187120 (<25 mm); mientras que la longitud es acorde con las normas DIN 51731 (Pellet HP5: <50 mm), CTI R04/05 (6-30 mm), ÖNORM M7135 (<5* diámetro), EN 14961-2 (Pellet D 25: 3,15-50 mm), DIN Plus (Pellet HP4: 10-40 mm); pero no con la norma CEN/TC 335 (30 mm). Para estudios similares usando solo aserrín y con aglomerantes, el diámetro se aproxima a pélets elaborados por (60) (27 mm); mientras que la longitud se aproxima a pélets elaborados por (47, 49).

Tabla 1. Propiedades de los pélets elaborados con residuos madereros, consistente de aserrín de carpintería

Propiedad	Pélets G1	Pélets G2
Diámetro (mm)	25,23	25,18
Longitud (mm)	10,60	11,40
Peso (g)	4,00	4,10
Densidad (kg/m ³)	754,80	722,23
Resistencia a la compresión o al aplastamiento (kN; N/mm ²)	21,02; 42,30	4,80; 9,77
Resistencia a la tracción indirecta (kN; N/mm ²)	125,00; 0,24	78,12; 0,15
IF (%)	100,00	100,00
IRI (%)	100,00	100,00

Peso al final de la prueba de incineración (g)	0,60	0,70
Tiempo aparición de cenizas (min)	5,22	6,20
Tiempo de incineración total (min)	12,14	13,25

Fuente: autores

De acuerdo con (61), la densidad de los pélets está influenciada por la densidad de la materia prima; al respecto, se infiere que los valores de la densidad en cada grupo son influidos por la del aserrín utilizado. Los rangos de 1000-1400 y 1120-1300 son los indicados (62). Por otra parte, en este estudio no se emplearon aglomerantes, los cuales tienen la capacidad de penetrar profundamente en las partículas de la materia prima y aglutinarlas, y de reducir el espacio entre ellas (63), aumentando la densidad. La temperatura del proceso en este estudio (105 °C) no permite que la lignina migre desde la capa interna a la más externa de las paredes celulares de la materia prima, y deje un depósito de lignina fundida en su superficie que produzca pélets de aserrín más densos, lo cual se obtiene a una temperatura de 150 °C, según (62). Al comparar la densidad con las establecidas en diversas normas, el valor es acorde con las normas CTI R04/05 (620-720 kg/m³), ÖNORM M7135 (>600 kg/m³), European Standard (\geq 600 kg/m³), AGRO y AGRO PLUS (>650 kg/m³); pero no con las normas SNI 8021:2014 (\geq 800 kg/m³), DIN 51731 (1000-1400 kg/m³), DIN Plus (>1120 kg/m³). Para estudios similares usando solo aserrín y con aglomerantes, la densidad se aproxima a pélets elaborados por (63, 64).

Las propiedades mecánicas de los pélets, en especial la resistencia a la compresión, están influenciadas por su contenido de humedad y por los parámetros de presión y temperatura utilizados durante el peletizado (65). En este estudio el proceso fue el mismo para ambos grupos, de ahí que el único factor que podría afectar la resistencia a la compresión de los pélets fuera el tiempo de sometimiento a la temperatura de 105 °C (5 y 10 minutos). Las amplias diferencias en cuanto a los parámetros de compresión encontrados entre ambos grupos (42,30 N/mm² versus 9,77 N/mm²) pueden relacionarse con el tiempo de calentamiento de los pélets, teniendo en cuenta que este calentamiento se hizo por separado y antes de la densificación de la materia prima. Al comparar la resistencia a la compresión o al aplastamiento con las establecidas en diversas normas, los valores superan al de la norma ÖNORM M7135 (4896 N). Para estudios similares con solo aserrín y con aglomerantes la resistencia a la compresión o al aplastamiento, en los pélets G1, se aproxima a pélets elaborados por (64) (30,91-67,56 N/mm²), (65) (21,79-48,93 N/mm²).

En cuanto a la resistencia a la tracción indirecta, la literatura no reporta parámetros en las normas para poder comparar los resultados; tampoco registra estudios similares en los cuales

se haya determinado la resistencia a la tracción indirecta de pélets. Por último, la diferencia amplia entre la resistencia a la compresión y la resistencia a la tracción indirecta confirma la condición de anisotropía característica en los materiales biológicos (66).

