



# Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

---



Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera  
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

## “Caracterización de los pellets con fines bioenergéticos elaborados a partir de la madera de cuatro fabáceas”

Tesis que para obtener el título de:

**MAESTRO EN CIENCIAS Y TECNOLOGÍA DE LA MADERA**

Presenta:

ING. JESÚS HERNÁNDEZ MÉNDEZ

Directores de tesis:

Dr. JOSÉ GUADALUPE RUTIAGA QUIÑONES

Dr. JOSÉ JUAN ALVARADO FLORES

Co-Director de tesis: M.C. LUIS FERNANDO PINTOR IBARRA

# DEDICATORIA

*Como un árbol dedica sus frutos a sus raíces, entregó este trabajo a mi familia. A mis padres, Araceli y Faustino, mis columnas. A mis hermanos, Guadalupe Faustino y Jaylah, el viento que impulsa mis alas.*

Este logro es nuestro.

Con cariño,

Jesús Hernández Méndez

# AGRADECIMIENTOS

- ❖ A la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, particularmente a su distinguido programa de posgrado, por brindarme las herramientas para mi crecimiento profesional y el cumplimiento de mis objetivos formativos.
- ❖ Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT), por confiar en mi potencial al otorgarme el apoyo económico que hizo posible mi formación en el posgrado de Ciencias en Tecnología de la Madera de la Universidad Michoacana, donde consolidé mi vocación científica y senté las bases de mi carrera.
- ❖ A quienes son mi sustento emocional: mi familia, por su respaldo inquebrantable, afecto sin condiciones y todas las renuncias que hicieron para que yo lograra mis aspiraciones.
- ❖ A mis colegas, amigos y profesores, por hacer de esta etapa formativa un periodo enriquecedor lleno de aprendizajes compartidos.
- ❖ Con especial gratitud a mis tutores académicos y mesa sinodal: Dr. José J. Alvarado Flores; M.C. Luis F. Pintor Ibarra; Dr. Víctor M. Berrueta Soriano; Dr. Rafael Herrera Bucio; por último, pero no menos importante, al Dr. José G. Rutiaga Quiñones, por compartir generosamente su sabiduría, brindarme orientación constante y mostrarme paciencia durante todo el proceso.

# ÍNDICE

|  |           |
|--|-----------|
| DEDICATORIA .....  | i         |
| AGRADECIMIENTOS .....  | ii        |
| RESUMEN.....   | vii       |
| ABSTRACT .....   | viii      |
| <b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>   | <b>1</b>  |
| 1.1. Contexto global de la energía y los biocombustibles .....           | 1         |
| 1.2. La biomasa como recurso energético .....                            | 1         |
| 1.3. Las fabáceas como fuente de biomasa y el pino como referencia ..... | 2         |
| <b>2. ANTECEDENTES .....</b>   | <b>4</b>  |
| <b>3. JUSTIFICACIÓN .....</b>  | <b>7</b>  |
| <b>4. HIPÓTESIS.....</b>   | <b>9</b>  |
| <b>5. OBJETIVOS.....</b>   | <b>10</b> |
| 5.1. Objetivo general .....  | 10        |
| 5.2. Objetivos específicos .....   | 10        |
| <b>6. METODOLOGÍA .....</b>  | <b>11</b> |
| 6.1. La Biomasa en México.....   | 11        |
| 6.2. Colecta y preparación del material de estudio .....                 | 13        |
| 6.2.1. Biomasa de fabáceas.....  | 13        |
| 6.2.2. Biomasa de pino .....   | 13        |
| 6.3. Granulometría .....   | 15        |
| 6.4. Fabricación de pellets .....  | 15        |
| 6.5. Caracterización de los pellets .....                                | 17        |
| 6.5.1. Análisis proximal .....   | 17        |
| 6.5.2. Poder calorífico superior .....                                   | 20        |
| 6.5.3. Análisis elemental .....  | 20        |
| 6.5.4. Microanálisis de cenizas.....                                     | 21        |
| 6.5.5. Longitud y diámetro .....   | 21        |
| 6.5.6. Densidad unitaria (Individual).....                               | 21        |

|  |           |
|--|-----------|
| 6.5.7. Densidad volumétrica (Aparente) ..... | 22        |
| 6.5.8. Durabilidad mecánica .....            | 23        |
| 6.6. Análisis estadístico .....              | 25        |
| <b>7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....       | <b>26</b> |
| 7.1. Granulometría .....                     | 26        |
| 7.2. Análisis proximal .....                 | 32        |
| 7.3. Poder calorífico superior (PCS) .....   | 35        |
| 7.4. Análisis elemental .....                | 36        |
| 7.5. Microanálisis de cenizas.....           | 38        |
| 7.6. Longitud y diámetro .....               | 40        |
| 7.7. Densidad unitaria .....                 | 41        |
| 7.8. Densidad aparente .....                 | 43        |
| 7.9. Durabilidad mecánica .....              | 44        |
| <b>8. CONCLUSIONES</b> .....                 | <b>46</b> |
| <b>9. RECOMENDACIONES</b> .....              | <b>47</b> |
| <b>10. BIBLIOGRAFÍA</b> .....                | <b>48</b> |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| <b>Figura 1.</b> Caracterización de pellets en fabáceas y <i>Pinus</i> spp. ....                     | 12 |
| <b>Figura 2.</b> Municipio de Cuitzeo del Porvenir en Michoacán, México. (Fuente: INEGI, 2025). .... | 13 |
| <b>Figura 3.</b> Aserrín de biomasa de <i>Pinus</i> spp. ....  | 14 |
| <b>Figura 4.</b> Localidad de Huajúmbaro, Michoacán, México. (Fuente: INEGI, 2025). ....             | 14 |
| <b>Figura 5.</b> Determinación de granulometría. ....  | 15 |
| <b>Figura 6.</b> Proceso de pelletización. ....  | 16 |
| <b>Figura 7.</b> Analizador de humedad para granos GM640. ....                                       | 16 |
| <b>Figura 8.</b> Composición proximal en pellets. ....   | 17 |
| <b>Figura 9.</b> Bomba calorimétrica (Parr, 1108). ....  | 20 |
| <b>Figura 10.</b> Dimensiones en pellets. ....   | 21 |
| <b>Figura 11.</b> Proceso de obtención de la densidad unitaria. ....                                 | 22 |
| <b>Figura 12.</b> Evaluación de la densidad volumétrica mediante un volumen conocido. ....           | 23 |
| <b>Figura 13.</b> Proceso para el análisis de durabilidad mecánica. ....                             | 24 |
| <b>Figura 14.</b> Distribución en tamaño de partículas para <i>A. farnesiana</i> . ....              | 26 |
| <b>Figura 15.</b> Distribución en tamaño de partícula para <i>A. pennatula</i> . ....                | 27 |
| <b>Figura 16.</b> Distribución en tamaño de partícula para <i>Albizia plurijuga</i> . ....           | 28 |
| <b>Figura 17.</b> Distribución en tamaño de partícula para <i>P. laevigata</i> . ....                | 29 |
| <b>Figura 18.</b> Distribución en tamaño de partícula para <i>Pinus</i> spp. ....                    | 30 |
| <b>Figura 19.</b> Resultados de análisis proximales en (%). ....                                     | 32 |
| <b>Figura 20.</b> Resultados para el poder calorífico superior. ....                                 | 36 |
| <b>Figura 21.</b> Análisis elemental en (%). ....  | 37 |
| <b>Figura 22.</b> Resultados para longitud y diámetro de pellets. ....                               | 41 |
| <b>Figura 23.</b> Resultados para la densidad unitaria en pellets. ....                              | 42 |
| <b>Figura 24.</b> Resultados para la densidad aparente de los pellets. ....                          | 44 |
| <b>Figura 25.</b> Resultados para la durabilidad mecánica en pellets. ....                           | 45 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|  |    |
|--|----|
| <b>Tabla 1.</b> Elementos presentes en las cenizas ppm. .... | 39 |
|--|----|

Este trabajo de investigación, “Caracterización de los pellets con fines bioenergéticos elaborados a partir de la madera de cuatro fabáceas”, se llevó a cabo en la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera dependiente de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH) dentro del proyecto de investigación titulado “Propiedades químicas y energéticas de la madera de cuatro especies de fabáceas” apoyado por la Coordinación de la Investigación Científica de la UMSNH al Dr. José Guadalupe Rutiaga Quiñones.

## RESUMEN

La presente investigación evaluó las características de pellets para cuatro especies de Fabaceae: *Acacia farnesiana* (L.) Willd, *A. pennatula* (Schl. et Cham) Benth, *Albizia plurijuga* (Standl.) Britton & Rose y *Prosopis laevigata* (Humb. & Bonpl.) Johnst., y se compararon con pellets de *Pinus* spp., para su uso bioenergético. Se realizaron los análisis: granulometría, análisis proximal que incluye la medición de la humedad, la materia inorgánica, materia volátil y el carbono fijo. Composición elemental: C, H, O, N, S. Análisis de minerales en cenizas, valor calorífico superior, mediciones de longitud y diámetro, densidad individual, densidad volumétrica y durabilidad mecánica. La mayor concentración de partículas en la granulometría se encontró en las fracciones de 1.0, 0.5 y 2 mm. En la evaluación proximal, las Fabaceae mostraron mayor contenido de materia inorgánica y carbono fijo, en contraste, menor contenido de materia volátil, en comparación con *Pinus* spp. Todas las especies cumplieron con los estándares de humedad. Se determinó la composición elemental de los pellets, con diferencias en las proporciones de C, H, N y O. Por otro lado, se identificaron 22 elementos en el análisis de minerales en las cenizas Al, Ca, Fe, K, Mg, Mn, Na, P y Si. El pino mostró el mayor valor calorífico, aunque todos los tipos de pellets superaron los límites establecidos por las normas. Los pellets cumplieron con las normas de dimensiones y densidad. *Pinus* spp. mostró mayor durabilidad mecánica que las Fabaceae. De acuerdo con los resultados obtenidos, las Fabaceae son viables para elaborar pellets, aunque con menor durabilidad que *Pinus* spp.

**Palabras clave:** Pellets, Fabaceae, *Pinus* spp., bioenergía, granulometría, evaluación proximal, valor calorífico, durabilidad mecánica.

# ABSTRACT

This research evaluated the characteristics of pellets from four Fabaceae species: *Acacia farnesiana* (L.) Willd, *A. pennatula* (Schl. et Cham) Benth, *Albizia plurijuga* (Standl.) Britton & Rose, and *Prosopis laevigata* (Humb. & Bonpl.) Johnst. These were compared with *Pinus* spp. pellets for their bioenergetic use. The following analyses were conducted: particle size distribution (granulometry), proximate analysis (including moisture content, ash, volatile matter, and fixed carbon), elemental composition (C, H, O, N, S), mineral analysis in ashes, higher heating value, length and diameter measurements, individual density, bulk density, and mechanical durability. The highest concentration of particles in the granulometry was found in the 1.0, 0.5-, and 2-mm fractions. In the proximate evaluation, the Fabaceae showed a higher content of ash and fixed carbon, in contrast to a lower content of volatile matter, compared to *Pinus* spp. All species met the moisture standards. The elemental composition of the pellets was determined, revealing differences in the proportions of C, H, N, and O. Additionally, 22 elements were identified in the mineral analysis of the ashes, including Al, Ca, Fe, K, Mg, Mn, Na, P, and Si. Pine pellets exhibited the highest heating value, although all pellet types exceeded the limits established by the standards. The pellets complied with dimensional and density standards. *Pinus* spp. demonstrated greater mechanical durability than the Fabaceae. According to the results obtained, Fabaceae are viable for pellet production, albeit with lower durability than *Pinus* spp.

Keywords: Pellets, Fabaceae, *Pinus* spp., bioenergy, granulometry, proximate analysis, heating value, mechanical durability.

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. Contexto global de la energía y los biocombustibles

La creciente necesidad global de recursos energéticos renovables ha estimulado significativamente el sector de pellets de madera. Esto se debe a la transición que se está llevando a cabo a nivel mundial, dejando atrás los carburantes fósiles y optando por alternativas energéticas más sostenibles. Esta transformación está motivada por las complicaciones que presenta el calentamiento a escala mundial y la urgencia de abatir las emisiones de carbono (Lee y Hsu, 2025). En el año 2022, la cantidad de energías ecológicas en la generación de electricidad a escala global ascendió a cerca del 30%, lo que supone un crecimiento de diez puntos porcentuales frente a 2010. Durante este periodo, la biomasa aportó el 10% del total de la producción energética mundial (Enerdata, 2022; Agu *et al.*, 2025). En este sentido, México depende principalmente de los hidrocarburos para satisfacer su demanda energética, donde el petróleo crudo constituye el 52.65% del total, seguido por el gas natural con 21.69%. Las energías renovables, que incluyen la geotermia, la energía fotovoltaica, la eólica, la bioenergía y la hidráulica, representan en conjunto el 13.97% (Secretaría de Energía, 2023).

## 1.2. La biomasa como recurso energético

En este contexto, la biomasa se posiciona como una alternativa energética renovable con un gran potencial para afrontar retos globales como la demanda energética, la expulsión de efluvios de efecto invernadero y el calentamiento global. Asimismo, la biomasa como recurso energético se considera una medida muy eficaz para la preservación de los bosques frente a incendios y plagas, así como para la gestión adecuada de los desechos (Pradhan *et al.*, 2025). No obstante, la biomasa, al ser utilizada como energía, presenta características como una forma irregular, densidad baja y alto contenido de humedad. Estos factores dificultan su manipulación, traslado y almacenamiento, lo que limita su aprovechamiento energético (Nunes *et al.*, 2014; Puig-Arnava *et al.*, 2016).

En la actualidad, la compactación más empleada en biomasa es la pelletización, mediante la cual se producen pequeños cilindros de material comprimido con una alta densidad energética a través de procesos de aglomeración y prensado (Tadesse *et al.*, 2023).

Los pellets ofrecen beneficios como un manejo simple, almacenamiento eficaz y costos de transporte significativamente menores en comparación con la biomasa sin procesar o combustibles de menor densidad, como la viruta o aserrín de madera, debido a su mayor densidad energética y volumétrica. Esto permite transportar una mayor cantidad de energía por unidad de volumen y reduce sustancialmente los gastos logísticos (Pokhrel *et al.*, 2022). Estas características, junto con su tamaño uniforme, los hacen ideales para la alimentación automatizada en plantas industriales o incluso en sistemas de calefacción residenciales que disponen de equipos compatibles (PelWod, 2025). Estos beneficios, según Pradhan *et al.* (2018a), facilitan la integración de los pellets en procesos industriales automatizados, optimizando la eficiencia y reduciendo los costos operativos. La calidad de los pellets es un factor crucial que depende tanto de la biomasa como del método de producción (Anukam *et al.*, 2021). La materia prima óptima debe poseer un alto valor energético, una cantidad significativa de carbono fijo y lignina, y niveles bajos de materia inorgánica (cenizas), nitrógeno y azufre, además de una alta resistencia mecánica y densidad energética para garantizar un desempeño eficiente (Zhang *et al.*, 2022; Sarker *et al.*, 2023).

### 1.3. Las fabáceas como fuente de biomasa y el pino como referencia

Dentro de este panorama, la familia Fabaceae (Leguminosae) se perfila como una alternativa prometedora para la elaboración de pellets. Esta familia botánica, que es la tercera más extensa entre las angiospermas, agrupa entre 730 y 750 géneros y entre 19,400 y 20,000 especies (Llamas y Acedo, 2016; Stevens, 2017), lo que denota una vasta disponibilidad de biomasa. En el contexto mexicano, las fabáceas representan el segundo grupo de plantas con mayor diversidad, con especies distribuidas a lo largo de todo el territorio nacional (Estrada-Castillón *et al.*, 2005). Específicamente, en las inmediaciones de la cuenca del lago de Cuitzeo, Michoacán, estas especies son notablemente abundantes y prosperan en diversos tipos de vegetación, incluyendo bosques templados, matorrales, selva baja caducifolia, y ambientes acuáticos y subacuáticos (Maza-Villalobos *et al.*, 2014; Salazar-Herrera *et al.*, 2023).

Si bien muchas especies de fabáceas tienen usos tradicionales, como alimento para consumo humano y animal, o con fines ornamentales y forrajeros (Llamas y Acedo, 2016), la fracción leñosa de varios géneros, como *Acacia*, *Albizia* y *Prosopis*, es comúnmente utilizada para artesanías, mangos de herramientas, materiales de construcción, postes y leña (Estrada-Castillón *et al.*, 2005), entre las que sobresalen especies como *Acacia farnesiana* (L.) Willd (Huizache), *A. pennatula* (Schl. et Cham) Benth (Tepame), *Albizia plurijuga* (Standl.) Britton & Rose (Palo blanco) y *Prosopis laevigata* (Humb. & Bonpl.) Johnst. (Mezquite). En este sentido, representan un recurso accesible y subutilizado con un considerable potencial para la valorización energética. Su rápido crecimiento y capacidad para establecerse en suelos degradados (Palacios-Romero *et al.*, 2021; Casiano y Paz, 2018). consolidan su atractivo como fuente sostenible de biomasa.

Estudios previos han proporcionado información sobre componentes químicos y características energéticas de estas cuatro especies de fabáceas, lo que sugiere su potencial como sustento energético valioso, debido a su elevado valor energético y su composición química favorable (Salazar-Herrera *et al.*, 2023; Pintor-Ibarra *et al.*, 2024). Sin embargo, para determinar la viabilidad de los pellets de fabáceas, es crucial compararlos con un estándar de referencia establecido. *Pinus* spp. representa un punto de comparación ideal debido a sus cualidades físicas, químicas y mecánicas idóneas, y a su gran presencia en el mercado de biocombustibles sólidos (Núñez-Retana *et al.*, 2020; Gonzales y Verastegui, 2024; Ramírez Ramírez *et al.*, 2025).