Al efectuar la prueba de friabilidad para ambos grupos, se observó que, en la caída desde una altura de 100 cm, los pélets se conservaron en una sola pieza, lo cual motivo a una prueba de impacto que evaluara el comportamiento en la caída desde una altura de 180 cm, manteniendo el comportamiento mencionado. La durabilidad, a partir de la friabilidad y la resistencia al impacto, evaluados mediante el IF (100 %) y el IRI (100 %), respectivamente, se define como la capacidad de los pélets para soportar cargas destructivas y fuerzas durante el transporte, y este parámetro se considera “aceptable” cuando su valor es mayor a 80 %; “mediano”, cuando se encuentra entre 70 % y 80 %, y “bajo”, cuando es menor a 70 % (65).

Al aplicar estos conceptos a la durabilidad obtenida en este estudio, que fue superior al 80 % en ambos casos, se puede afirmar que son de durabilidad alta. Valores altos de durabilidad arrojan como resultado una disminución en los riesgos asociados a explosiones por fuego durante el transporte o almacenamiento de los pellets, así como en las emisiones de polvo; de igual forma, evitan problemas en los sistemas de alimentación de estos (65). En este estudio, el único aglutinante correspondió a la lignina contenida naturalmente en el aserrín, liberada con el aumento de la temperatura durante la peletización; además, una posible explicación de la alta durabilidad se debe a que la materia prima (aserrín) tenía un bajo contenido de finos, los cuales fueron apropiadamente aglutinados por la lignina, así también, el mezclado del aserrín humedecido fue homogéneo con un bajo contenido de humedad y adecuadamente prensado, como lo exponen (59, 62).

La prueba de incineración permite evaluar el comportamiento de la combustión de los pélets; al respecto los tiempos en los que se inicia emisión de humo (5,22 min-6,20 min) y de incineración total (12,14 min-13,25 min) son muy similares en ambos grupos, y para evaluar su eficiencia se requieren pruebas adicionales como la evaluación del tiempo para hervir un volumen determinado de agua y la cantidad de pélets requeridos para dicho proceso, como se implementó por (60). Sin embargo, para los mismos autores, pélets elaborados con un alto porcentaje de aserrín (>70 %) se queman más rápido que otros con menores contenidos.

Conclusiones

Esta investigación preliminar se ha enfocado en la producción de pélets artesanales mediante el reciclaje de aserrín, residuo maderero obtenido de carpinterías locales. Se elaboraron dos grupos de pélets (aquí denominados G1 y G2), y su proceso se diferenció por el tiempo de

calentamiento a una temperatura de 105 °C (5 y 10 minutos, respectivamente). Las propiedades obtenidas muestran, entre los grupos, resultados muy similares, con excepción de la resistencia a la compresión y la resistencia a la tracción indirecta, así como en el tiempo requerido para su completa incineración.

La evaluación de las propiedades muestra que sus parámetros dimensionales son acordes principalmente con las normas DIN 51731 y EN 14961-2, y coinciden con los pélets HP4-HP5 y D 25, de dichas normas, respectivamente. Sin embargo, y de acuerdo con su densidad, los pélets obtenidos tienen una densidad por debajo de las recomendadas, lo cual podría afectar su eficiencia y rendimiento como combustible. Con respecto a su durabilidad mecánica, evaluados a partir de los índices de friabilidad (IF) y de resistencia al impacto (IRI), así como la alta resistencia a la compresión (superior a las normas comparadas), se clasifican como pélets de durabilidad alta.

Los resultados obtenidos abren una agenda futura alrededor del tema, y sugieren continuar nuevas investigaciones principalmente con el pellet G1, dada su mayor densificación representada en su densidad y propiedades mecánicas; también, se recomienda analizar el mejoramiento de sus propiedades con el uso de diversos aglomerantes, así como la evaluación de sus propiedades caloríficas.

El trabajo realizado también motiva la exploración del pélet artesanal obtenido como fuente de energía para aplicaciones locales y domésticas, en el ámbito rural de baja demanda calorífica, como es el caso de sistemas de calefacción en alojamientos pecuarios de escala familiar y sistemas de cocción de alimentos en viviendas rurales, en las cuales permitiría el reemplazo de la leña aún usada como combustible. Esto plantea la necesidad de avanzar en el diseño de estufas mejoradas.