## 2. ANTECEDENTES

Salazar-Herrera *et al.* (2023) evaluaron las propiedades energéticas de siete especies de Fabaceae, destacando particularmente los resultados para *Acacia farnesiana*, *A. pennatula*, *Albizia plurijuga* y *Prosopis laevigata*. El estudio reveló que: *Albizia plurijuga* presentó el mayor contenido de celulosa en albura (58.83%) entre todas las especies analizadas, junto con un alto porcentaje de material volátil (91.75% en albura). Sin embargo, su corteza mostró el mayor contenido de cenizas (11.49%), lo que podría limitar su uso energético. *Prosopis laevigata* destacó por su elevado poder calorífico (hasta 21.23 MJ/kg en corteza) y bajo contenido de azufre (0.04% en duramen), siendo una de las especies más promisorias para biocombustibles. Además, presentó un alto porcentaje de carbono fijo en corteza (23.44%). *Acacia farnesiana* mostró valores intermedios en composición química, pero presentó el mayor contenido de azufre entre las especies estudiadas (0.14% en madera), factor importante a considerar en procesos de combustión. *Acacia pennatula* registró un valor calorífico considerable (17.36 MJ/kg en corteza) y un contenido moderado de cenizas, posicionándola como una alternativa viable para uso energético. El análisis de cenizas mostró que en todas estas especies predominaron elementos como calcio, potasio y magnesio, sin presencia de metales pesados. Los autores concluyeron que estas cuatro especies presentan características adecuadas para producción de biocombustibles sólidos, aunque destacaron que *Prosopis laevigata* y *Albizia plurijuga* (en su albura) son las más prometedoras por su balance entre poder calorífico y composición química.

### ***Acacia farnesiana* (L.) Willd**

Mejía (2016) analizó el potencial dendroenergético de cuatro especies en bosque seco hondureño, destacando que *A. farnesiana* presentó la mayor densidad de madera (0.89 g/cm<sup>3</sup>) y un poder calorífico de 4576.50 kcal/kg. Aunque mostró menor crecimiento que las especies de *Leucaena*, sus propiedades físicas y energéticas la posicionan como alternativa viable para biocombustibles en zonas áridas, particularmente para combustión directa por su alta densidad.

Barrera-Calva *et al.* (2021) investigaron la capacidad energética de especies leñosas de zonas áridas de México, incluyendo el huizache (*Acacia farnesiana*). Donde para *A. farnesiana*, el poder calorífico fue de 11,420 J/g por ATG-ATD y de 11,605 J/g con bomba calorimétrica. La variación entre los métodos fue ligeramente menor con ATG-ATD, pero los resultados fueron muy cercanos. En el análisis térmico mostró una pérdida de peso del 5% al 8% por humedad, y un 54% adicional entre 250°C y 350°C, principalmente por degradación de celulosa. La lignina se degradó entre 350°C y 450°C, con una pérdida de masa de hasta el 26% para el huizache. El análisis XPS de las cenizas de *A. farnesiana* confirmó la ausencia de metales tóxicos, indicando que es un combustible sostenible y renovable.

### ***A. pennatula* (Schl. et Cham) Benth**

Apolinar-Hidalgo *et al.* (2017) reportaron una caracterización energética comparativa de maderas de especies forestales mexicanas, destacando que *A. pennatula* presentó propiedades superiores a *Trema micrantha* para uso como biocombustible. Los análisis basados en normas ASTM mostraron que *A. pennatula* alcanzó un poder calorífico significativamente mayor (18.54 kJ/g) frente a 17.76 kJ/g de *T. micrantha*, junto con mayor densidad básica (0.571 vs 0.243 g/cm<sup>3</sup>) y contenido de material volátil (86.56% vs 82.90%). El estudio reveló que estas características, sumadas a su bajo contenido de cenizas (1.07%) y humedad (9.15%), junto con un índice de valor combustible de 10,814, posicionan a *A. pennatula* como materia prima idónea para producción energética, particularmente en aplicaciones de combustión directa en comunidades rurales.

Ruiz-Aquino *et al.* (2022) examinaron las propiedades energéticas de 22 especies maderables en Oaxaca, México, destacando que *A. pennatula* presentó características relevantes para uso como biocombustible. La especie mostró una densidad en base seca de 0.608 g/cm<sup>3</sup> y un valor calorífico superior de 19.54 MJ/kg, valores que la ubican entre las maderas con mejor potencial energético del estudio. En el análisis proximal, *A. pennatula* registró 78.04% de fracción volátil, un porcentaje de cenizas de 4.51% y 17.44% de carbono fijo. Estos parámetros, combinados con su densidad y poder calorífico, le otorgaron un Número de Combustible (FN) de 58.10% y un Índice de Valor de Combustible (FVI) de 2.63. Si bien su porcentaje de materia volátil fue menor que el de algunas especies de pino, su balance general de propiedades sugiere una combustión eficiente.

### ***Albizia plurijuga* (Standl.) Britton & Rose**

Salazar-Herrera *et al.* (2023) investigaron las propiedades energéticas y químicas de siete especies de fabáceas, incluyendo *Albizia plurijuga*. En este estudio, se encontró que la albura de *A. plurijuga* presentó el mayor contenido de celulosa (58.83%) entre las especies analizadas, mientras que su corteza registró un alto contenido de cenizas (11.49%). Además, la albura mostró un elevado porcentaje de material volátil (91.75%), y el valor calorífico de la corteza fue de 21.23 MJ/kg. El análisis de cenizas reveló que los elementos más abundantes fueron Ca, K, P, Mg y Na.

### ***Prosopis laevigata* (Humb. & Bonpl.) Johnst**

Martínez-Pérez *et al.* (2015) evaluaron las propiedades energéticas de diez especies maderables mexicanas, destacando que *P. laevigata* presentó valores caloríficos superiores en su duramen (hasta 19.11 MJ/kg) en comparación con su albura y corteza. El estudio reveló que esta especie mantuvo bajos contenidos de cenizas (0.22-2.1% en duramen), mostrando la misma tendencia general donde el poder calorífico disminuye al aumentar el contenido de cenizas. El análisis por rayos X de las cenizas detectó principalmente calcio, potasio, magnesio y fósforo, sin presencia de metales pesados, lo que confirma su potencial como biocombustible limpio.

Pintor-Ibarra *et al.* (2024) caracterizaron el material lignocelulósico de *P. laevigata* mediante análisis químicos tradicionales y termogravimétricos (TGA-DTG), identificando un alto contenido de celulosa (46.08–48.28%) y lignina (30.57–32.44%), con bajo porcentaje de cenizas (1.77–1.90%). El poder calorífico superó los 20.16 MJ/kg, respaldado por modelos matemáticos (18.23–21.07 MJ/kg). El análisis elemental mostró predominio de C (46.4%) y O (46.43%), mientras que el microanálisis de cenizas detectó K y Ca como elementos principales. La espectroscopía FT-IR confirmó grupos funcionales típicos de biomasa lignocelulósica. Los autores destacaron que el método TGA-DTG redujo tiempo y reactivos, validando su eficacia para estudios energéticos.

### 3. JUSTIFICACIÓN

Entre los problemas más críticos del siglo XXI destaca la crisis climática. Esta situación ha intensificado la urgencia de incorporar fuentes de energía sostenibles que reduzcan la confianza excesiva en los combustibles fósiles, principales emisores de gases con efecto invernadero, como CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y NO<sub>x</sub>, los cuales impulsan el cambio climático y afectan la salud ambiental (Forero *et al.*, 2012).

En este contexto, los pellets de biomasa emergen como una alternativa renovable y ecológica, con ventajas significativas frente a los combustibles fósiles. A diferencia del carbón o el diésel, los pellets producidos a partir de biomasa forestal, en condiciones de renovabilidad, pueden generar un balance de carbono casi neutro. Esto se debe a que el CO<sub>2</sub> liberado durante su combustión tiende a ser compensado por la absorción de carbono realizada por la biomasa en crecimiento, siempre que la tasa de regeneración del recurso sea igual o superior a la de su consumo (McKendry, 2002). Además, presentan un contenido mínimo de azufre, lo que reduce drásticamente las emisiones de SO<sub>2</sub> y, por ende, el riesgo de lluvia ácida (Demirbas, 2007). Otro beneficio clave de los pellets es su eficiencia en la combustión, ya que su baja humedad y alta densidad energética los hacen más eficientes que la biomasa en bruto para sistemas de calefacción y generación eléctrica (Oberberger y Thek, 2010). Asimismo, su producción fomenta una economía circular al aprovechar residuos forestales y agrícolas que de otro modo serían desechados (Nunes *et al.*, 2016).

Las especies leñosas como *Acacia farnesiana*, *A. pennatula*, *Albizia plurijuga* y *P. laevigata*, nativas de las tierras áridas y semiáridas de México, son especialmente prometedoras para la fabricación de pellets debido a que poseen características excepcionales que las hacen candidatas ideales para la elaboración de pellets (Salazar-Herrera *et al.*, 2023). Aunque la madera de estos géneros se utiliza en la actualidad para hacer artesanías, mangos de herramientas, sillas de montar, materiales de construcción, postes para cercas, carbón y leña (Estrada-Castillón *et al.*, 2005), una porción considerable de su biomasa, incluyendo los residuos generados de estos procesos como el aserrín, a menudo no se aprovecha plenamente o se considera un desecho sin valor. El objetivo es aprovechar este residuo para evaluar su viabilidad como biocombustible sólido.

Es por esto que, aún falta investigación para optimizar su uso en la fabricación de biocombustibles sólidos de alta densidad energética. Por lo tanto, este estudio busca caracterizar los pellets obtenidos de estas especies para evaluar su viabilidad como biocombustibles sólidos. Al hacerlo, no sólo se promueve el uso de recursos locales, sino que también se contribuye a un futuro energético más limpio, reduciendo emisiones contaminantes ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{NO}_x$  y  $\text{SO}_2$ ) y apoyando el desarrollo de comunidades rurales mediante tecnologías sostenibles. De esta manera, la investigación pudiera aportar una solución para mitigar el cambio climático y resguardar el desarrollo sostenible para los habitantes de hoy y del mañana.

## 4. HIPÓTESIS

Los pellets de madera elaborados a partir de las especies *Acacia farnesiana*, *A. pennatula*, *Albizia plurijuga* y *Prosopis laevigata* presentan propiedades físicas, químicas, mecánicas y energéticas comparables o superiores a los pellets de madera de *Pinus* spp., lo que los convertiría en una opción factible y sustentable para la producción de bioenergía.

# 5. OBJETIVOS

## 5.1. Objetivo general

Conocer las propiedades físicas, químicas, mecánicas y energéticas de los pellets de madera de cuatro fabáceas (*Acacia farnesiana*, *A. pennatula*, *Albizia plurijuga* y *Prosopis laevigata*), y comparar sus propiedades con los pellets obtenidos de *Pinus* spp.

## 5.2. Objetivos específicos

1. Elaborar los pellets mediante un equipo convencional.
2. Determinar las características físicas.
3. Conocer las propiedades químicas.
4. Evaluar las propiedades mecánicas y energéticas.

# 6. METODOLOGÍA

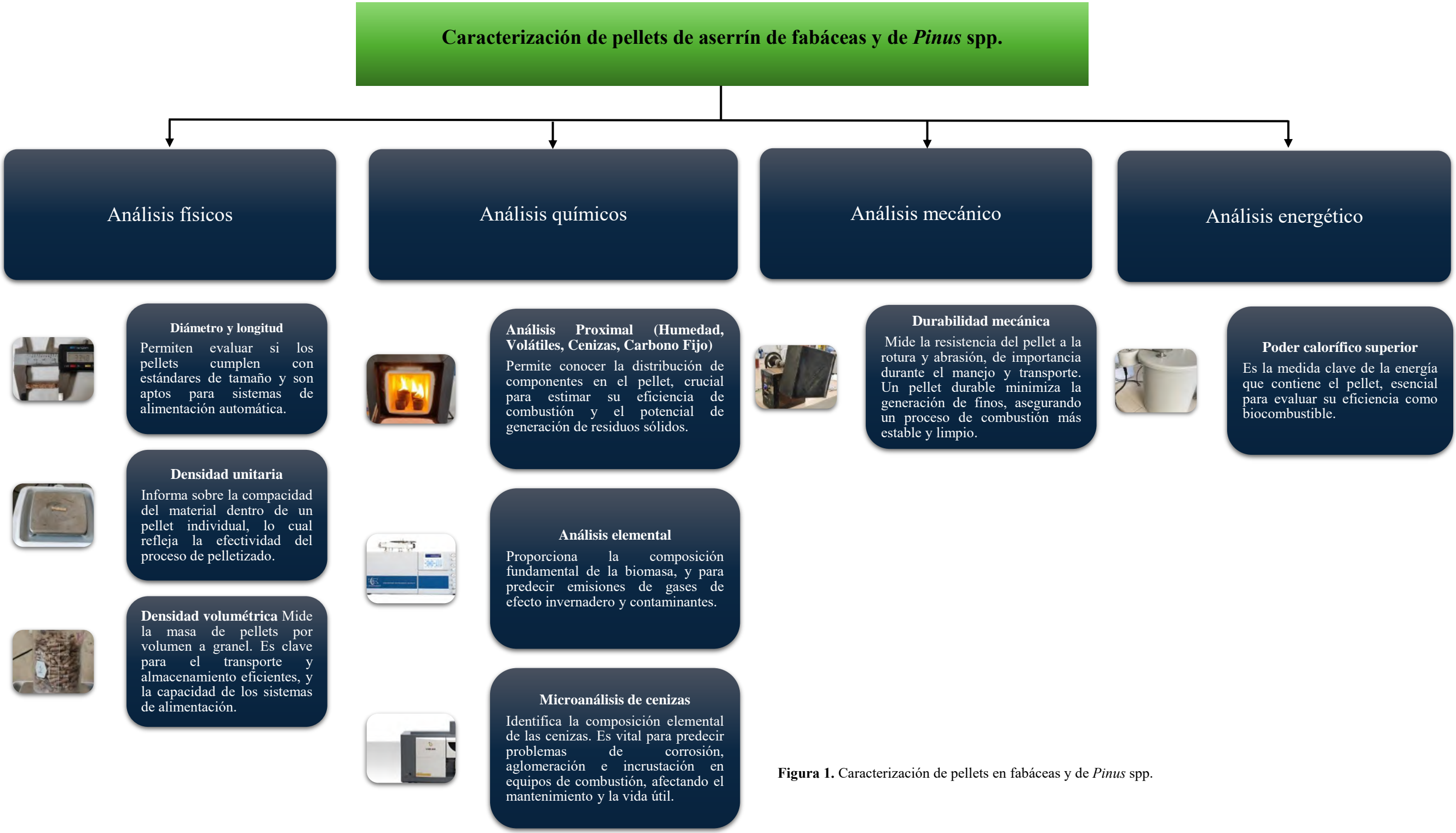
## 6.1. La Biomasa en México

Recordando que actualmente, la bioenergía es la principal fuente de energía renovable a nivel global, representando cerca del 10% del uso total de energía y el 77% de todas las renovables (incluyendo hidroeléctrica, solar, eólica y geotérmica). Gran parte de esta bioenergía global, más del 80% de la demanda total, proviene de biocombustibles sólidos (Maseira y Rivero, 2022).

En contraste, la matriz energética de México aún depende en gran medida de los hidrocarburos. El petróleo crudo constituye el 52.65% del total, seguido por el gas natural con un 21.69%. Las energías renovables apenas suman el 13.97%, y dentro de estas, la biomasa contribuye con un 4.63% (Secretaría de Energía, 2023).

A pesar de su actual modesta contribución en México, la biomasa presenta un potencial considerable para diversificar la matriz energética. Sin embargo, esta es una fuente de energía inherentemente heterogénea en su composición estructural, anatómica y química (Bustamante *et al.*, 2016).

Por ello, es crucial realizar análisis físicos, químicos, energéticos y mecánicos de la biomasa (Alvarado y Rutiaga, 2018). En la Figura 1 se muestra un panorama sobre el estudio que se realizó a los pellets de fabáceas y de pino, donde se llevaron a cabo estas cuatro caracterizaciones (física, química, mecánica y energética), detallando la importancia de los análisis.

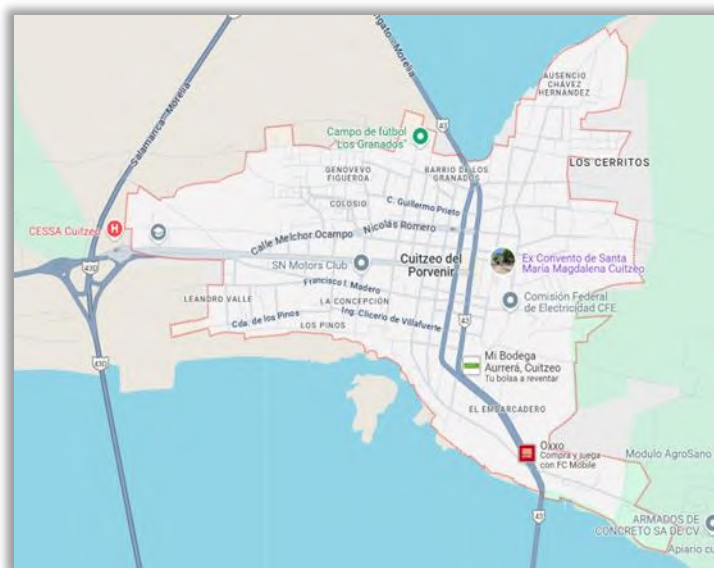


**Figura 1.** Caracterización de pellets en fabáceas y de *Pinus* spp.

## 6.2. Colecta y preparación del material de estudio

### 6.2.1. Biomasa de fabáceas

Los árboles de la familia fabáceas seleccionados para este estudio fueron: *Acacia farnesiana* (L.) Willd., *A. pennatula* (Schl. et Cham.) Seigler & Ebinger, *Albizia plurijuga* (Standl.) Britton & Rose y *Prosopis laevigata* (Humb. & Bonpl.) Johnst. Estas especies forman parte de la vegetación de la cuenca del lago de Cuitzeo, ubicada en el estado de Michoacán, México (Figura 2). Las muestras de aserrín de estas maderas de fabáceas se recolectaron de talleres locales en Cuitzeo, Michoacán (19.9725367 N, -101.1470055W). Cada lote de aserrín (aproximadamente 50 kg), cuyo contenido de humedad inicial oscilaba entre el 30% y el 45%, se secó a la sombra hasta alcanzar un contenido de humedad de aproximadamente el 12% (UNE-EN ISO 18134-1, 2016).



**Figura 2.** Municipio de Cuitzeo del Porvenir en Michoacán, México. (Fuente: INEGI, 2025).

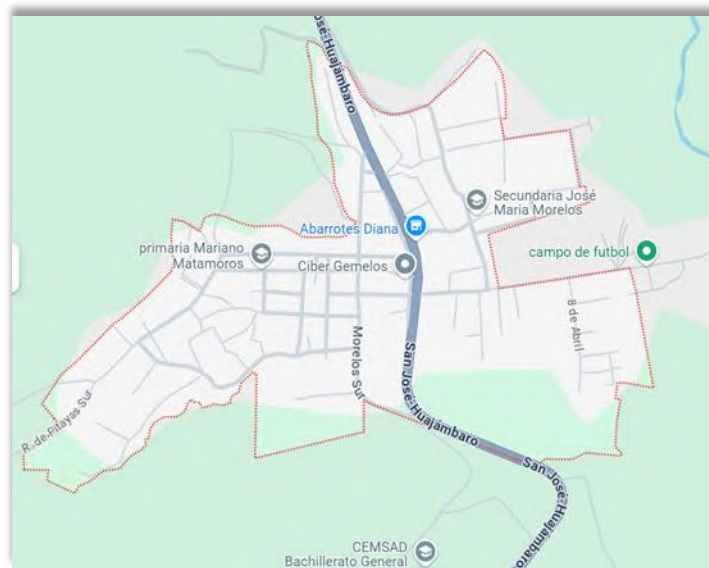
### 6.2.2. Biomasa de pino

Adicionalmente, se utilizó aserrín de pino (*Pinus* spp.) (Figura 3), como material de referencia o comparación. Se tomó una muestra de aproximadamente 50 kg de una industria maderera en la localidad de Huajúbaro, Michoacán, México (19.6816784 N, -

100.7435399W) (Figura 4). De manera similar, el aserrín de pino, que presentaba un porcentaje de humedad inicial de alrededor del 40%, se secó a la sombra.



**Figura 3.** Aserrín de biomasa de *Pinus* spp.



**Figura 4.** Localidad de Huajúmbaro, Michoacán, México. (Fuente: INEGI, 2025).

### 6.3. Granulometría

En apego a la norma internacional UNE-EN ISO 17827-2 (2016), se procedió a medir la distribución granulométrica de la biomasa antes de su pelletización. El análisis consistió en evaluar el porcentaje de masa presente en cada rango de distribución de tamaños.

Con el fin de analizar la distribución granulométrica, se hizo uso de un agitador de tamices RO-TAP modelo RX-29 (W.S. Tyler, Mentor, OH, USA), un equipo de alta precisión diseñado específicamente para este tipo de análisis. Se realizó el análisis de tamaño durante 3 minutos con 5 muestras diferentes de 50 g de aserrín recolectadas (Figura 5).



Figura 5. Determinación de granulometría.

### 6.4. Fabricación de pellets

Después de que se consiguió la biomasa con los tamaños de partícula ideales, se prepararon 50 kg de cada una de las muestras de las cuatro especies de leguminosas y una de *Pinus* spp. Se utilizó la lignina presente en la biomasa natural como un componente de unión.

La fabricación de pellets es una operación industrial que implica la compresión de materiales en pequeñas formas cilíndricas. La producción de los pellets finales se realizó en conjunto con el Grupo Interdisciplinario de Tecnología Rural Apropiable, AC. (GIRA), utilizando el equipo peletizador Pellet Mill Meelco (tipo ZLSP200C, Meelco Co., Opa Locka, FL, USA), que tiene la capacidad de procesar entre 80 y 120 kg de pellets por hora y está equipado con una matriz plana de 6 mm de diámetro. El proceso de elaboración de los pellets se esquematiza en la Figura 6.

Es crucial que el material a ser convertido en pellets tenga un nivel de humedad apropiado, ya que es un factor crítico para lograr pellets de alta calidad. En caso de ser necesario, se agrega agua con un rociador, mezclando el material hasta alcanzar un rango de humedad entre el 12% y el 20% para especies de biomasa, según la experiencia del personal operativo. Cuando la biomasa carece del nivel de humedad idóneo para ser procesada, los pellets tienden a salir frágiles y quebradizos. Se debe señalar que para cada tipo de madera es necesario identificar la humedad ideal mediante ensayos y ajustes. La humedad se verifica empleando el equipo Grain Moisture Meter GM640, que puede medir la humedad en base húmeda (Figura 7).

| Biomasa 50 kg  | Biomasa con el contenido de humedad ideal  | Peletizadora MEELKO   | Muestra de pellets obtenidos   |
|--|--|---|--|
|  |  |  |  |

**Figura 6.** Proceso de pelletización.










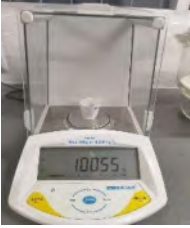



**Figura 7.** Analizador de humedad para granos GM640.

## 6.5. Caracterización de los pellets

Para la caracterización de los pellets, se implementaron análisis químicos (análisis proximal, elemental y microanálisis de cenizas), pruebas energéticas (poder calorífico superior) y evaluaciones físico-mecánicas (dimensiones, densidades y durabilidad mecánica).

### 6.5.1. Análisis proximal

El análisis proximal se considera un método esencial para la caracterización de biocombustibles, ya que aporta información clave sobre la humedad, componentes volátiles, residuos inorgánicos y la proporción de carbono fijo (Racero-Galaraga *et al.*, 2024). Estas evaluaciones se llevaron a cabo en tres repeticiones (Figura 8).

| <b>Contenido de humedad</b>   |   |  |   |   |
|---|---|--|---|---|
|   |   |  |   |   |
| Pellets   |   |  |   | Termobalanza  |
| <b>Análisis de cenizas</b>  |   |  |   |   |
|  |  |   |   |  |
| Peso inicial  | Calcinación   | Mufla a $550 \pm 5$ °C durante 90 minutos  | Desecador con gel de sílice   | Peso final de la muestra  |
| <b>Materia volátil</b>  |   |  |   |   |
|  |  |  |  |   |
| Peso inicial  | Mufla a $900 \pm 10$ °C durante 7 minutos   | Desecador con gel de sílice  | Peso final del residuo  |   |

**Figura 8.** Composición proximal en pellets.

## Humedad

La proporción de humedad de la biomasa equivale a la cantidad de agua presente en un material orgánico en relación con su masa total, y suele expresarse en peso seco o peso húmedo (Nunes *et al.*, 2016).

Para el ensayo de porcentaje de agua se utilizó una termobalanza (Adam Equipment, modelo PMB53, Adam Equipment Inc., Oxford, Connecticut, EE. UU.). Se realizó el ensayo con 1 g de pellets y se realizaron 3 réplicas. La metodología seguida se basó en la norma UNE-EN ISO 18134-1 (2016).

## Cenizas

El contenido de cenizas revela la composición mineral de los pellets de biomasa, mostrando la cantidad de minerales que existen en su forma oxidada (Maj *et al.*, 2025; Agu *et al.*, 2025). El procedimiento de análisis para la materia inorgánica se apegó a la norma ASTM D1102-84 (2013). Este método implica calcinar 1 gramo de pellets a una temperatura específica, generalmente entre (580 a 600 °C), en una mufla. La calcinación se realiza en presencia de aire para asegurar la conversión total de la materia orgánica mediante oxidación. Tras la calcinación, se pesa el residuo inorgánico, que representa el contenido de cenizas de los pellets.

$$\mathbf{PaM = Ph \left(1 - \frac{\%H}{100}\right)} \quad (1)$$

$$\mathbf{\% \text{ Ceniza} = \frac{PaCe - PaC}{PaM} \times 100} \quad (2)$$

Donde:

PaM = Peso anhidro de los pellets de biomasa

Ph = Peso húmedo

%H = Porcentaje de humedad

PaCe = Peso anhidro de cenizas más el crisol en g

PaC = Peso anhidro del crisol g

## Volátiles

La materia volátil se compone de los gases que se desprenden durante las fases iniciales de la combustión. Esta característica guarda una relación directa con la facilidad de ignición del combustible y la consistencia del proceso de combustión (Paykani *et al.*, 2022).

Para medir los compuestos volátiles, se siguió el método de la norma ASTM E872-82 (2013). Este procedimiento implica el calentamiento de 1 g pellets a una temperatura controlada  $950 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , 7 min, en un ambiente libre de oxígeno, utilizando un crisol de porcelana de peso constante y secado previo.

$$A = \frac{W_o - W}{W_i} \quad (3)$$

$$\text{MV \%} = A - \% \text{ Humedad de la muestra} \quad (4)$$

Donde:

A = Pérdida de peso en %

$W_o$  = Peso inicial de la muestra más el crisol con tapa en g

W = Peso del residuo más el crisol después del calentamiento en g

$W_i$  = Peso inicial de la muestra en g

MV = Materia volátil en %

## Carbono fijo

La porción de combustible que persiste después de eliminar la humedad y los compuestos volátiles, conocida como carbono fijo, muestra una relación directa con el valor calorífico y actúa como un indicador clave de la capacidad para la producción de energía del material orgánico (Agu *et al.*, 2025).

El carbono fijo se calculó por diferencia, restando a 100 el contenido de cenizas y el contenido de volátiles (Ngangyo *et al.*, 2022).

$$\text{C. F. \%} = 100 - (\% \text{ M. V.} + \% \text{ cenizas}) \quad (5)$$

Donde:

C.F.= Carbono fijo en %

M.V.= Materia volátil en %

### 6.5.2. Poder calorífico superior

El valor calorífico superior (VCS) de los pellets es la energía total liberada al quemarse completamente, incluyendo el calor de combustión y el recuperado al condensar el vapor de agua generado. Se expresa en MJ/kg o kWh/kg y, a diferencia del PCI, considera también la energía contenida en el agua formada durante la reacción (Murillo *et al.*, 2025).

Para la medición del valor calorífico superior, se empleó un calorímetro de bomba Parr 1108, en concordancia con el método especificado en la norma UNE-EN ISO 18125 (2018).



**Figura 9.** Bomba calorimétrica (Parr, 1108).

### 6.5.3. Análisis elemental

Un método fundamental para la cuantificación de C, H, N y S en la biomasa es el análisis elemental (Fernández-González *et al.*, 2015).

El análisis de la cantidad de C, H, N y S se realizó mediante un analizador elemental Costech modelo 4010 (Costech International SpA, Milán, Italia), conforme al protocolo estandarizado

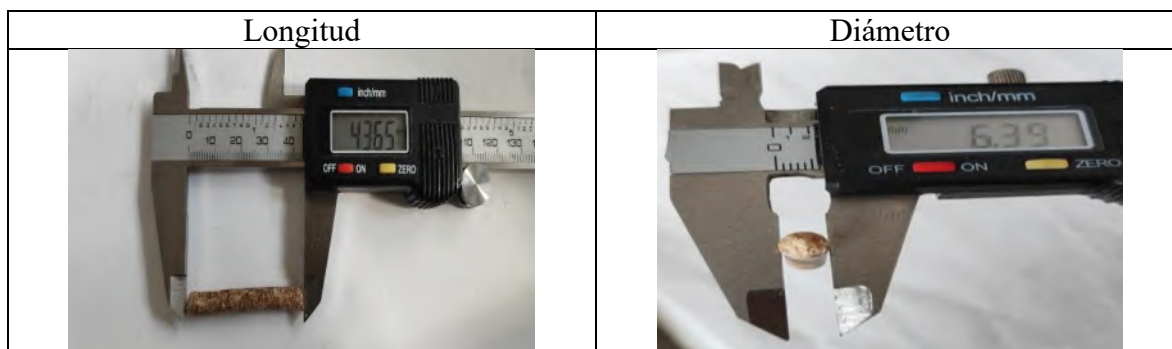
UNE-CEN/TS 15104 EX (2008). Para este análisis, se empleó biomasa completamente seca, la cual fue tamizada a través de una malla de 40 (425  $\mu\text{m}$ ). El análisis se realizó una sola vez, y la determinación de oxígeno se calculó por diferencia, siguiendo la técnica descrita por Ghetti *et al.* (1996).

#### 6.5.4. Microanálisis de cenizas

La cuantificación de microcomponentes en muestras de ceniza se realizó mediante espectroscopía de emisión atómica con plasma inductivamente acoplado (técnica ICP-AES). Se utilizó un espectrómetro Varian modelo 730-ES, fabricado por Varian Inc. (ahora Agilent), ubicado en Mulgrave, Australia. El procedimiento analítico se llevó a cabo en una sola ocasión, tomando como referencia la metodología presentada por Arcibar-Orozco *et al.* (2014).

#### 6.5.5. Longitud y diámetro

En una muestra de 50 pellets, se determinaron las dimensiones de su extensión longitudinal y grosor, empleando un instrumento de medición digital con una precisión de  $\pm 0.01$  mm (Steren, modelo HER-411, Azcapotzalco, Estado de México, México) (Carrillo-Parra *et al.*, 2018).



**Figura 10.** Dimensiones en pellets.

#### 6.5.6. Densidad unitaria (Individual)

Con el fin de evaluar la densidad unitaria, se procedió a registrar la masa de 50 pellets mediante una balanza Ohaus PA214, la cual posee una sensibilidad de 0.0001 g.

Posteriormente, se obtuvieron las medidas de cada pellet (diámetro y longitud) para determinar su volumen (Carrillo-Parra *et al.*, 2018).

$$V_p = \frac{\pi}{4} d^2 \times l \quad (6)$$

$$P_u = \frac{m_p}{v_p} \quad (7)$$

Donde:

$V_p$  = Volumen del pellet en  $\text{cm}^3$

$\pi = 3.1416$

$d$  = Diámetro del pellet en cm

$l$  = Longitud del pellet en cm

$P_u$  = Densidad unitaria en  $\text{g}/\text{cm}^3$

$m_p$  = Masa individual del pellet en g



Figura 11. Proceso de obtención de la densidad unitaria.

### 6.5.7. Densidad volumétrica (Aparente)

El cálculo de la masa contenida en un espacio determinado se ejecutó de acuerdo con el protocolo descrito en la normativa UNE-EN ISO 17828 (2016). Para esto, se depositaron los pellets dentro de un recipiente cilíndrico hasta alcanzar la señal de 500 mL, y posteriormente se obtuvo el peso total de los pellets presentes en dicho volumen; para medir el peso del material se utilizó una balanza Ohaus PA214. Este procedimiento se repitió en tres ocasiones.

$$BD_d = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad (8)$$

Donde:

$BD_d$  = Densidad volumétrica del material deshidratado en  $\text{kg}/\text{m}^3$

$m_1$  = Peso del contenedor sin contenido en kg

$m_2$  = Peso del contenedor lleno en kg

$V$  = Capacidad volumétrica del contenedor en  $\text{m}^3$



**Figura 12.** Evaluación de la densidad volumétrica mediante un volumen conocido.

### 6.5.8. Durabilidad mecánica

El ensayo de durabilidad es una prueba que el sector industrial emplea para valorar la resistencia estructural de los pellets. Esta evaluación resulta fundamental, ya que estos materiales son propensos a romperse durante la manipulación, y este ensayo simula ese proceso para predecir la resistencia de los pellets durante su manipulación y transporte.

El equipo utilizado en la prueba fue fabricado por GIRA, A.C., y cumple con las especificaciones técnicas establecidas en el estándar europeo UNE-EN ISO 17831-1 (2016). El procedimiento consistió en clasificar 500 gramos de pellets a través de una criba de 3.15

mm y, seguidamente, introducirlos en una cámara giratoria que realizó un movimiento rotacional a 50 giros por minuto durante un lapso de 10 minutos.

$$D_m = \frac{P_a}{P_e} \times 100 \quad (9)$$

Donde:

$D_m$  = Durabilidad mecánica en %

$P_e$  = Peso inicial de pellets pre-cribados en g

$P_a$  = Peso de los pellets cribados en g



Figura 13. Proceso para el análisis de durabilidad mecánica.

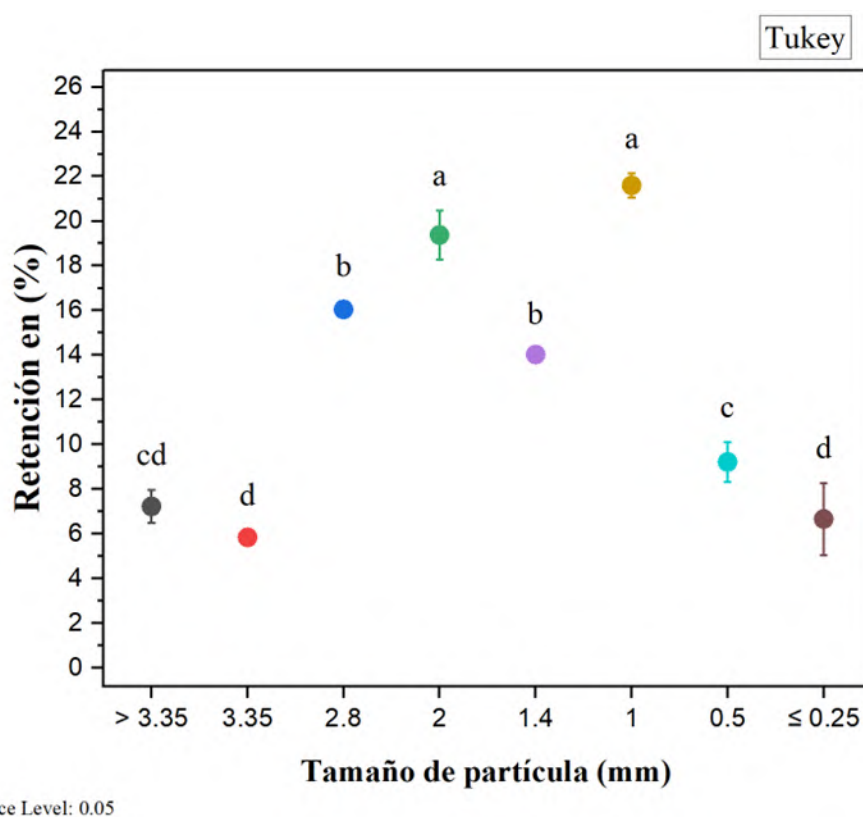
## 6.6. Análisis estadístico

Se utilizó el software Minitab (2019) para el análisis estadístico. Se empleó un análisis de varianza (ANOVA) para evaluar las diferencias y la prueba de Tukey para comparar las medias. El nivel de confianza estadística fue de 95 %. Se reportaron los valores obtenidos para el análisis final y el microanálisis de cenizas.