Agradecimientos

Este estudio se desarrolló en el marco del Proyecto Código HERMES 31758 "Exploración del uso de residuos sólidos como materia prima para el desarrollo de productos y/o servicios a partir de prácticas de manejo sostenible" de la Universidad Nacional de Colombia, sede Palmira.

Referencias

- [1] M. H. Dehghani, G. Omrani, y R. Karri, "Solid waste—Sources, toxicity, and their consequences to human health", en *Soft computing techniques in solid waste and wastewater management*, R. R. Karri, G. Ravindran, y M. H. Dehghani, eds., Ámsterdam: Elsevier, 2021, pp. 205-213. [En línea]. Disponible en <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824463-0.00013-6>
- [2] T. Raphela, N. Manqele, y M. Erasmus, "The impact of improper waste disposal on human health and the environment: a case of Umgungundlovu District in KwaZulu Natal Province, South Africa", *Frontiers in Sustainability*, vol. 5, 1386047, 2024. [En línea]. Disponible en <https://doi.org/10.3389/frsus.2024.1386047>
- [3] T. Gebre, y B. Gebremedhin, "The mutual benefits of promoting rural-urban interdependence through linked ecosystem services", *Global Ecology and Conservation*, vol. 20, e00707, 2019. [En línea]. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2019.e00707>
- [4] K. Adla, D. Kecojevic, D. Neira *et al.*, "Degradation of ecosystems and loss of ecosystem services", in *One Health*, J. C. Prata, A. I. Ribeiro, y T. Rocha-Santos, eds., Ámsterdam: Academic Press, 2022, pp. 281-327. [En línea]. Disponible en <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822794-7.00008-3>
- [5] K. J. Bonnedahl, P. Heikkurinen, y J. Paavola, "Strongly sustainable development goals: overcoming distances constraining responsible action", *Environmental Science & Policy*, vol. 129, pp. 150-158, 2022. [En línea]. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2022.01.004>
- [6] J. A. Silva, "Wastewater treatment and reuse for sustainable water resources management: a systematic literature review", *Sustainability*, vol. 15, n.º 14, p. 10940, 2023. [En línea]. Disponible en <https://doi.org/10.3390/su151410940>
- [7] Y. Borodin, T. Aliferova, y A. Ncube, "Waste management through life cycle assessment of products", *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 81, 2015. [En línea]. Disponible en <https://doi.org/10.1088/1757-899X/81/1/012085>
- [8] G. Wulff, "The challenge of overproduction and overconsumption", en *The future of consumption*, K. Bäckström, C. Egan-Wyer, y E. Samsioe, eds., Cham: Palgrave Macmillan, 2024, pp. 205-223. [En línea]. Disponible en https://doi.org/10.1007/978-3-031-33246-3_13
- [9] Y. A. Hajam, R. Kumar, y A. Kumar, "Environmental waste management strategies and vermi transformation for sustainable development", *Environmental Challenges*, vol. 13, 100747, 2023. [En línea]. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.envc.2023.100747>