## 7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

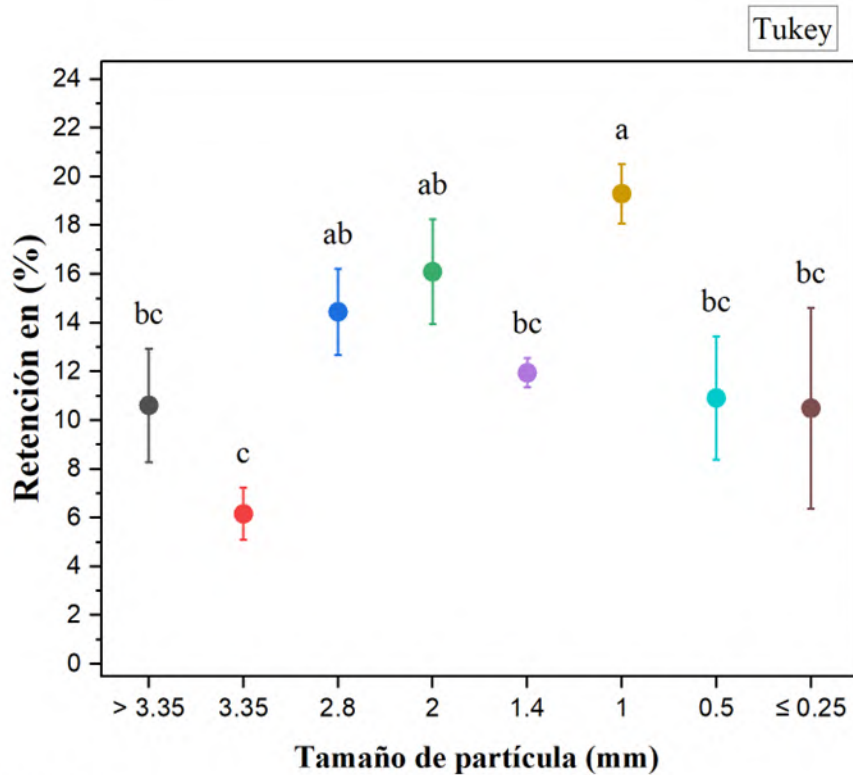
### 7.1. Granulometría

La clasificación de partículas por tamaño permite obtener fracciones con dimensiones específicas. El uso diferenciado de estas fracciones puede optimizar el aprovechamiento de la biomasa para fines energéticos, sumado a sustancias poliméricas y productos industriales (Silva *et al.*, 2011). En las Figuras 14 a la 18 se muestran los resultados granulométricos de la biomasa de fabáceas y *Pinus* spp.



**Figura 14.** Distribución en tamaño de partículas para *A. farnesiana*.

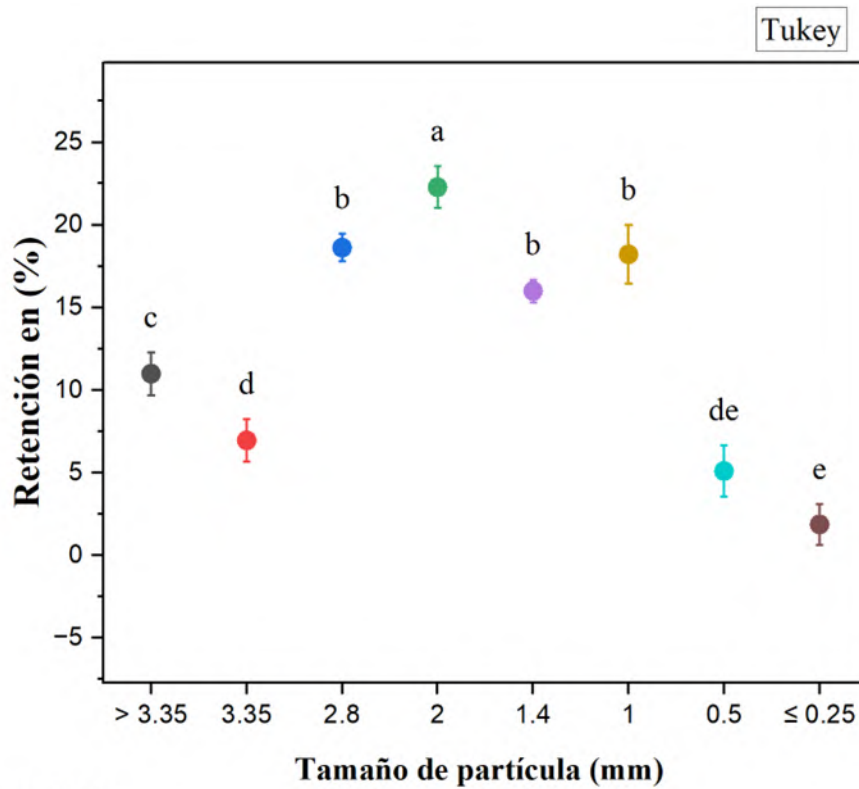
En la Figura 14, la malla de 1 mm tuvo una mayor retención de material (media de 21.59 %) en comparación con la malla de 3.35 mm (media de 5.84 %), que presentó la menor retención. La evaluación de granulometría en *A. farnesiana* presentó diferencias significativas en los distintos tamaños de grano.



Significance Level: 0.05

Figura 15. Distribución en tamaño de partícula para *A. pennatula*.

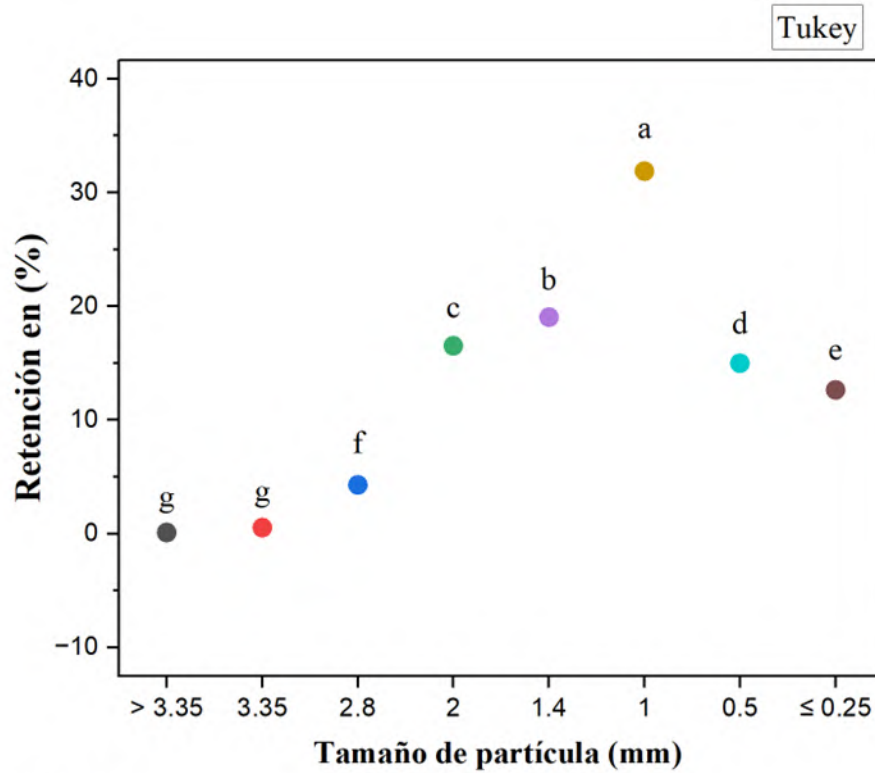
Asimismo, en la Figura 15 se aprecia que la malla de 1 mm retuvo la mayor cantidad de material (media de 19.30 %), mientras que la malla de 3.35 mm retuvo la menor cantidad (media de 6.17 %). En la evaluación de granulometría en *A. pennatula*, la malla 0.05 presenta diferencias estadísticas significativas ( $p \leq 0.05$ ).



Significance Level: 0.05

**Figura 16.** Distribución en tamaño de partícula para *Albizia pluriyuga*.

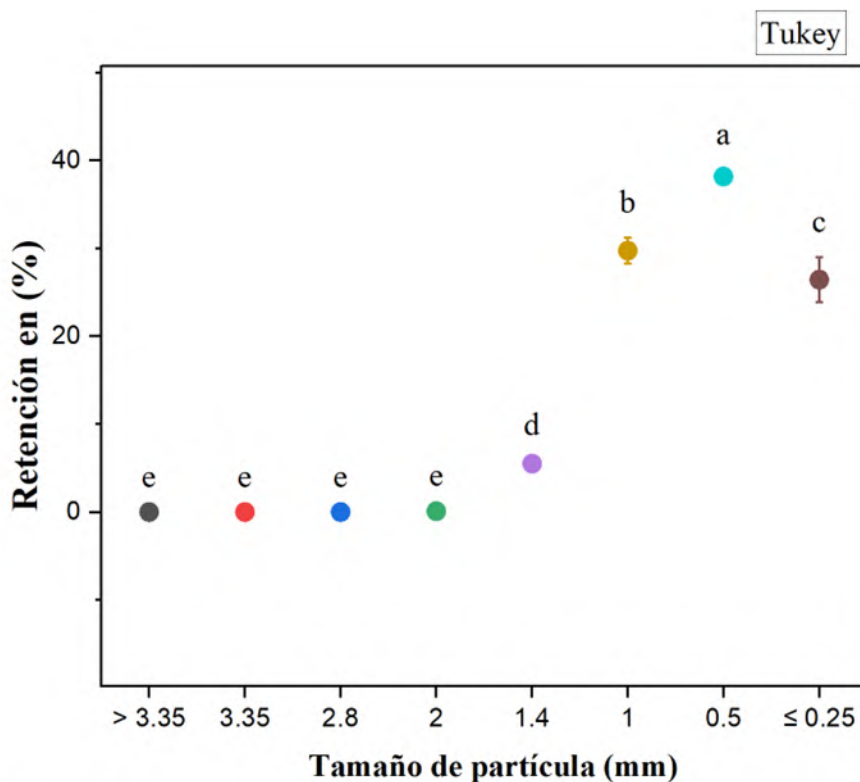
Por otro lado, en la Figura 16 se evidencia que la malla de 2 mm retuvo la mayor cantidad de material (media de 22.28 %), mientras que la malla  $\leq 0.25$  retuvo la menor cantidad (media de 1.87 %). El análisis de granulometría en *A. pluriyuga* se observó que la malla 2 mm presenta diferencias estadísticas significativas ( $p \leq 0.05$ ).



Significance Level: 0.05

**Figura 17.** Distribución en tamaño de partícula para *P. laevigata*.

En cuanto a la Figura 17 se observó que la malla de 1 mm retuvo la mayor cantidad de material (media de 31.88 %), mientras que las mallas de 3.35 y > 3.35 mm retuvieron la menor cantidad (media de 0.54-0.10 %). La granulometría en *P. laevigata* evidenció variaciones significativas ( $p \leq 0.05$ ).



Significance Level: 0.05

**Figura 18.** Distribución en tamaño de partícula para *Pinus* spp.

Por último, en la Figura 18 se observó que la malla de 0.5 mm retuvo la mayor cantidad de material (media de 38.19 %), mientras que las mallas de > 3.35, 3.35 y 2.8 mm retuvieron la menor cantidad (media de 0.0 % en todos los casos). La malla 0.5 presenta diferencias estadísticas significativas ( $p \leq 0.05$ ).

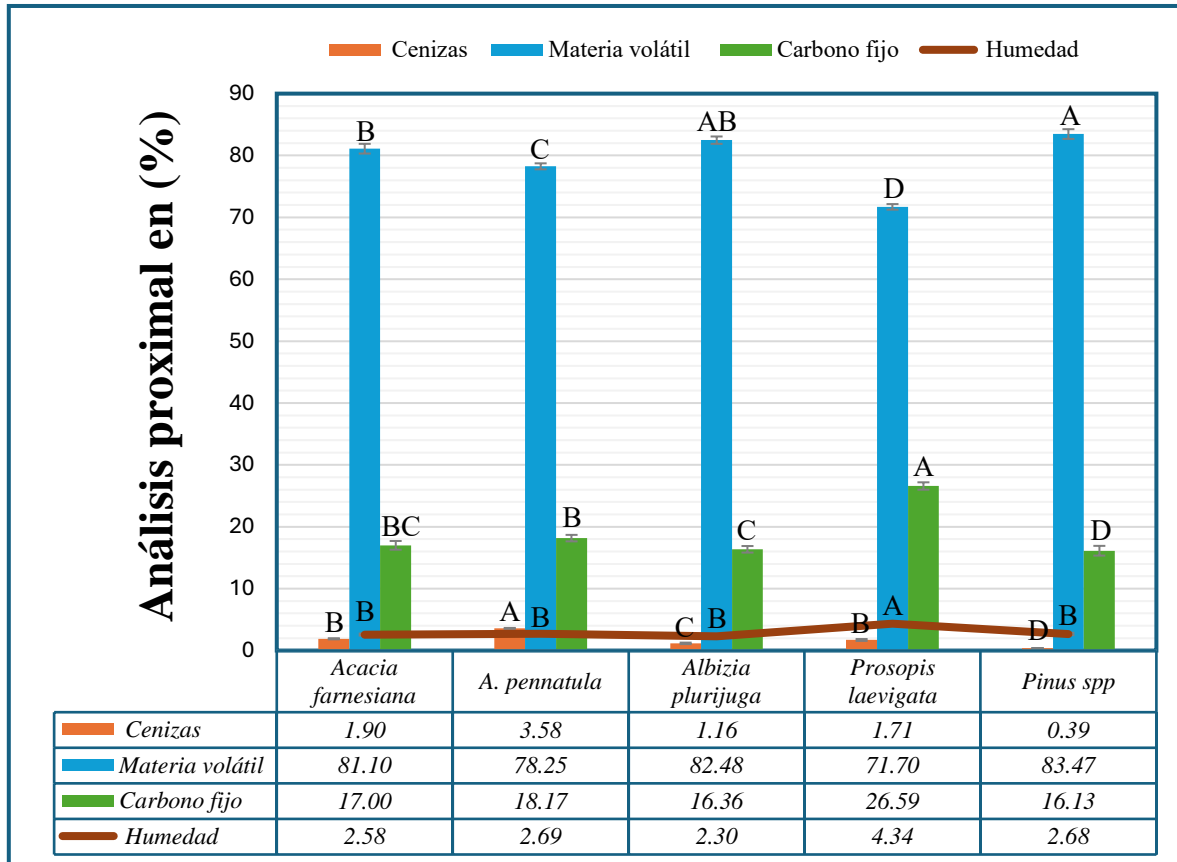
El análisis del tamaño de partículas de leguminosas y *Pinus* spp. evidencia una distribución desigual en la granulometría, con una concentración superior en tres fracciones principales. La malla de 1.0 mm, que retiene el material en la malla de 0.5 mm, representa la fracción más abundante con 24.15 % del total. Le siguen la malla de 0.5 mm, que retiene las partículas menores de 0.25 mm, con 15.68 %, y la malla de 2 mm, que retiene el material en la malla de 1.4 mm (14.88 %). Estas tres fracciones acumulan en conjunto el 54.71 % del material, lo que indica una predominancia de partículas en este rango de tamaño. Las partículas intermedias se encuentran en los tamices 2.8 mm, 1.4 mm y  $\leq 0.25$  mm, y son retenidas en los tamices 2 mm, 1 mm y bandeja respectivamente, acumulando 35.61 % de material total.

Por otro lado, las partículas más grandes, con tamaños superiores a 3.15 mm y las de 3.15 mm, representan las fracciones minoritarias con 5.79 % y 3.90 %, respectivamente. La suma de estas dos fracciones alcanza el 100%, lo que sugiere una baja proporción de partículas más grandes en comparación con las fracciones más finas.

Estudios recientes han explorado la correlación entre la granulometría y la densidad volumétrica de los pellets. Harun y Afzal (2016) observaron que partículas entre 0.15 y 0.30 mm favorecen una mayor densidad volumétrica, mientras que Mani *et al.* (2006) reportaron que tamaños de 3.2 mm o más se asocian con este mismo efecto. Adicionalmente, Carrillo-Parra *et al.* (2018) demostraron que tamaños inferiores a 4 mm son viables para obtener pellets con propiedades físicas y mecánicas aceptables. Con base en estos hallazgos, la biomasa estudiada se considera adecuada para la pelletización. Al comparar la granulometría de las cuatro especies de fabáceas con el pino, se aprecia que las dos Acacias y *A. plurijuga* suelen presentar una mayor proporción de partículas de mayor tamaño. Por otro lado, *P. laevigata* exhibe una distribución más homogénea, con una mayor presencia en las fracciones intermedias y finas. En contraste, el pino se caracteriza por un porcentaje más elevado de partículas finas.

## 7.2. Análisis proximal

La determinación proximal en pellets de biomasa es fundamental para evaluar su calidad, eficiencia energética y comportamiento durante la combustión, ya que determina parámetros clave como humedad, volátiles, carbono fijo y cenizas (García *et al.*, 2012).



**Figura 19.** Resultados de análisis proximales en (%).

Como se evidencia en la Figura 19, *P. laevigata* presenta diferencias estadísticas significativas en la humedad ( $p \leq 0.05$ ). Se encontró un rango de 2.30 a 4.34 % para especies fabáceas, mientras que *Pinus spp.* presentó un promedio de 2.68 %. Estos resultados guardan similitud con los análisis de Ramírez Ramírez *et al.* (2025), quienes reportan contenido de humedad desde 2.69 – 8.73 % en pellets de 23 especies de maderas mexicanas, asimismo con los de Núñez-Retana *et al.* (2020), quienes elaboraron pellets a base de madera de *Quercus*

spp., y reportan valores de humedad de 1.1 a 4.8 %. Según el estándar UNE-EN ISO 14961-2 (2012), las especies cuyo contenido de humedad es inferior al 10% se clasifican como clase M10, condición que cumplen todas las muestras aquí analizadas. La humedad debe ser baja en los pellets. Un alto nivel de humedad en los pellets puede causar mayores costos en el transporte, ya que reduce efectivamente la densidad de energía volumétrica, lo que a su vez eleva el precio a granel del biocombustible (Duncan *et al.*, 2013). Además, un menor contenido de humedad permite alcanzar temperaturas de llama más altas, lo que mejora el gradiente de temperatura y la transferencia de calor, facilitando así la finalización de la combustión y reduciendo los tiempos de residencia en la cámara de combustión (Gillespie *et al.*, 2013).

El análisis del contenido de materia inorgánica mostró variaciones significativas ( $p \leq 0.05$ ) entre los pellets de las diversas especies evaluadas (Figura 19). Las fabáceas presentaron un rango de materia inorgánica que osciló entre 1.16 y 3.58 %, mientras que el *Pinus* spp. mostró un valor menor, alcanzando sólo 0.39 %. Conforme a los criterios definidos en el estándar UNE-EN ISO 14961-2 (2012), los pellets se clasifican según su contenido de materia inorgánica para uso no industrial. *Pinus* spp. clase A1 ( $\leq 0.7\%$ ); *A. plurijuga* clase 2A ( $\leq 1.5\%$ ); *A. farnesiana* y *P. laevigata* clase B ( $\leq 3.0\%$ ), por último, *A. pennatula* no cumple con ninguna clase al superar el límite de 3.0%.

Estudios previos sobre biocombustibles densificados de distintos tipos de biomásas han reportado contenidos de materia inorgánica variables, que van desde 0.26 a 7.22 % (Casanova *et al.*, 2017; Núñez-Retana *et al.*, 2020; Zajac *et al.*, 2024; Pradhan *et al.*, 2025), nuestros resultados se encuentran dentro de este rango. Además, altos niveles de materia inorgánica en la caldera pueden causar daños, disminuir la eficiencia en la combustión y aumentar los costos de mantenimiento debido a problemas como la escoria, depósitos y la sinterización (Oberberger *et al.*, 2006; Vega-Nieva *et al.*, 2016). Por otro lado, considerando el consumo a nivel local, especialmente en áreas rurales, los pellets producidos podrían tener utilidad como combustible. Adicionalmente, la materia inorgánica resultante de su combustión podría ser aprovechada en el compostaje de materiales lignocelulósicos. Sin embargo, es crucial evaluar la presencia de metales pesados y su potencial toxicidad antes de su aplicación (Ramírez Ramírez *et al.*, 2025).

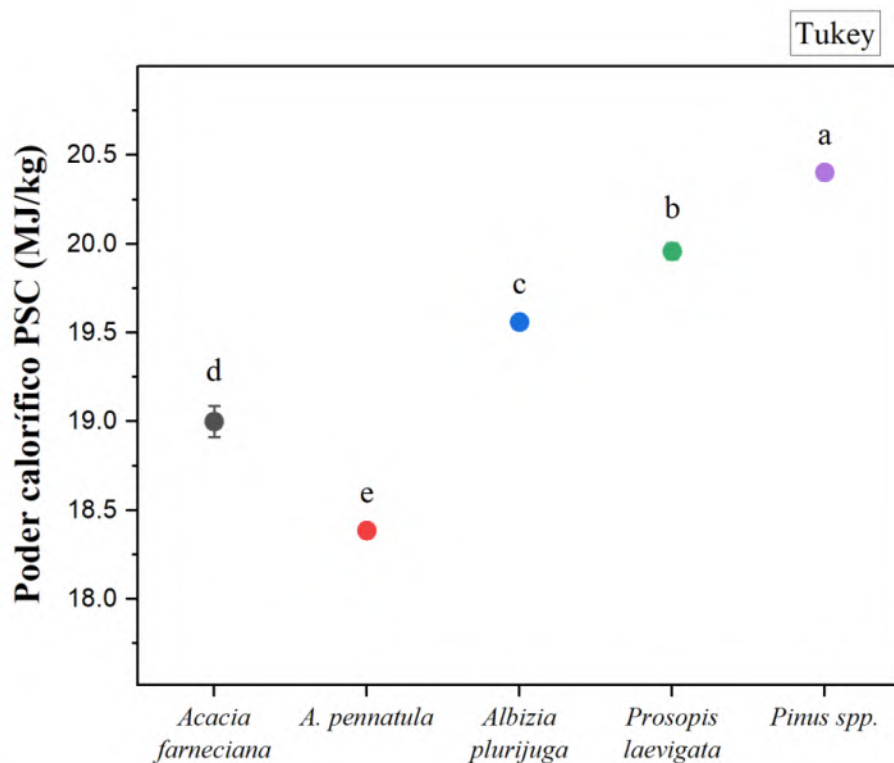
La proporción de volátiles en los pellets evidenció variaciones significativas ( $p \leq 0.05$ ) entre los diferentes tipos de pellets (Figura 19). En las especies de la familia fabácea, la proporción de volátil varió entre 71.70 y 82.48 %. Por otro lado, los pellets producidos con *Pinus* spp. presentaron una media superior de 83.47%. Otros autores como Pradhan *et al.* (2025) reportaron un contenido de materia volátil del 82.0% para pellets de madera dura. Este valor es superior a los resultados obtenidos para pellets de fabáceas, con la excepción de *A. plurijuga* (82.48 %), que se encuentra dentro del rango reportado. En cuanto a los pellets de madera blanda, Pradhan *et al.* (2025) reportaron un 82.0%, un valor inferior al obtenido para los pellets de pino 83.47%. Adicionalmente, según Ramírez Ramírez *et al.* (2025), el porcentaje de material volátil en pellets de distintos *Pinus* spp. osciló entre 83.07% y 92.47%. En consecuencia, nuestros resultados para pellets de pino son notablemente similares a este rango reportado. De manera similar, los resultados concuerdan con el 83.6% obtenido por Miranda *et al.* (2011) en pellets de roble pirenaico. La proporción de componentes volátiles tiene una influencia considerable en el desarrollo de la combustión de los combustibles sólidos (Tauro *et al.*, 2018). Cuando la cantidad de materia volátil es elevada, la biomasa se considera un combustible eficiente para la conversión térmica (Holt *et al.*, 2006; Carrillo-Parra *et al.*, 2018). No obstante, Kataki y Konwer (2002) mencionan que niveles altos de materia volátil pueden resultar en una combustión demasiado rápida, lo cual representa una desventaja para biocombustibles sólidos.

La evaluación referente al carbono fijo en los pellets reveló variaciones significativas entre los biocombustibles evaluados ( $p \leq 0.05$ ) (Figura 19). Específicamente, se observó que los pellets de la familia fabácea presentaron un rango de contenido de carbono fijo entre 16.36 y 26.59 %. En contraste, el pino mostró un menor contenido (16.13%). Los datos obtenidos en esta investigación son análogos a los registrados por otros investigadores para diversas biomásas de pellets. Pradhan *et al.* (2025) informaron valores de 15.0 a 17.3% para pellets a partir de angiospermas y gimnospermas, mientras que Miranda *et al.* (2011) reportaron un 12.65% para pellets de roble pirenaico, este valor es relativamente menor en comparación con el encontrado para pellets de fabáceas. El carbono fijo es un factor clave en la bioenergía debido a que se relaciona con la energía que pueden generar los combustibles sólidos (García *et al.*, 2012). Una cantidad elevada de carbono fijo se asocia con un valor calorífico mayor y por lo general, con un bajo contenido de humedad y sustancias volátiles (Martínez-Gómez *et*

*al.*, 2022). Considerando el análisis proximal, las especies de la familia fabácea destacan por su elevada proporción de carbono fijo, lo que evidencia su potencial energético. Además, su adecuado contenido de humedad, junto con buenos valores de materia volátil y materia inorgánica dentro de los parámetros establecidos, respalda su viabilidad como una alternativa con gran potencial para la generación de pellets destinados a uso no industrial, comparables a los pellets de biomasa de pino.

### 7.3. Poder calorífico superior (PCS)

La energía contenida en los pellets producidos a partir de plantas de la familia fabáceas varió entre 18.39 y 19.96 MJ/kg, siendo el valor más alto registrado en *Pinus* spp. 20.40 MJ/kg, mostrando diferencias significativas estadísticamente ( $p \leq 0.05$ ) (Figura 20). Según algunos estudios, la cantidad de sustancias extraíbles en la madera podría estar relacionada con un mayor valor energético, especialmente en especies de *Pinus* spp. (Ngangyo-Heya *et al.*, 2016). Los datos obtenidos en esta investigación son que se ajustan al rango de 18.4 y 19.2 MJ/kg establecido para maderas de latifoliadas, basados en el estándar UNE-EN ISO 17225-1 (2014). Además, los valores alcanzaron los indicadores fijados por la directriz UNE-EN ISO 14961-2 (2012), que establecen un rango de 16.5 a 19.0 MJ/kg para biocombustibles sólidos. Por lo tanto, los pellets satisfacen las exigencias tanto en aplicaciones residenciales como industriales. Estos resultados coinciden con el rango reportado para diversas especies de maderas latifoliadas en México, que va desde 18.33 hasta 22.07 MJ/kg, según los hallazgos de Ruiz-Aquino *et al.* (2022), y por Ramírez Ramírez *et al.* (2025) que informan que el valor calorífico superior de pellets fabricados con aserrín de maderas latifoliadas oscila entre 16.25 y 19.75 MJ/kg. De manera similar, Casanova *et al.* (2017) reportan un poder calorífico para pellets de Pílon (*Hyeronima alchorneoides*) y Eucalipto (*Eucalyptus* spp.) entre un rango de 18.90 y 18.96 MJ /kg. Estudios previos, como el de Liu *et al.* (2016) y Núñez-Retana *et al.* (2020), indican que los pellets de pino pueden tener un valor energético de 18.2 y 19.9 MJ/kg, cifra inferior a la encontrada en este estudio. Dicha variación en los valores energéticos podría atribuirse a las diversidades en la composición y propiedades entre las diversas clases de biomasa (Núñez-Retana *et al.*, 2020).



Significance Level: 0.05

**Figura 20.** Resultados para el poder calorífico superior.

## 7.4. Análisis elemental

El análisis se centró en cinco elementos: C, H, O, N y S. Aunque el azufre no se detectó en las especies analizadas. Los criterios de calidad para los biocombustibles, según la literatura, incluyen niveles elevados de carbono y oxígeno en la biomasa, ya que esto incrementa el valor calorífico (Palamanit *et al.*, 2019; Pintor-Ibarra *et al.*, 2024). Por otro lado, se ha observado que el hidrógeno también influye positivamente en el valor calorífico, a pesar de que su proporción en la biomasa es inferior a la del carbono (García *et al.*, 2012). Nitrógeno y azufre, aunque minoritarios, son relevantes por su potencial para formar gases y ácidos nocivos (NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, NH<sub>3</sub>) durante la pirólisis, afectando al medio ambiente (Alvarado-Flores *et al.*, 2024).

Los valores de la composición elemental se detallan en la Figura 21. Los datos revelan diferencias en la composición elemental entre las especies de fabáceas y *Pinus spp.* En

relación al carbono, las fabáceas presentan un rango de 42.85 y 47.04 %, siendo *P. laevigata* la especie con el valor más alto dentro de este grupo. Sin embargo, el pino supera a todas las fabáceas con un contenido de C (47.35 %). Respecto al hidrógeno, las fabáceas muestran valores que oscilan entre 6.25 y 6.47 %, mientras que *Pinus spp.* presenta un valor ligeramente superior (6.69 %). El contenido de oxígeno exhibe una tendencia inversa al C. Las fabáceas presentan un rango de 46.43 a 50.55 %, con valores generalmente más altos que *Pinus spp.* (45.87 %). En cuanto al nitrógeno, tanto las fabáceas como el pino muestran niveles bajos. Las fabáceas varían de 0.16 a 0.37 %, mientras que el pino presenta el valor más bajo (0.10 %). En términos generales, los resultados obtenidos se asemejan a los valores registrados para ciertas especies de madera dura y otras fuentes de biomasa lignocelulósica (Rutiaga-Quiñones *et al.*, 2020; Salazar-Herrera *et al.*, 2023; Pintor-Ibarra *et al.*, 2024). Según el esquema de certificación ENplus (2015), que establece tres categorías de calidad para los pellets (ENplus A1: nitrógeno  $\leq 0.3$  %, ENplus A2:  $\leq 0.5$  % y ENplus B:  $\leq 1.0$  %); los pellets de fabáceas se clasifican en las categorías ENplus A1 y ENplus A2. De igual manera, los pellets *Pinus spp.* también se clasifican como ENplus A1.

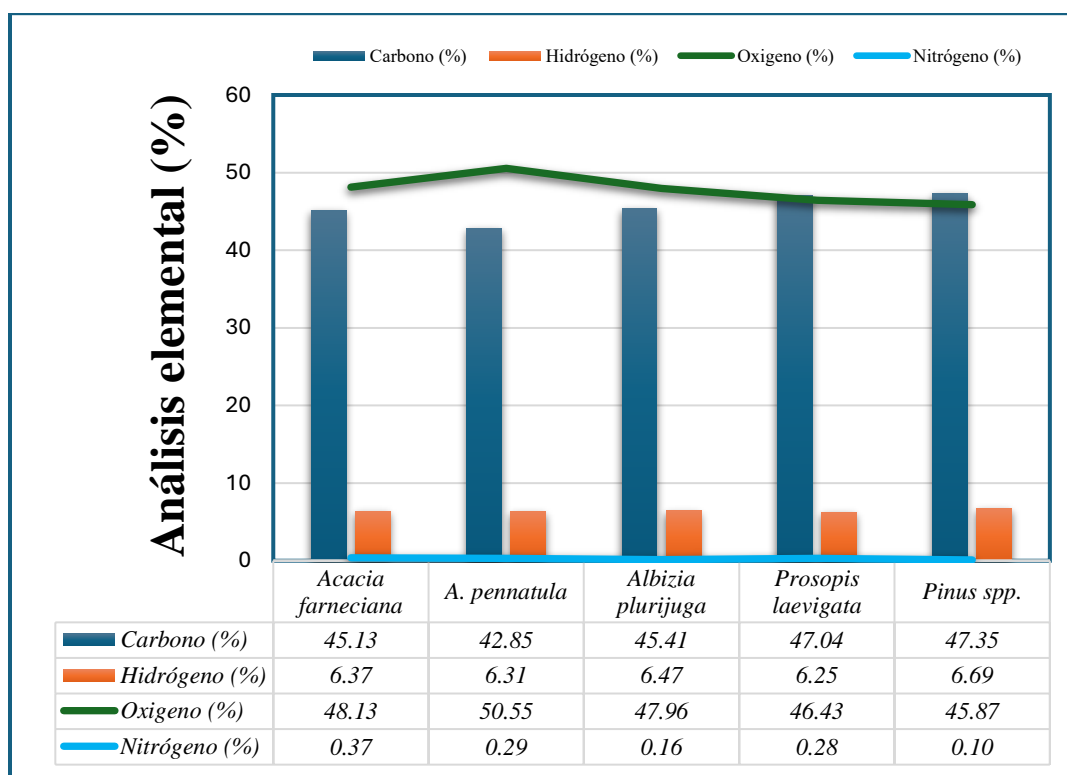


Figura 21. Análisis elemental en (%).

## 7.5. Microanálisis de cenizas

El microanálisis en las cenizas de la biomasa posibilita la identificación de la composición elemental inorgánica presente en los residuos sólidos (cenizas) generados tras la combustión o calcinación de materiales biomásicos (Vassilev *et al.*, 2010). Según Vassilev *et al.* (2010) destacan que esta evaluación es fundamental porque los componentes inorgánicos en la biomasa influyen directamente en su comportamiento térmico, su potencial contaminante y sus posibles aplicaciones tecnológicas. En apego a la norma UNE-EN ISO 14961-1 (2011) para caracterización de biocombustibles, los elementos mayoritarios que constituyen las cenizas son: (Al, Ca, Fe, K, Mg, Mn, Na, P, Si y Ti), mientras que los elementos minoritarios considerados son: (As, Cd, Cr, Co, Cu, Hg, Ni, Pb, V y Zn). En la Tabla 1 se muestran los resultados de la caracterización de minerales en cenizas, donde se identificaron 22 elementos. Entre los elementos mayoritarios se detectaron: (Al, Ca, Fe, K, Mg, Mn, Na, P y Si), siendo relevante mencionar que el (Ti) no fue detectado en este análisis. Como elementos minoritarios se identificaron: (Cr, Cu, Ni, Pb, V y Zn), mientras que no se detectaron As, Cd, Co y Hg. Adicionalmente, se encontraron otros elementos no clasificados específicamente en la norma como Ba, B, Sr, Li, Ag, Mo y S. Reportes previos por Fengel y Wegener (1983) y Rutiaga-Quiñones *et al.* (2020) ya habían identificado el Ca, K, Mg, Mn, Na, P y Cl como los principales elementos químicos en la madera. La presente investigación verificó la identificación de los elementos reportados previamente con excepción del Cl, el cual no fue detectado en las muestras analizadas. Por otro lado, la abundancia de elementos como (K, P, S, Si y Na) es relevante ya que pueden generar problemas durante la combustión ya que estos elementos pueden modificar la temperatura de fusión del componente inorgánico, lo cual conduce a la creación de escorias, la corrosión de equipos, el desgaste de herramientas y la emisión de partículas finas. Además, pueden causar incrustaciones que dañan hornos y calderas (Obernberger y Thek, 2004; Obernberger y Thek, 2010). No obstante, algunos investigadores señalan que ciertos elementos como el Ca y el Mg pueden tener un impacto positivo en los procesos de combustión (Obernberger y Thek, 2004; Obernberger y Thek, 2010). Estos elementos pueden aumentar la temperatura de fusión de la fracción inorgánica, lo que reduce la acumulación de fracción inorgánica en los equipos de combustión. Esto no

solo aporta a la eficacia de la combustión, sino que además puede tener una influencia beneficiosa en la seguridad ambiental al disminuir la toxicidad de los residuos que se dispersan en el aire (van Lith *et al.*, 2006).