- [10] D. Perkumienè, A. Atalay, L. Safaa *et al.*, "Sustainable waste management for clean and safe environments in the recreation and tourism sector: a case study of Lithuania, Turkey and Morocco", *Recycling*, vol. 8, n.º 4, p. 56, 2023. [En línea]. Disponible en <https://doi.org/10.3390/recycling8040056>
- [11] M. E. Najar, "Solid waste management in urban areas of Latin America", *Revista Científica Visión de Futuro*, vol. 28, n.º 2, pp. 98-111, 2024. [En línea]. Disponible en <https://doi.org/10.36995/j.visiondefuturo.2024.28.02.003.en>
- [12] J. Macedo, "Planning a sustainable city: the making of Curitiba, Brazil", *Journal of Planning History*, vol. 12, pp. 334-353, 2013. [En línea]. Disponible en <https://doi.org/10.1177/1538513213482093>
- [13] M. Margallo, K. Ziegler-Rodriguez, I. Vázquez-Rowe *et al.*, "Enhancing waste management strategies in Latin America under a holistic environmental assessment perspective: a review for policy support", *Science of the Total Environment*, vol. 689, pp. 1255-1275, 2019. [En línea]. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.393>
- [14] M. d. P. Sánchez-Muñoz, J. G. Cruz-Cerón, y P. C. Maldonado-Espinel, "Gestión de residuos sólidos urbanos en América Latina: un análisis desde la perspectiva de la generación", *Revista Finanzas y Política Económica*, vol. 11, n.º 2, pp. 321-336, 2019. [En línea]. Disponible en <https://doi.org/10.14718/revfinanzpolitecon.2019.11.2.6>
- [15] E. Fuentes, "Gestión de residuos sólidos: estudio de casos y lecciones aprendidas en ciudades intermedias aplicables en el contexto latinoamericano y Perú", *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinaria*, vol. 8, pp. 7066-7084, 2024. [En línea]. Disponible en https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i4.12883
- [16] I. Giraldo-Almario, G. Rueda-Saa, y J. R. Uribe-Ceballos, "Waste-aware adaptation to the context of a Latin American country: evaluation of the municipal solid waste management in Cali, Colombia", *Journal of Material Cycles and Waste Management*, vol. 26, pp. 908-922, 2024. [En línea]. Disponible en <https://doi.org/10.1007/s10163-023-01868-5>
- [17] S. W. Ubillús-Farfán, Y. M. Valiente-Saldaña, y S. Patiño-Ramírez, "Estrategias aplicadas en la gestión de residuos sólidos en Latinoamérica: revisión literaria", *Revista Arbitrada Interdisciplinaria Koinonía*, vol. 9, n.º 17, pp. 119-132, 2024. [En línea]. Disponible en <https://doi.org/10.35381/r.k.v8i17.3157>
- [18] J. C. Berganza, R. G. Campos, E. Martínez C. *et al.*, *The end of the demographic dividend in Latin America: challenges for economic and social policies*, Madrid: Banco de España, 2023. [En línea]. Disponible en <https://ssrn.com/abstract=3627357>

- [19] P. Lamy, V. Armony, y A. Tremblay, "Values, culture and the economic integration of Latin America and North America: an empirical perspective on culturalist approaches", *Diálogos Latinoamericanos*, n.º 9, pp. 87-102, 2004.
- [20] C. A. Ramírez T., *Production of biofuels for transport in Colombia: an assessment through sustainability tools*, Bogotá: Editorial Politécnico Grancolombiano, 2017. [En línea]. Disponible en https://www.researchgate.net/publication/367903614_Production_of_biofuels_for_transport_in_Colombia_An_assessment_through_sustainability_tools
- [21] A. C. Padilla P., L. A. Montoya, e I. A. Montoya R., "Análisis Pesta para la consolidación de la cadena productiva forestal en el departamento de Arauca", *Punto de Vista*, vol. 7, n.º 11, pp. 156-171, 2016.
- [22] C. Marín V., "El mueble y la madera en cifras", *Revista M&M*, n.º 86, art. 12, 2015. [En línea]. Disponible en <http://revista-mm.com/economia-sectorial/mueble-madera-cifras/>
- [23] L. T. López C., L. Y. Vega R., C. D. Rendon *et al.*, "Caracterización de los residuos de la industria maderera para su aprovechamiento en diferentes aplicaciones", *Ingeniería y Desarrollo*, vol. 38, n.º 1, pp. 104-124, 2020. [En línea]. Disponible en <https://doi.org/10.14482/inde.38.1.691.1>
- [24] M. J. Aliaño-González, J. Gabaston, V. Ortiz-Somovilla *et al.*, "Wood waste from fruit trees: biomolecules and their applications in agri-food industry", *Biomolecules*, vol. 12, n.º 2, art. 238, 2022. [En línea]. Disponible en <https://doi.org/10.3390/biom12020238>
- [25] H. H. Medina A., M. Martínez G., F. Barrios M. *et al.*, "Determinación del porcentaje de desperdicio en las labores de aprovechamiento forestal en un bosque pluvial tropical en el municipio de Medio San Juan, Chocó, Colombia", *Revista NOVA*, vol. 5, n.º 8, 2007. [En línea]. Disponible en <https://doi.org/10.22490/24629448.384>
- [26] J. E. Medrano-Guerrero, P. Meza-López, F. J. Hernández *et al.*, "Cuantificación y caracterización de los residuos del proceso de aserrío en una fábrica de tarimas en El Salto, Durango, México", *Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes*, e3599, 2022. [En línea]. Disponible en <https://doi.org/10.33064/iycuaa2022863599>
- [27] J. Gupta, M. Kumari, A. Mishra *et al.*, "Agro-forestry waste management – A review", *Chemosphere*, vol. 287, n.º 3, art. 132321, 2022. [En línea]. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132321>
- [28] M. Pędzik, K. Tomczak, D. Janiszewska-Latterini *et al.*, "Management of forest residues as a raw material for the production of particleboards", *Forests*, vol. 13, n.º 11, art. 1933, 2022. [En línea]. Disponible en <https://doi.org/10.3390/f13111933>

- [29] L. Mary, P. N., C. Peter, K. Mohan *et al.*, "Energy efficient production of clay bricks using industrial waste", *Heliyon*, vol. 4, e00891, 2018. [En línea]. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2018.e00891>
- [30] L. Yáñez-Iñiguez, E. Urgilés-Urgilés, E. Zalamea-León *et al.*, "Potencial de los residuos forestales para la contribución a la matriz energética urbana", *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida*, vol. 32, n.º 2, pp. 42-53, 2020. [En línea]. Disponible en <http://doi.org/10.17163/lgr.n32.2020.04>
- [31] M. T. Pergola, L. Saulino, M. Castellaneta, *et al.*, "Towards sustainable management of forest residues in the southern Apennine Mediterranean mountain forests: a scenario-based approach", *Annals of Forest Science*, vol. 79, art. 14, 2022. [En línea]. Disponible en <https://doi.org/10.1186/s13595-022-01128-w>
- [32] J. N. Fregoso-Madueño, J. R. Goche-Télles, J. G. Rutiaga-Quiñones *et al.*, "Usos alternativos de los desechos de la industria del aserrío", *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, vol. 23, n.º 2, pp. 243-260, 2017. [En línea]. Disponible en <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2016.06.040>
- [33] A. Kumar, S. Adamopoulos, D. Jones *et al.*, "Forest biomass availability and utilization potential in Sweden: a review", *Waste Biomass Valorization*, vol. 12, pp. 65-80, 2021. [En línea]. Disponible en <https://doi.org/10.1007/s12649-020-00947-0>
- [34] U. Udukpoh, y C. Nnaji, "Reuse of sawdust in developing countries in the light of sustainable development goals", *Recent Progress in Materials*, vol. 5, pp. 1-33, 2023. [En línea]. Disponible en <https://doi.org/10.21926/rpm.2301006>
- [35] J. Cruz V., E. Altamirano C., C. Villegas F. *et al.*, "Especies forestales maderables y su utilidad en biotecnología y medicina", *Revista de Investigación Talentos*, vol. 11, n.º 1, pp. 54-66, 2024. [En línea]. Disponible en <https://doi.org/10.33789/talentos.11.1.194>
- [36] F. Farfán-Valencia y J. R. Rendón-Sáenz, "Producción de madera por las variedades Castillo® y Tabi en sistemas agroforestales", *Avances Técnicos Cenicafé*, núm. 448, pp. 1-4, oct. 2014. [En línea]. Disponible en <https://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/563/1/avt0448.pdf>
- [37] W. Stelte, "Fuel pellets from biomass. Processing, bonding, raw materials", Technical University of Denmark, Risø-PhD n.º 90(EN), 2011. [En línea]. Disponible en <https://backend.orbit.dtu.dk/ws/portalfiles/portal/6456981/ris-phd-90.pdf>
- [38] I. M. Ríos B., J. Santos C., y A. C. Gutiérrez, "Biocombustibles sólidos: una solución al calentamiento global", *Ciencia*, vol. 68, n.º 4, pp. 1-7, 2017. [En línea]. Disponible en <https://www.revistaciencia.amc.edu.mx/online/BiocombustiblesSolidos.pdf>