**Tabla 1.** Elementos presentes en las cenizas ppm.

| <b>Elemento</b> | <i>Acacia farnesiana</i> | <i>A. pennatula</i> | <i>Albizia plurijuga</i> | <i>Prosopis laevigata</i> | <i>Pinus spp.</i> |
|-----------------|--------------------------|---------------------|--------------------------|---------------------------|-------------------|
| Ag              | < 0.0125                 | < 0.0125            | 3.15                     | < 0.0125                  | < 0.0125          |
| Al              | 302.6                    | 58.46               | 44.49                    | 68.28                     | 1847.3            |
| B               | 284.47                   | 260.2               | 509.64                   | 326.93                    | 579.93            |
| Ba              | 412.03                   | 317.29              | 177.35                   | 190.67                    | 439.7             |
| Ca              | 179200                   | 102600              | 167300                   | 110700                    | 103300            |
| Cr              | 12.55                    | 1.97                | 5.43                     | 8.53                      | 74.83             |
| Cu              | 44.8                     | 24.62               | 33.41                    | 56.45                     | 168.71            |
| Fe              | 17100                    | 2100                | 2100                     | 1000                      | 17300             |
| K               | 100300                   | 76800               | 112100                   | 151200                    | 83500             |
| Li              | 157.5                    | 47.23               | 127.99                   | 95.69                     | 275.26            |
| Mg              | 8500                     | 5700                | 700                      | 3200                      | 1000              |
| Mn              | 225.6                    | 118.86              | 74.12                    | 165.46                    | 2027.75           |
| Mo              | < 0.05                   | < 0.05              | < 0.05                   | < 0.05                    | < 0.05            |
| Na              | 0.39                     | 0.1                 | 0.69                     | 0.83                      | 0.72              |
| Ni              | 1.85                     | 7.48                | 1.63                     | 4.36                      | 41.95             |
| P               | 1.75                     | 0.61                | 0.66                     | 0.24                      | 1.49              |
| Pb              | ND                       | 6.4                 | ND                       | 0.05                      | 54.38             |
| S               | 6700                     | 1900                | 3100                     | 3700                      | 17300             |
| Si              | 5400                     | 5800                | 4300                     | 5400                      | 1900              |
| Sr              | 4000                     | 2300                | 3400                     | 2200                      | 700               |
| V               | < 0.05                   | < 0.05              | < 0.05                   | < 0.05                    | < 0.05            |
| Zn              | 92.85                    | 135.35              | 73.09                    | 131.66                    | 1454.02           |

*Nota:* ND = No detectado

## 7.6. Longitud y diámetro

La longitud de los pellets tiene un impacto importante en el proceso de obtención de energía, porque repercute en la alimentación neumática y el flujo de material dentro del reactor. De forma similar, el tamaño del pellet y la densidad individual influyen en el proceso de combustión, ya que la superficie expuesta y la presencia de espacios vacíos determinan la oxidación de las partículas de biomasa (Pradhan *et al.*, 2018b; Pradhan *et al.*, 2025). Conforme a los resultados de la Figura 22, se aprecia que *Pinus spp.* presenta diferencias estadísticas significativas en las dimensiones de los pellets ( $p \leq 0.05$ ). Los pellets de las fabáceas presentaron una longitud entre 34.87 y 36.92 mm, mientras que los pellets de *Pinus spp.* presentaron una longitud menor (30.58 mm). Estos datos concuerdan con estudios previos que reportan longitudes de pellets de biomasa en un rango de 10.47 a 35.10 mm (Vassilev *et al.*, 2010; Carrillo-Parra *et al.*, 2018; Acampora *et al.*, 2021; Kougioumtzis *et al.*, 2021).

El diámetro promedio de los pellets de fabáceas fue de 6.16 a 6.19 mm y el diámetro del pino fue superior, alcanzando 6.29 mm. El diámetro del pellet está determinado por el tamaño de los orificios de la matriz de extrusión utilizada durante el proceso de pelletización (Soria-González *et al.*, 2022). No obstante, el diámetro final de los pellets podría diferir levemente según la biomasa empleada. Por ejemplo, Carrillo-Parra *et al.* (2022) analizaron la calidad de 17 tipos de biomasa de diferentes fuentes agrícolas y forestales, y encontraron que el rango de diámetros osciló entre 5.80 y 6.14 mm. De manera similar, Ramírez Ramírez *et al.* (2025) reportaron diámetros de pellets que oscilan entre 5.81 y 6.00 mm. Según el estándar UNE-EN ISO 17225-2 (2014), los pellets de las especies estudiadas se clasifican como "D 06", lo que implica que cuentan con un diámetro entre (6 -8 mm) y la longitud se encuentra entre 3.15 y 40 mm. Dicho factor indica que las especies analizadas son aptas para su uso en calderas con sistemas de alimentación neumática, ya que sus dimensiones se encuentran dentro del rango especificado por la directriz UNE-EN ISO 17225-2 (2014). Esto es importante para prevenir obstrucciones en el mecanismo de alimentación.

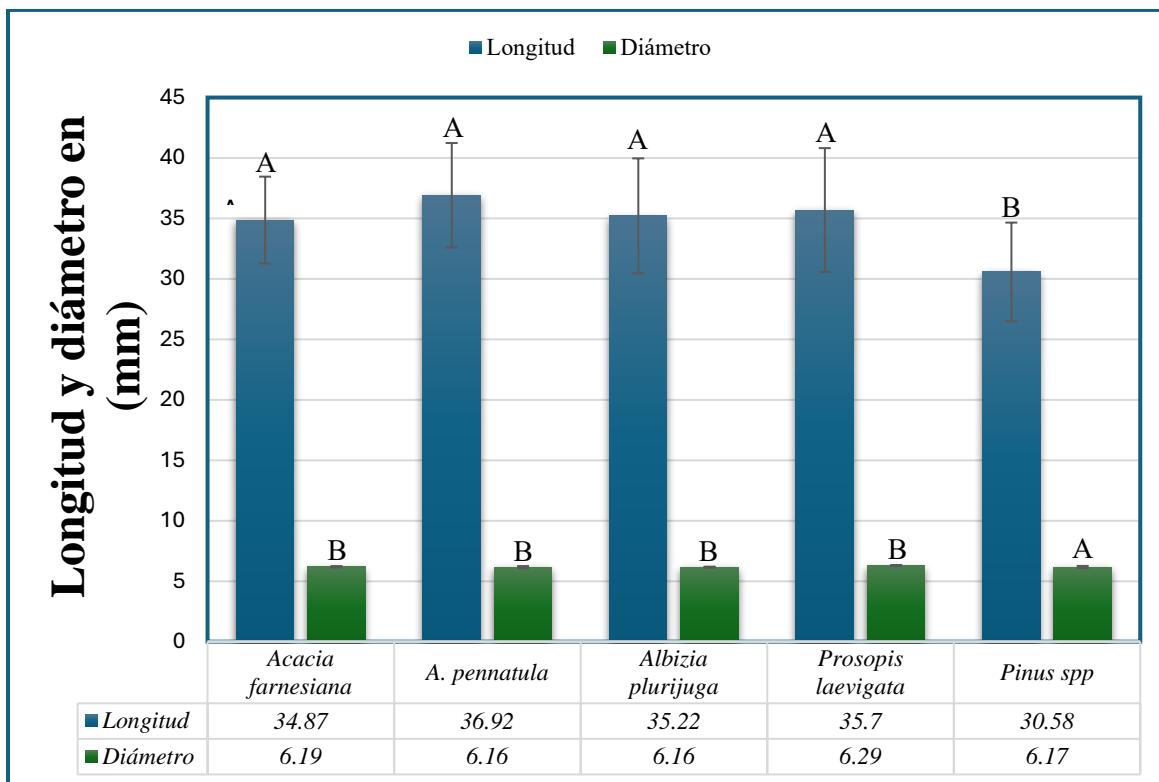
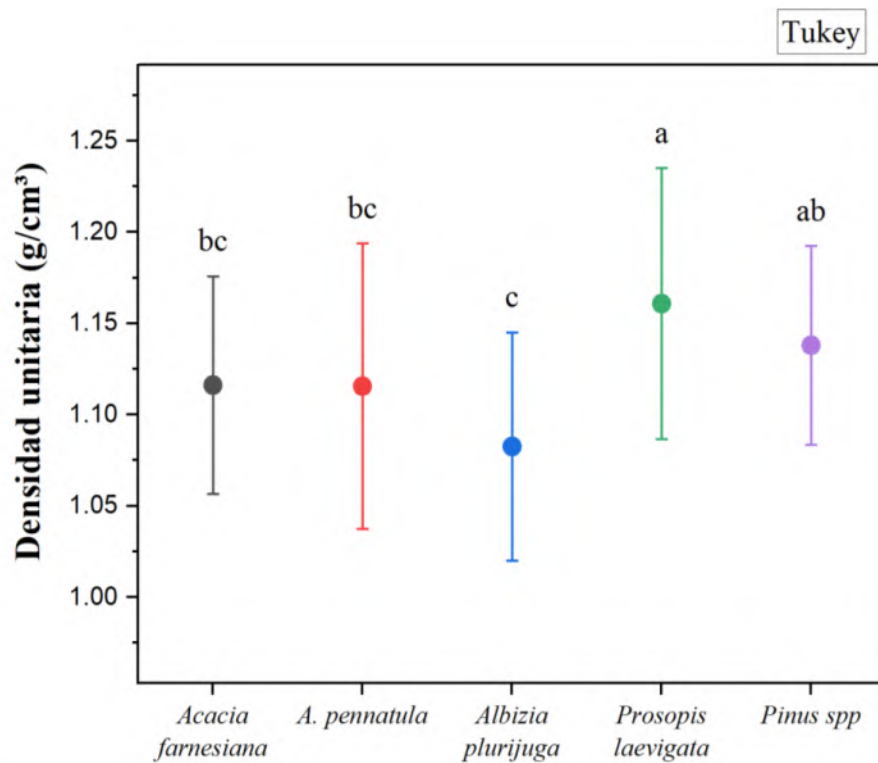


Figura 22. Resultados para longitud y diámetro de pellets.

## 7.7. Densidad unitaria

El análisis de la densidad individual de los pellets reveló variaciones significativas ( $p \leq 0.05$ ) entre las especies evaluadas (Figura 23). Los pellets de las fabáceas presentaron densidades entre 1.08 y 1.16 g/cm<sup>3</sup>, mientras que el pino se encuentra dentro del rango de las especies fabáceas (1.14 g/cm<sup>3</sup>). Los hallazgos de esta investigación se alinean con los valores registrados por otros investigadores. A modo de ejemplo, Ramírez Ramírez *et al.* (2025) establecieron un rango de densidad individual para pellets de *Pinus spp.* que oscila entre 1.08 y 1.22 g/cm<sup>3</sup>, este rango se alinea estrechamente con el promedio obtenido en el presente estudio para los pellets producidos de *Pinus spp.* Además, los valores de densidad individual para pellets de encino, reportados por Ramírez Ramírez *et al.* (2025) de 1.15 y 1.25 g/cm<sup>3</sup>, superan ligeramente los encontrados en las especies de fabáceas analizadas en este estudio. Sin embargo, *P. laevigata* es una excepción, ya que sus valores coinciden con el rango informado por reportado por Ramírez Ramírez *et al.* (2025). De manera similar, el estudio

de Carrillo-Parra *et al.* (2018) reportó densidades de pellets de madera dura entre 1.10 y 1.18 g/cm<sup>3</sup>. Si bien los pellets de *A. plurijuga* mostraron valores ligeramente inferiores en el presente estudio, los otros pellets de biomasa de fabáceas analizadas se encuentran dentro de este rango. Asimismo, nuestros resultados son comparables con el rango de 1.12 a 1.3 g/cm<sup>3</sup> (Thek y Obernberger, 2010), salvo por *A. plurijuga*, que se encuentra en un rango ligeramente inferior. Por otro lado, Rosales-Serna *et al.* 2024 reportaron 1.09 g/cm<sup>3</sup> para pellets de *P. laevigata* siendo ligeramente menor al valor encontrado en esta investigación para pellets de *P. laevigata*. Es importante destacar que la densidad individual de los pellets repercute en su desempeño durante la combustión. Esto se debe a que el área de superficie expuesta y la presencia de porosidades en los pellets inciden directamente en el proceso de oxidación de las partículas de biomasa (Pradhan *et al.*, 2025).

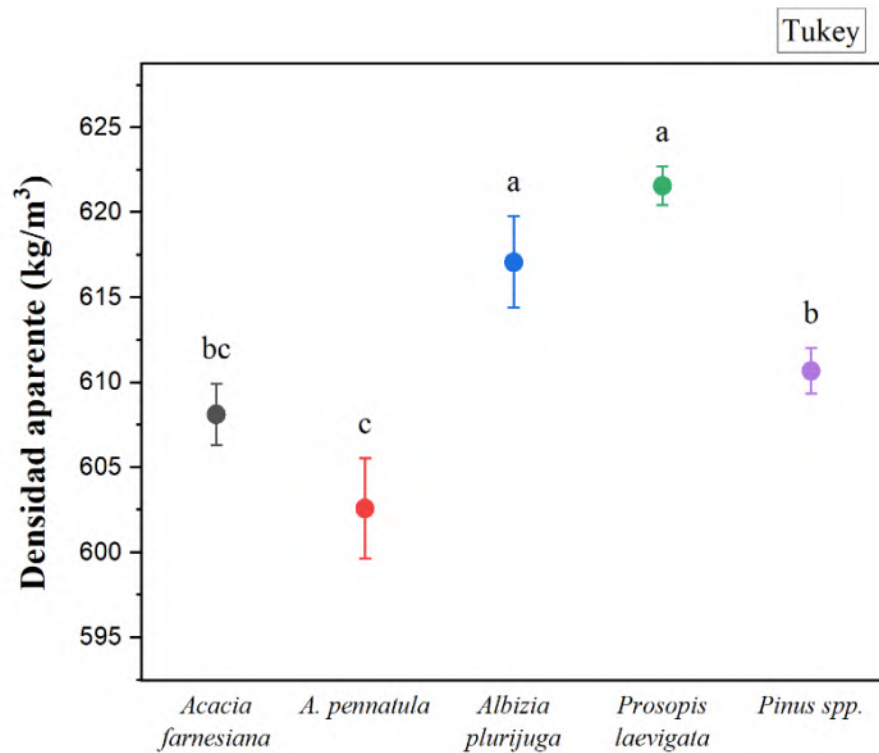


Significance Level: 0.05

**Figura 23.** Resultados para la densidad unitaria en pellets.

## 7.8. Densidad aparente

El análisis de la densidad aparente de los pellets reveló diferencias estadísticamente significativas ( $p < 0.05$ ) observar Figura 24. Los resultados del análisis de Tukey mostraron que *Prosopis laevigata* ( $621.58 \text{ kg/m}^3$ ) y *Albizia plurijuga* ( $617.08 \text{ kg/m}^3$ ) presentaron las mayores densidades a granel, sin diferencias significativas entre ellas. *Pinus* spp. ( $610.68 \text{ kg/m}^3$ ) y *Acacia farnesiana* ( $608.12 \text{ kg/m}^3$ ) mostraron densidades intermedias, donde tampoco se encontraron diferencias significativas entre ellas. Finalmente, *A. pennatula* ( $602.59 \text{ kg/m}^3$ ) presentó la menor densidad a granel, siendo significativamente diferente a todas las demás especies. La densidad volumétrica de los pellets que se obtuvieron en este estudio se ajusta al rango establecido por el estándar UNE-EN ISO 17225-1 (2014) para los valores de calidad, cuyo límite es de 600 a  $750 \text{ kg/m}^3$ . Los valores de densidad volumétrica de los pellets de las especies estudiadas se encuentran dentro de lo reportado para otras especies de pellets. Por ejemplo, Carrillo-Parra *et al.* (2018) tuvieron un rango de 557 a  $703 \text{ kg/m}^3$  en pellets de *Quercus* spp. Nuestros hallazgos también concuerdan con los valores de densidad a granel para pellets de diferentes biomásas, los cuales Ramírez Ramírez *et al.* (2025) se sitúan en el rango de 532 a  $668 \text{ kg/m}^3$ . La densidad volumétrica es un factor relevante por su influencia en el espacio necesario para el almacenamiento y transporte de los pellets, así como en los costos asociados a estas actividades (Lehtikangas, 2001; García-Maraver *et al.*, 2015). Una mayor densidad volumétrica se traduce en mayor energía por unidad de volumen, lo que se asocia a mayores beneficios económicos (Rollinson y Williams, 2016).



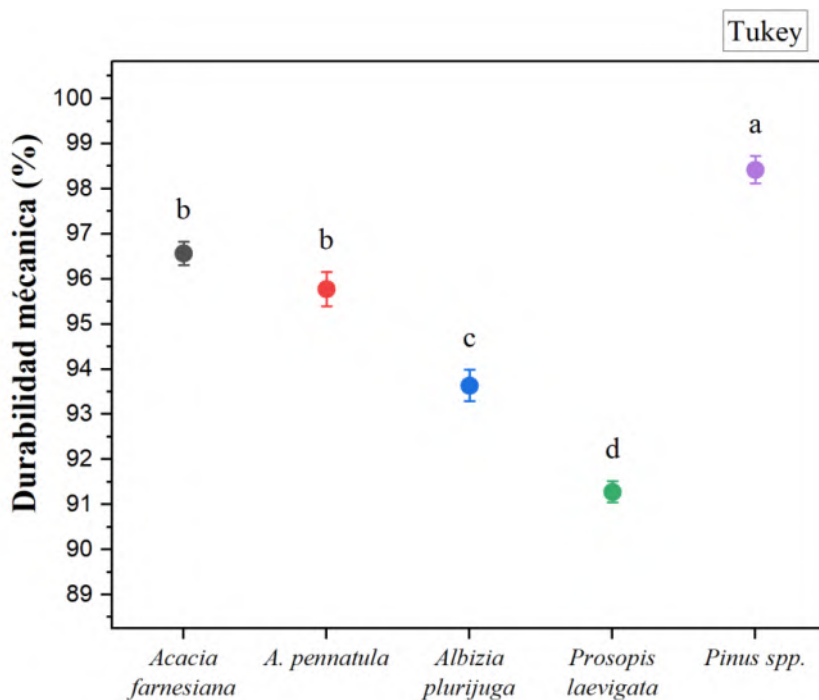
Significance Level: 0.05

Figura 24. Resultados para la densidad aparente de los pellets.