- [39] L. Ferreira P. d. A., A. Vanderley H. S., y J. J. Ramírez B., "Sugarcane bagasse pellets: characterization and comparative analysis", *Acta Scientiarum. Technology*, vol. 39, n.º 4, pp. 461-468, 2017. [En línea]. Disponible en <https://www.redalyc.org/pdf/3032/303252893010.pdf>
- [40] J. A. Japhet, A. Tokan, y E. E. P. Kyauta, "A review of pellet production from biomass residues as domestic fuel", *International Journal of Environment, Agriculture and Biotechnology*, vol. 4, n.º 3, pp. 835-842, 2019. [En línea]. Disponible en <https://doi.org/10.22161/ijebab.4.3.34>
- [41] D. Thrän, K. Schaubach, D. Peetz *et al.*, "The dynamics of the global wood pellet markets and trade – key regions, developments and impact factors", *Biofuels, Bioproducts, & Biorefining*, vol. 13, pp. 267-280, 2019. [En línea]. Disponible en <https://doi.org/10.1002/bbb.1910>
- [42] R. Lestari, H. Prayitno, Novrianti, F. A. Kamandanu y Yunia, "Global Potential Market of Forest Biomass Wood Pellets", *Advances in Social Science, Education and Humanities Research*, vol. 628, pp. 332–338, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.2991/assehr.k.220102.042>
- [43] L. C. Hernández, C. A. Forero, y F. E. Sierra, "Biomass densification: a review of the current state-of-the-art of the pellet market and analysis of new research trends", *Tecciencia*, vol. 12, n.º 23, pp. 81-92, 2017. [En línea]. Disponible en <http://dx.doi.org/10.18180/tecciencia.2017.23.10>
- [44] J. Sjostrom, y P. Blomqvist, "Direct measurements of thermal properties of wood pellets: elevated temperatures, fine fractions and moisture content", *Fuel*, vol. 134, pp. 460-466, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.05.088>
- [45] Consorcio Estrategia Rural Sostenible, *Realizar un estudio que permita formular un programa actualizado de sustitución progresiva de leña como energético en el sector residencial en Colombia, con los componentes necesarios para su ejecución – Informe Final*, Contrato UPME C-031-2019, Bogotá, 2019, 355 p. [En línea]. Disponible en https://www1.upme.gov.co/Hidrocarburos/Plan_sustitucion_progresiva_Lena.pdf
- [46] R. F. Naryanto, H. Enomoto, A. Vo Cong *et al.*, "The effect of moisture content on the tar characteristic of wood pellet feedstock in a downdraft gasifier", *Applied Sciences*, vol. 10, n.º 8, p. 2760, 2020. <https://doi.org/10.3390/app10082760>
- [47] C. A. García-Ubaque, M. L. Vaca-Bohorquez, and G. F. Talero, "Aprovechamiento de Biomasa Peletizada en el Sector Ladrillero en Bogotá-Colombia: Análisis Energético y Am-

- biental”, *Información Tecnológica*, vol. 24, n.º 3, pp. 115-120, 2013. [En línea]. Disponible en <https://doi.org/10.4067/S0718-07642013000300013>
- [48] J. L. Ordóñez, “Pellets: energía limpia con buen futuro”, *Revista M&M*, n.º 83, art. 11, 2014. [En línea]. Disponible en <http://revista-mm.com/tableros-madera-y-subproductos/pellets-energia-limpia-buen-futuro/>
- [49] A. González H., C. A. García U., y G. F. Talero R., “Estudio de planta piloto para peletización de residuos madereros y su utilización como combustible en hornos ladrilleros”, *Tecnura*, vol. 18, n.º 40, pp. 62-70, 2014. [En línea]. Disponible en <https://www.redalyc.org/pdf/2570/257030546006.pdf>
- [50] D. T. Rodríguez P., N. E. Ramírez C., y J. A. García N., “Pellets y briquetas a partir de biomasa generada en las plantas de beneficio del fruto de la palma de aceite”, *El Palmicultor*, n.º 2, pp. 26-27, 2014.
- [51] E. R. Durango P., C. Berastegui B., y J. M. Mendoza F., “Efecto de la adición de aglomerantes en las propiedades mecánicas de los pellets de biomasa”, *Ingeniare*, vol. 27, n.º 1, pp. 83-88, 2019. [En línea]. Disponible en <https://www.scielo.cl/pdf/ingeniare/v27n1/0718-3305-ingeniare-27-01-00083.pdf>
- [52] G. Marrugo, C. Valdés, C. Gomez *et al.*, “Pelletizing of Colombian agro-industrial biomasses with crude glycerol”, *Renewable Energy*, vol. 134, pp. 558-568, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.11.004>
- [53] J. Sánchez (coord.), *Recursos naturales, medio ambiente y sostenibilidad: 70 años de pensamiento de la Cepal*, Libros de la Cepal, n.º 158 (LC/PUB.2019/18-P), Santiago: Comisión Económica para América Latina y el Caribe (Cepal), 2019. [En línea]. Disponible: <https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/e43ad745-6b7d-48e4-a016-b753fdd3b659/content>
- [54] J. L. Ordóñez, “El mal llamado desperdicio de madera: una oportunidad de desarrollo industrial con futuro”, *Revista M&M*, n.º 93, art. 5, 2016. [En línea]. Disponible: <http://revista-mm.com/forestal/mal-llamado-desperdicio-madera-oportunidad-desarrollo-industrial-futuro/>
- [55] J. E. Salazar M., y M. A. Troncoso M., “Reducción del desperdicio final de madera en el proceso de corte de una empresa productora de estibas en la ciudad de Cali”, Trabajo de grado (Ingeniero Industrial), Universidad de San Buenaventura Cali, Cali, 2018. <https://bibliotecadigital.usb.edu.co/server/api/core/bitstreams/3f3440f4-d5e2-429c-8fd1-46988fb57f0c/content>

- [56] C. D. de Souza, A. L. de Oliveira, J. P. de Sousa *et al.*, "Energy properties of pellets made from forest biomass residues", *Renewable Energy*, vol. 146, pp. 2097-2104, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.08.022>
- [57] Naciones Unidas, "Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el desarrollo sostenible", Resolución aprobada por la Asamblea General el 25 de septiembre de 2015, A/70/L1, Nueva York, 2015.
- [58] C. A. Forero N., C. A. Guerrero F., y F. E. Sierra V., "Producción y uso de pellets de biomasa para la generación de energía térmica: una revisión de los modelos del proceso de gasificación", *ITECKNE*, vol. 9, n.º 1, pp. 21-30, 2012. [En línea]. Disponible en <https://doi.org/10.15332/iteckne.v9i1.57>
- [59] G. Soto, y M. Núñez, "Fabricación de pellets de carbonilla, usando aserrín de Pinus radiata (D. Don), como material aglomerante", *Maderas. Ciencia y Tecnología*, vol. 10, n.º 2, pp. 129-137, 2008.
- [60] K. J. Tize, H. Fadimatou, y M. A. Inous, "Traditional pellet production from sawdust as source of energy for cooking using improved stove in Mouda, a locality of Maroua, Cameroon", *Journal of Wastes and Biomass Management*, vol. 4, n.º 2, pp. 59-63, 2022. <http://doi.org/10.26480/jwbm.02.2022.59.63>
- [61] S. Obidzinski, J. Szyszak-Bargłowicz, G. Zajac *et al.*, "The effect of bakerywaste addition on pine sawdust pelletization and pellet quality", *Energies*, vol. 17, p. 523, 2024. <https://doi.org/10.3390/en17020523>
- [62] E. Sermyagina, C. Mendoza M., J. Lahti *et al.*, "Characterization of pellets produced from extracted sawdust: effect of cooling conditions and binder addition on composition, mechanical and thermochemical properties", *Biomass and Bioenergy*, vol. 164, p. 106562, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2022.106562>
- [63] Wahyudi, M. Arifudin, D. I. M. Annakotapary *et al.*, "Characteristics of wood pellet from sawdust pelletized with the hand meat grinder", *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 753, p. 012017, 2021. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/753/1/012017>
- [64] S. Wibowo, K. Arief, y T. K. Waluyo, "Characteristics of wood pellets from over-dry sawdust waste", *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 914, p. 012069, 2021. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/914/1/012069>
- [65] C. Tenorio, R. Moya, J. Valaert *et al.*, "Potencial de fabricación de pellets de residuos forestales de *Cupressus lusitanica* y *Tectona grandis* en Costa Rica", *Tecnología en Marcha*, vol. 29, n.º 2, pp. 95-109, 2016.

- [66] N. Zohdi, y R. Yang, "Material anisotropy in additively manufactured polymers and polymer composites: a review", *Polymers*, vol. 13, n.º 19, p. 3368, 2021. <https://doi.org/10.3390/polym13193368>