## 7.9. Durabilidad mecánica

Los pellets elaborados a partir de las fabáceas presentaron un rango de durabilidad que osciló entre el 91.28% y el 96.56% (Figura 25). Dentro de este grupo, *Acacia farnesiana* exhibió la mayor durabilidad (96.56%), mientras que *Prosopis laevigata* mostró la menor (91.28%). En contraste, los pellets de *Pinus spp.* destacaron por su durabilidad considerablemente superior, alcanzando un valor promedio de 98.42%. Los datos obtenidos no cumplen con los estándares de certificación Enplus (A1:  $\geq 98.0$ -A2  $\geq 97.5$ ) para las especies fabáceas, solamente los pellets de pino sí cumplieron con los criterios para la categoría A1. Estos resultados en pellets de fabáceas podrían mejorarse añadiendo aditivos u otros residuos con mayor contenido de lignina (Lehtikangas, 2001). Según la directriz UNE-EN ISO 17225-1 (2014), la resistencia debe estar entre (I1:  $\geq 97.5$ - I2:  $\geq 96.5$ ) para uso industrial. Por lo tanto, los pellets de pino y de *P. laevigata* se ajustan a esta clasificación. Por otro lado, los valores obtenidos en esta investigación son consistentes con el rango registrado por Carrillo-Parra *et al.* (2022) para

pellets producidos a partir de desechos agrícolas y forestales, que oscila entre 73.61% y 99.15%. Asimismo, estos resultados concuerdan con los valores hallados por Gonzales-Arno y Verastegui-Lazo (2024) para pellets de eucalipto (94.38%-95.02%) y superando el valor registrado para pellets de pino (97.08%). Adicionalmente, la durabilidad de los pellets analizados en este estudio se asemeja a lo encontrado por Pradhan *et al.* (2025), quienes reportaron valores de 97.7% para pellets de madera blanda y 96% para pellets de madera dura. Una baja resistencia mecánica puede resultar en un mayor deterioro de los pellets, generando partículas finas o polvo durante el traslado, la descarga y el almacenamiento. Esto incrementa las pérdidas de material y causa obstrucciones en los sistemas de suministro de calderas y aumentaría las emisiones y los residuos en el hogar, lo que podría implicar riesgos para la salud (atmósferas explosivas, enfermedades respiratorias, etc.) (Mostafa *et al.*, 2019). La durabilidad mecánica y la densidad volumétrica de los pellets se ve afectada por múltiples variables, destacando el material, el contenido de lignina, la humedad, el coeficiente de fricción entre el material y la matriz, la fuerza de compactación, la relación longitud-diámetro y la temperatura (Kaliyan y Morey, 2009; Gendek *et al.*, 2018; Ramezanzade y Ghazanfari, 2018).



Significance Level: 0.05

**Figura 25.** Resultados para la durabilidad mecánica en pellets.

## 8. CONCLUSIONES

Este estudio determinó que la distribución del tamaño de partícula del aserrín fue adecuada para la producción de pellets. El contenido de humedad de los pellets se encuentra dentro de los parámetros estándar, correspondiendo a la clase M10 (UNE-EN ISO 14961-2).

Los pellets de fabáceas presentan un mayor contenido de cenizas que los de pino y se clasifican para uso no industrial. En cuanto a la cantidad de materia inorgánica, los pellets de pino y fabáceas se clasifican como clases A1 (*Pinus spp.*), 2A (*Albizia plurijuga*), y B (*Acacia farnesiana* y *Prosopis laevigata*), de acuerdo con la norma UNE-EN ISO 14961-2. Sin embargo, *Acacia pennatula* no cumple con ninguna clase al exceder el límite del 3.0%. Los pellets de pino mostraron un menor contenido de carbono fijo que los de fabáceas, y en relación con la materia volátil, el resultado fue el opuesto.

El poder calorífico de todos los pellets superó el límite establecido por la norma UNE-EN ISO 14961-2.

La composición elemental revela que los niveles de C, H y O están dentro de los parámetros de otras especies de madera, y con respecto al N, todos cumplen con la certificación ENplus.

Se identificaron 22 elementos químicos en las cenizas de los pellets, siendo los más comunes el Ca y el K, y no se detectaron elementos pesados.

Basándose en el tamaño de los pellets, se clasifican como D06 (UNE-EN ISO 17225-2).

La densidad aparente de los pellets estuvo ligeramente por encima del límite inferior de la norma.

La durabilidad mecánica de los pellets de pino cumple con el estándar ENplus A1 ( $\geq 98.0\%$ ), mientras que los pellets de fabáceas no cumplen con este estándar y, por lo tanto, podrían utilizarse localmente.

Los resultados obtenidos en este estudio confirman la hipótesis planteada. Se comprobó que los pellets elaborados a partir de las especies de fabáceas presentan propiedades físicas, químicas, y energéticas comparables a la de los pellets de pino.

## 9. RECOMENDACIONES

- Se sugiere evaluar el efecto de adhesivos como lignina recuperada o almidones en la resistencia mecánica de los pellets, buscando alcanzar los estándares de durabilidad requeridos por las normas internacionales.
- Explorar combinaciones de fabáceas con otras especies como *Pinus* spp. o residuos agrícolas para equilibrar ventajas y desventajas, como reducir el contenido de cenizas o mejorar la densidad energética.
- Es necesario analizar cómo variables como humedad inicial, temperatura de prensado y velocidad de la matriz influyen en la calidad final del pellet, con el fin de mejorar sus propiedades físicas y energéticas.
- Por último, se recomienda llevar a cabo pruebas en calderas comerciales u otros sistemas de combustión, como calefactores residenciales o gasificadores para evaluar el comportamiento de estos pellets durante la combustión, midiendo eficiencia térmica, emisiones y formación de residuos.

# 10. BIBLIOGRAFÍA

- 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>
- Agu, O. S., Tabil, L. G., Mupondwa, E., Emadi, B., & Cree, D. (2025). Pelletization and quality evaluation of torrefied selected biomass with microwave absorber. *Results in Engineering*, 25, 104183. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104183>
- Alvarado Flores, J. J., & Rutiaga Quiñones, J. G. (2018). Estudio de cinética en procesos termogravimétricos de materiales lignocelulósicos. *Maderas. Ciencia y Tecnología*, 20(2), 221-238. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2018005002601>
- Alvarado Flores, J. J., Pintor Ibarra, L. F., Mendez Zetina, F. D., Rutiaga Quiñones, J. G., Alcaraz Vera, J. V., & Ávalos Rodríguez, M. L. (2024). Pyrolysis and Physicochemical, Thermokinetic and Thermodynamic Analyses of *Ceiba aesculifolia* (Kunth) Britt and Baker Waste to Evaluate Its Bioenergy Potential. *Molecules*, 29(18), 4388. <https://doi.org/10.3390/molecules29184388>
- Anukam, A., Berghel, J., Henrikson, G., Frodeson, S., & Ståhl, M. (2021). A review of the mechanism of bonding in densified biomass pellets. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 148, 111249. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111249>
- Apolinar-Hidalgo, F. A., Honorato-Salazar, J. A., & Colotl Hernández, G. (2017). Caracterización energética de la madera de *Acacia pennatula* Schltdl. & Cham. y *Trema micrantha* (L.) Blume. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 8(39), 71–81. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v8i39.44>
- Arcibar-Orozco, J. A., Delgado-Balbuena, J., Rios-Hurtado, J. C., & Rangel-Mendez, J. R. (2014). Influence of iron content, surface area and charge distribution in the arsenic removal by activated carbons. *Chemical Engineering Journal*, 249, 201–209. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.03.096>

ASTM D1102-84 (2013). "Standard Test Method for Ash in Wood," 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.

Barrera-Calva, E., González, F., Hernández-Pérez, C. D., Martínez, G., Huerta-Arcos, L., Rosas-Cedillo, R., & Rentería-Tapia, V. (2021). Maderas de zonas áridas de México, poder calorífico por ATG-ATD y mediante bomba calorimétrica. *Madera y Bosques*, 27(3), e2732106. <https://doi.org/10.21829/myb.2021.2732106>

Bustamante García, V., Carrillo Parra, A., Prieto Ruíz, J. Á., Corral-Rivas, J. J., & Hernández Díaz, J. C. (2016). Química de la biomasa vegetal y su efecto en el rendimiento durante la torrefacción: revisión. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 7(38), 5-23. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-11322016000600005&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-11322016000600005&lng=es&tlng=es)

Carrillo-Parra, A., Ngangyo-Heya, M., Colín-Urieta, S., Foroughbakhch, R., Rutiaga-Quiñones, 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-Quiñones, J. G., Ríos-Saucedo, J. C., *et al.* (2022). 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>

Casanova Treto, P., Solís, K., & Carrillo, T. (2017). Propiedades térmicas y fisicoquímicas de pellets con fines energéticos elaborados a partir de residuos de aserradero. *Ingeniería. Revista De La Universidad De Costa Rica*, 27(1), 57-74. <https://doi.org/10.15517/jte.v27i1.25852>

Casiano Domínguez, M., & Paz Pellat, F. (2018). Spectral patterns of the phenology of vegetative and reproductive development of huizache trees (*Acacia farnesiana* (L.) Willd.). *Terra Latinoamericana*, 36(4), 393-409. <https://doi.org/10.28940/terra.v36i4.417>

- Demirbas, A. (2007). Progress and recent trends in biofuels. *Progress in Energy and Combustion Science*, 33(1), 1-18. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2006.06.001>
- Duncan, A., Pollard, A., & Fellouah, H. (2013). Torrefied, spherical biomass pellets through the use of experimental design. *Applied Energy*, 101, 237–243. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.03.035>
- Enerdata. (2022). World Energy & Climate Statistics—Yearbook 2022. *World Energy Consumption Statistics*, Enerdata. Disponible online: <https://yearbook.enerdata.net/total-energy/world-energy-production.html>
- ENplus. (2015). Manual Enplus, “Esquema de Certificación de Calidad Para Pellets de Madera Parte 3: Requisitos de Calidad de Los Pellets”. Disponible online: <https://enplus-pellets.eu/es/component/attachments/?task=download&id=162:ENplus-Manual-Espaa-vs-3> (consultado el 10 de febrero de 2025).
- Estrada-Castillón, E., Yen Méndez, C., Delgado Salinas, A., & Villarreal Quintanilla, J. A. (2004). Leguminosas del centro del estado de Nuevo León, México. *Anales del Instituto de Biología. Serie Botánica*, 75(1), 73-85. <https://www.redalyc.org/pdf/400/40075105.pdf>
- Fengel, D., y Wegener, G. (1983). *Química de la madera, ultraestructura, reacciones*, Walter de Gruyter, Berlín, Alemania.
- Fernández González, J., Gutiérrez Martín, F., Del Río González, P., San Miguel Alfaro, G., Bahillo Ruiz, A., Sánchez Hervás, JM, ... Rodríguez Antón, LM (2015). *Tecnologías para el uso y transformación de biomasa energética*. Ediciones Mundi-Prensa. ISBN-13: 9788484766742
- Forero-Núñez, C., Fajardo, G., & Sierra, F. (2012). Producción y uso de pellets de biomasa para la generación de energía térmica: una revisión a los modelos del proceso de gasificación. *Iteckne*, 9(1), 21–30. <https://doi.org/10.15332/iteckne.v9i1.2743>

- García, R., Pizarro, C., Lavín, A. G., & Bueno, J. L. (2012). Characterization of Spanish biomass wastes for energy use. *Bioresource Technology*, *103*(1), 249–258. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.10.004>
- García-Maraver, A., Rodríguez, M. L., Serrano-Bernardo, F., Díaz, L. F., & Zamorano, M. (2015). Factors affecting the quality of pellets made from residual biomass of olive trees. *Fuel Processing Technology*, *129*, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2014.08.018>
- Gendek, A., Aniszewska, M., Malat'ák, J., & Velebil, J. (2018). Evaluation of selected physical and mechanical properties of briquettes produced from cones of three coniferous tree species. *Biomass and Bioenergy*, *117*, 173–179. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.07.025>
- Ghetti, P., Ricca, L., & Angelini, L. (1996). Thermal analysis of biomass and corresponding pyrolysis products. *Fuel*, *75*(5), 565–573. [https://doi.org/10.1016/0016-2361\(95\)00296-0](https://doi.org/10.1016/0016-2361(95)00296-0)
- Gillespie, G. D., Everard, C. D., Fagan, C. C., & McDonnell, K. P. (2013). Prediction of quality parameters of biomass pellets from proximate and ultimate analysis. *Fuel*, *111*, 771–777. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.05.002>
- Gonzales Arnao, W., & Verastegui Lazo, J. (2024). Caracterización y microgasificación de pellets de biomasa a partir de residuos leñosos para cocción y calefacción. *Revista I+i*, *18*, 32–43. <https://doi.org/10.71701/revistaii.v.18.2024.86>
- Harun, N. Y., & Afzal, M. T. (2016). Effect of Particle Size on Mechanical Properties of Pellets Made from Biomass Blends. *Procedia Engineering*, *148*, 93–99. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.445>
- Holt, G. A., Blodgett, T. L., & Nakayama, F. S. (2006). Physical and combustion characteristics of pellet fuel from cotton gin by-products produced by select processing treatments. *Industrial Crops and Products*, *24*(3), 204–213. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2006.06.005>

- INEGI (2025). Espacio y Datos de México. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Accesado el 07 de marzo de 2025 en: <https://www.inegi.org.mx/app/mapa/espaciodydatos/default.aspx>
- Kaliyan, N., & Morey, R. V. (2009). Factors affecting strength and durability of densified biomass products. *Biomass and Bioenergy*, 33(3), 337–359. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2008.08.005>
- Kataki, R., & Konwer, D. (2002). Fuelwood characteristics of indigenous tree species of north-east India. *Biomass and Bioenergy*, 22(6), 433–437. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(02\)00026-0](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(02)00026-0)
- Kougioumtzis, M. A., Kanaveli, I. P., Karampinis, E., Grammelis, P., & Kakaras, E. (2021). Combustion of olive tree pruning pellets versus sunflower husk pellets at industrial boiler. Monitoring of emissions and combustion efficiency. *Renewable Energy*, 171, 516–525. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.02.118>
- Lee, H.-H., & Hsu, C.-M. (2025). Total Quality Management Enhances Wood Pellet Utilization for Sustainable Energy. *Sustainability*, 17(4), 1562. <https://doi.org/10.3390/su17041562>
- Lehtikangas, P. (2001). Quality properties of pelletised sawdust, logging residues and bark. *Biomass and Bioenergy*, 20(5), 351–360. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(00\)00092-1](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(00)00092-1)
- Liu, Z., Mi, B., Jiang, Z., Fei, B., Cai, Z., & Liu, X. (2016). Improved bulk density of bamboo pellets as biomass for energy production. *Renewable Energy*, 86, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.08.011>
- Llamas, F., & Acedo, C. (2018). Las leguminosas (Leguminosae o Fabaceae): una síntesis de las clasificaciones, taxonomía y filogenia de la familia a lo largo del tiempo. *AmbioCiencias*, (14), 5–18. <https://doi.org/10.18002/ambioc.v0i14.5542>
- Maj, I., Niesporek, K., Płaza, P., Maier, J., & Łój, P. (2025). Biomass Ash: A Review of Chemical Compositions and Management Trends. *Sustainability*, 17(11), 4925. <https://doi.org/10.3390/su17114925>

- Mani, S., Tabil, L. G., & Sokhansanj, S. (2006). Effects of compressive force, particle size and moisture content on mechanical properties of biomass pellets from grasses. *Biomass and Bioenergy*, 30(7), 648–654. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2005.01.004>
- Martínez-Gómez, O., Pintor-Ibarra, L. F., Rutiaga-Quiñones, J. G., & Corona-Terán, J. (2022). Chemical Composition and Energy Evaluation of *Abies* spp. and *Pinus* spp. Sawdust Collected as a Byproduct of the Primary Wood Sawing. *South-east European forestry: SEEFOR*, 13(2), 89-96. <https://doi.org/10.15177/seeфор.22-08>
- Martínez-Pérez, R., Pedraza-Bucio, F. E., Orihuela-Equihua, R., Lopez-Albarran, P., & Rutiaga-Quiñones, J. (2015). Calorific value and inorganic material of ten Mexican wood species. *Wood Research*, 60, 281–292. Recuperado de [https://www.researchgate.net/publication/282378904\\_Calorific\\_value\\_and\\_inorganic\\_material\\_of\\_ten\\_Mexican\\_wood\\_species](https://www.researchgate.net/publication/282378904_Calorific_value_and_inorganic_material_of_ten_Mexican_wood_species)
- Masera, O., & Rivero, J. C. S. (2022). Promoting a Sustainable Energy Transition in Mexico: the Role of Solid Biofuels. *Bioenergy Research*, 15, 1691–1693. <https://doi.org/10.1007/s12155-022-10540-z>
- Maza-Villalobos, S., Macedo-Santana, F., Rodríguez-Velázquez, J., Oyama, K., & Martínez-Ramos, M. (2014). Variación de la estructura y composición de comunidades de árboles y arbustos entre tipos de vegetación en la Cuenca de Cuitzeo, Michoacán. *Botanical Sciences*, 92(2), 243–258. <https://doi.org/10.17129/botsci.104>
- McKendry, P. (2002). Energy production from biomass (part 1): Overview of biomass. *Bioresource Technology*, 83(1), 37-46. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(01\)00118-3](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00118-3)
- Mejía, N. (2016). Potencial biomásico y propiedades energéticas de cuatro especies del bosque seco de Honduras. *Tatascán*, 26, 17–25. Recuperado de [https://www.researchgate.net/publication/315115368\\_Potencial\\_biomásico\\_y\\_propiedades\\_energeticas\\_de\\_cuatro\\_especies\\_del\\_bosque\\_seco\\_de\\_Honduras](https://www.researchgate.net/publication/315115368_Potencial_biomásico_y_propiedades_energeticas_de_cuatro_especies_del_bosque_seco_de_Honduras)
- Minitab, LLC. (2019). Minitab (Versión 19) [Software de computadora]. Obtenido de <https://www.minitab.com/es-mx/>

- Miranda, M. T., Arranz, J. I., Román, S., Rojas, S., Montero, I., López, M., & Cruz, J. A. (2011). Characterization of grape pomace and pyrenean oak pellets. *Fuel Processing Technology*, 92(2), 278–283. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2010.05.035>
- Mostafa, M. E., Hu, S., Wang, Y., Su, S., Hu, X., Elsayed, S. A., 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>
- Murillo, S. E. P., Robles, A. M. S., Nevárez, E. M. Z., & Tomalá, K. L. C. (2025). Análisis de las técnicas de aprovechamiento de biomasa en América Latina. *Revista Iberoamericana de educación*, 9(1), 73–94. <https://doi.org/10.31876/rie.v9i1.289>
- Ngangyo Heya, M., Romo Hernández, A. L., Foroughbakhch Pournavab, R., Ibarra Pintor, L. F., Díaz-Jiménez, L., Heya, M. S., Salas Cruz, L. R., & Carrillo Parra, A. (2022). Physicochemical characteristics of biofuel briquettes made from pecan (*Carya illinoensis*) pericarp wastes of different particle sizes. *Molecules*, 27(3), 1035. <https://doi.org/10.3390/molecules27031035>
- Ngangyo-Heya, M., Foroughbakhch-Pournavab, R., Carrillo-Parra, A., Rutiaga-Quñones, J. G., Zelinski, V., & Pintor-Ibarra, L. F. (2016). Calorific Value and Chemical Composition of Five Semi-Arid Mexican Tree Species. *Forests*, 7(3), 58. <https://doi.org/10.3390/f7030058>
- Nunes, L. J. R., Matias, J. C. O., & Catalão, J. P. S. (2014). Mixed biomass pellets for thermal energy production: A review of combustion models. *Applied Energy*, 127, 135–140. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.04.042>
- Nunes, L. J. R., Matias, J. C. O., & Catalão, J. P. S. (2016). Biomass combustion systems: A review on the physical and chemical properties of the ashes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 235–242. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.08.053>
- Núñez-Retana, V. D., Rosales-Serna, R., Prieto-Ruíz, J. Á., Wehenkel, C., & Carrillo-Parra, A. (2020). Improving the physical, mechanical and energetic properties of *Quercus*

- spp. wood pellets by adding pine sawdust. *PeerJ*, 8, e9766. <https://doi.org/10.7717/peerj.9766>
- Obernberger, I., & Thek, G. (2004). Physical characterisation and chemical composition of densified biomass fuels with respect to their combustion behaviour. *Biomass and Bioenergy*, 27(6), 653-669. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2003.07.006>
- Obernberger, I., & Thek, G. (2010). *The Pellet Handbook*. Earthscan.
- Obernberger, I., Brunner, T., & Bärnthaler, G. (2006). Chemical properties of solid biofuels—significance and impact. *Biomass and Bioenergy*, 30(11), 973–982. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2006.06.011>
- Palacios-Romero, A., Jiménez Muñoz, E., Rodríguez Laguna, R., & Razo Zárata, R. (2021). Distribución potencial de *Prosopis laevigata* (Humb. et Bonpl. ex Willd.) M.C. Johnst. en el estado de Hidalgo, México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 12(63), 71–87. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v12i63.812>
- Palamanit, A., Khongphakdi, P., Tirawanichakul, Y., & Phusunti, N. (2019). Investigation of yields and qualities of pyrolysis products obtained from oil palm biomass using an agitated bed pyrolysis reactor. *Biofuel Research Journal*, 6(4), 1065–1079. <https://doi.org/10.18331/BRJ2019.6.4.3>
- Paykani, A., Chehrmonavari, H., Tsolakis, A., Alger, T., Northrop, W. F., & Reitz, R. D. (2022). Synthesis gas as a fuel for internal combustion engines in transportation. *Progress in Energy and Combustion Science*, 90, 100995. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2022.100995>
- PelWod. (2025). *Pellet prices*. Recuperado de <https://pelwod.com/en/blog/pellet-prices>
- Pintor-Ibarra, L. F., Alvarado-Flores, J. J., Rutiaga-Quiñones, J. G., Alcaraz-Vera, J. V., Ávalos-Rodríguez, M. L., & Moreno-Anguiano, O. (2024). Chemical and energetic characterization of the wood of *Prosopis laevigata*: Chemical and thermogravimetric methods. *Molecules*, 29(11), 2587. <https://doi.org/10.3390/molecules29112587>

- Pokhrel, G., Kizha, A. R., & Gardner, D. J. (2022). Transportation cost analysis on alternative wood feedstocks for manufacturing wood-plastic composites. *BioResources*, *17*(1), 634-651. <https://doi.org/10.15376/biores.17.1.634-651>
- Pradhan, P., Arora, A., & Mahajani, S. M. (2018a). Pilot scale evaluation of fuel pellets production from garden waste biomass. *Energy for Sustainable Development*, *43*, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2017.11.005>
- Pradhan, P., Mahajani, S. M., & Arora, A. (2018b). Production and utilization of fuel pellets from biomass: A review. *Fuel Processing Technology*, *181*, 215–232. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2018.09.021>
- Pradhan, P., Mohan, O., Kurian, V., & Kumar, A. (2025). Production and quality analysis of biofuel pellets from Canadian forest and agricultural biomass. *Biomass and Bioenergy*, *194*, 107697. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2025.107697>
- Puig-Arnabat, M., Shang, L., Sárossy, Z., Ahrenfeldt, J., & Henriksen, U. B. (2016). From a single pellet press to a bench scale pellet mill — Pelletizing six different biomass feedstocks. *Fuel Processing Technology*, *142*, 27–33. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2015.09.022>
- Racero-Galaraga, D., Rhenals-Julio, J. D., Sofan-German, S., Mendoza, J. M., & Bula-Silvera, A. (2024). Proximate analysis in biomass: Standards, applications and key characteristics. *Results in Chemistry*, *12*, 101886. <https://doi.org/10.1016/j.rechem.2024.101886>
- Ramezanzade, M., & Ghazanfari Moghaddam, A. (2018). Optimizing the production parameters for pellets made from pistachio tree pruning using multi-response optimization. *Waste and Biomass Valorization*, *9*, 1213–1221. <https://doi.org/10.1007/s12649-017-9840-1>
- Ramírez Ramírez, M. A., Carrillo Parra, A., Ruiz Aquino, F., Luján Álvarez, C., Hernández Solís, J. J., Carrillo Ávila, N., ... Rutiaga Quiñones, J. G. (2025). Valorización de pellets combustibles usando aserrín de 23 especies de maderas mexicanas. *TECNOCENCIA Chihuahua*, *19*(1), e1829. <https://doi.org/10.54167/tch.v19i1.1829>

- Rollinson, A. N., & Williams, O. (2016). Experiments on torrefied wood pellet: study by gasification and characterization for waste biomass to energy applications. *Royal Society Open Science*, 3(5), 150578. <https://doi.org/10.1098/rsos.150578>
- Rosales-Serna, R., Carrillo-Parra, A., Ríos-Saucedo, J. C., Reyes-Jáquez, D., Sierra-Zurita, D., Santana-Espinoza, S., Jiménez-Ocampo, R., Domínguez-Martínez, P. A., & Nava-Berumen, C. A. (2024). Biomass Densification to Improve Management Efficiency and to Obtain High Value Products in México. *Resources*, 13(3), 48. <https://doi.org/10.3390/resources13030048>
- Ruiz-Aquino, F., Jiménez-Mendoza, M. E., Fuente-Carrasco, M. E., Santiago-García, W., Suárez-Mota, M. E., Aquino-Vásquez, C., & Rutiaga-Quiñones, J. G. (2022). Energy Properties of 22 Timber Species from Oaxaca, Mexico. *South-east European forestry: SEEFOR*, 13(2), 107-113. <https://doi.org/10.15177/seefor.22-13>
- Rutiaga-Quiñones, J. G., Pintor-Ibarra, L. F., Orihuela-Equihua, R., González-Ortega, N., Ramírez-Ramírez, M. A., Carrillo-Parra, A., ... & Luján-Álvarez, C. (2020). Characterization of Mexican waste biomass relative to energy generation. *BioResources*, 15(4), 8529–8553. <https://doi.org/10.15376/biores.15.4.8529-8553>
- Salazar-Herrera, F., Pintor-Ibarra, L. F., Musule, R., Nava-Berumen, C. A., Alvarado-Flores, J. J., González-Ortega, N., & Rutiaga-Quiñones, J. G. (2023). Chemical and energetic properties of seven species of the Fabaceae family. *South-east European forestry: SEEFOR*, 14(2), 215–224. <https://doi.org/10.15177/seefor.23-19>
- Sarker, T. R., Nanda, S., Meda, V., & Dalai, A. K. (2023). Densification of waste biomass for manufacturing solid biofuel pellets: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 21(1), 231-264.
- Secretaría de Energía. (2023). *Balance Nacional de Energía 2023*. México. Recuperado el 10 de febrero de 2025. Disponible online: <https://www.gob.mx/sener/articulos/balance-nacional-de-energia-296106>. (consultado el 17 de febrero de 2025)

- Silva, G. G. D., Guilbert, S., & Rouau, X. (2011). Successive centrifugal grinding and sieving of wheat straw. *Powder Technology*, 208(2), 266–270. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2010.08.01>
- Soria-González, J. A., Tauro, R., Alvarado-Flores, J. J., Berrueta-Soriano, V. M., & Rutiaga-Quiñones, J. G. (2022). Avocado Tree Pruning Pellets (*Persea americana* Mill.) for Energy Purposes: Characterization and Quality Evaluation. *Energies*, 15(20), 7514. <https://doi.org/10.3390/en15207514>
- Stevens, P. F. (2017). *Angiosperm Phylogeny Website*. Version 14, July 2017. <http://www.mobot.org/MOBOT/research/APweb/>
- Tadesse, Y., Kassahun, S. K., & Kiflie, Z. (2023). Effects of operational parameters on torrefaction performance of coffee husk and cotton stalk mixed biomass: A surface response methodology approach. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 13(15), 7955–7970. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-01649-w>
- Tauro, R., García, C. A., Skutsch, M., & Masera, O. (2018). The potential for sustainable biomass pellets in Mexico: An analysis of energy potential, logistic costs and market demand. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82(Part 1), 380–389. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.036>
- Thek, G., & Obernberger, I. (2010). *The Pellet Handbook: The production and thermal utilization of biomass pellets* (1st ed.). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781849775328>
- UNE-CEN/TS 15104 EX (2008). “Determinación del contenido de carbono, hidrógeno y nitrógeno. Métodos instrumentales [Determinación del contenido de carbono, hidrógeno y nitrógeno. Métodos instrumentales]”, AENOR, Madrid, España.
- UNE-EN ISO 14961-1 (2011). “Especificaciones y clases de combustibles. Parte 1: Requisitos generales [Especificaciones y clases de combustible. Parte 1: Requisitos generales]”, AENOR, Madrid, España.

UNE-EN ISO 14961-2 (2012): biocombustibles sólidos. Especificaciones y clases de combustibles. Parte 2: Pélets de madera para uso no industrial. Madrid: Asociación Española de Normalización (UNE).

UNE-EN ISO 17225-1 (2014). Biocombustibles Sólidos. Especificaciones y Clases de Combustibles. Parte 1: Requisitos Generales. 1 asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR).

UNE-EN ISO 17225-2 (2014). Biocombustibles sólidos. Especificaciones y clases de combustibles. Parte 2: Clases de pélets de madera. EN ISO 17225-2:2014, Estándar Europeo, Asociación Española de Normalización, Madrid, España. 16p.

UNE-EN ISO 17827-2 (2016). Biocombustibles sólidos. Determinación de la distribución de tamaño de partícula para combustibles sin comprimir. Parte 2: Método del tamiz vibratorio con abertura de malla inferior o igual a 3,15 mm. EN ISO 15149-2:2016, Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), Madrid, España. 17p.

UNE-EN ISO 17828 (2016). Biocombustibles sólidos. Determinación de la densidad a granel. EN ISO 17828:2015, Estándar Europeo, Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), Madrid, España. 14p.

UNE-EN ISO 17831-1 (2016). Biocombustibles sólidos. Determinación de la durabilidad mecánica de pélets y briquetas. Parte 1: Pélets. EN ISO 17831-1:2015, Estándar Europeo, Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), Madrid, España. 13p.

UNE-EN ISO 18125 (2018). Biocombustibles sólidos. Determinación del poder calorífico, EN ISO 18125: 2017, Asociación Española de Normalización, Madrid, Spain, 68 p.

UNE-EN ISO 18134-1 (2016). Biocombustibles Sólidos, Determinación del Contenido de Humedad, Método de Secado en Estufa, Humedad Total, Método de Referencia. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR).

van Lith, S. C., Alonso-Ramírez, V., Jensen, P. A., Frandsen, F. J., & Glarborg, P. (2006). Release to the gas phase of inorganic elements during wood combustion: Part 1:

- Development and evaluation of quantification methods. *Energy & Fuels*, 20(3), 964–978. <https://doi.org/10.1021/ef050131r>
- Vassilev, S. V., Baxter, D., Andersen, L. K., & Vassileva, C. G. (2010). An overview of the chemical composition of biomass. *Fuel*, 89(5), 913–933. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.10.022>
- Vega-Nieva, D. J., Ortiz Torres, L., Míguez Tabares, J. L., & Morán, J. (2016). Measuring and predicting the slagging of woody and herbaceous Mediterranean biomass fuels on a domestic pellet boiler. *Energy & Fuels*, 30(2), 1085–1095. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.5b02495>
- Zajac, G., Kuranc, A., & Szyszlak-Bargłowicz, J. (2024). Monitoring Quality Parameters of Wood Pellets Available on the Polish Market. In E. Lorencowicz, B. Huyghebaert, & J. Uziak (Eds.), *Farm Machinery and Processes Management in Sustainable Agriculture. FMPMSA 2024* (Vol. 609, pp. 545–554). Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-70955-5\\_53](https://doi.org/10.1007/978-3-031-70955-5_53)
- Zhang, Y., Chen, F., Chen, D., Zhou, Y., & Cen, K. (2022). Upgrading of biomass pellets by torrefaction and its influence on the hydrophobicity, mechanical property, and fuel quality. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 12, 2061–2070. <https://doi.org/10.1007/s13399-020-00666-5>

# Jesús Hernández Méndez

## Caracterización de los pellets con fines bioenergéticos elaborados a partir de la madera de cuatro f

 Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

### Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid::3117:486758902

Fecha de entrega

25 ago 2025, 7:33 a.m. GMT-6

Fecha de descarga

25 ago 2025, 7:45 a.m. GMT-6

Nombre del archivo

Caracterización de los pellets con fines bioenergéticos elaborados a partir de la madera de cuatr....pdf

Tamaño del archivo

2.0 MB

69 páginas

15.335 palabras

88.491 caracteres




## 16% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

### Filtrado desde el informe


- ▶ Texto citado
- ▶ Texto mencionado
- ▶ Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

### Fuentes principales

- 16%  Fuentes de Internet
- 13%  Publicaciones
- 0%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

### Marcas de integridad

#### N.º de alerta de integridad para revisión

-  **Texto oculto**  
1279 caracteres sospechosos en N.º de página  
El texto es alterado para mezclarse con el fondo blanco del documento.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

# Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado  
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



A quien corresponda,

Por este medio, quien abajo firma, bajo protesta de decir verdad, declara lo siguiente:

- Que presenta para revisión de originalidad el manuscrito cuyos detalles se especifican abajo.
- Que todas las fuentes consultadas para la elaboración del manuscrito están debidamente identificadas dentro del cuerpo del texto, e incluidas en la lista de referencias.
- Que, en caso de haber usado un sistema de inteligencia artificial, en cualquier etapa del desarrollo de su trabajo, lo ha especificado en la tabla que se encuentra en este documento.
- Que conoce la normativa de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en particular los Incisos IX y XII del artículo 85, y los artículos 88 y 101 del Estatuto Universitario de la UMSNH, además del transitorio tercero del Reglamento General para los Estudios de Posgrado de la UMSNH.

| Datos del manuscrito que se presenta a revisión |   |  |
|---|---|--|
| <b>Programa educativo</b>                       | Maestría en Ciencias y Tecnología de la Madera  |  |
| <b>Título del trabajo</b>                       | Caracterización de los pellets con fines bioenergéticos elaborados a partir de la madera de cuatro fabáceas |  |
|   | <b>Nombre</b>   | <b>Correo electrónico</b>                    |
| <b>Autor/es</b>                                 | Jesús Hernández Méndez  | 1614353d@umich.mx                            |
| <b>Director</b>                                 | José Guadalupe Rutiaga Quiñones.<br>José Juan Alvarado Flores.  | jose.rutiaga@umich.mx<br>jialvarado@umich.mx |
| <b>Codirector</b>                               | Luis Fernando Pintor Ibarra   | luis.pintor@umich.mx                         |
| <b>Coordinador del programa</b>                 | Abril Munro Rojas   | abril.munro@umich.mx                         |


| Uso de Inteligencia Artificial |             |             |
|--------------------------------|-------------|-------------|
| Rubro                          | Uso (sí/no) | Descripción |
| Asistencia en la redacción     | No          |             |

# Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado  
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



| Uso de Inteligencia Artificial             |             |                 |
|--|-------------|-----------------|
| Rubro                                      | Uso (sí/no) | Descripción     |
| Traducción al español                      | No          |                 |
| Traducción a otra lengua                   | Si          | Traductor DeepL |
| Revisión y corrección de estilo            | No          |                 |
| Análisis de datos                          | No          |                 |
| Búsqueda y organización de información     | No          |                 |
| Formateo de las referencias bibliográficas | No          |                 |
| Generación de contenido multimedia         | No          |                 |
| Otro                                       | No          |                 |

| Datos del solicitante |  |
|-----------------------|--|
| Nombre y firma        | Jesús Hernández Méndez  |
| Lugar y fecha         | Morelia, Michoacán, a 21 de agosto de 2025   |