



Recibido 05/12/2025
Aceptado 22/01/2026

EVALUACIÓN DE RESIDUOS MADERABLES DE PINUS SPP., DE 12 COMUNIDADES DE LA MESETA PURÉPECHA EN MICHOACÁN MÉXICO, PARA SU VIABILIDAD TÉCNICA Y ECONÓMICA PARA LA GENERACIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES DENSIFICADOS

EVALUATION OF WOOD WASTE FROM PINUS SPP., FROM 12 COMMUNITIES OF THE PURÉPECHA PLATEAU IN MICHOACÁN, MEXICO, FOR ITS TECHNICAL AND ECONOMIC VIABILITY FOR THE GENERATION OF DENSIFIED BIOFUELS

Mario Morales-Máximo ¹, José Guadalupe Rutiaga-Quiñones ^{1*}

¹Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Francisco J. Mújica SN, Ciudad Universitaria, Morelia 58040, Michoacán, México
Correo de autor de correspondencia: mmoralesmaximo@gmail.com

RESUMEN

El cambio climático y el uso de combustibles fósiles han propiciado el cambio hacia la búsqueda de fuentes de energía renovable. En ese sentido, la biomasa forestal termina siendo una alternativa fundamental en el proceso de transición energética, preferiblemente en áreas rurales. Esta investigación analizó la viabilidad técnica y económica del aprovechamiento de los residuos maderables de las residencias del género Pinus, generados mediante la recolección en 12 comunidades de la Meseta Purépecha, Michoacán, México, para la producción de biocombustibles densificados. La producción mostró que existía un importante volumen de residuos con alta potencia energética; comunidades como Angahuan (49,500 kg/mes) y la Mojonera (25,666 kg/mes) cuentan con el mayor volumen de residuos, lo que representa una clara ventaja para proyectos de bioenergía. La caracterización fisicoquímica y energética demostró que el material que se recolectó es óptimo para tal fin, ya que el contenido promedio de humedad es de 12.76% y el de poder calorífico promedio es de un alto valor de 17.89 MJ/kg. Adicionalmente, los altos contenidos de lignina (26.07% de promedio) favorecen la compactación y la eficiencia energética general de los biocombustibles sólidos. Del mismo modo, el análisis económico, mediante un costo esperado estimado en 0.025 USD/kg, sugiere un costo total de 41,700 USD para el aprovechamiento de los residuos de las 12 comunidades. Los resultados indican que los residuos de madera en la Meseta Purépecha cuentan con una altura de condiciones favorables para la producción de biocombustibles densificados, lo que repercute en la autosuficiencia energética, el desarrollo económico local y la práctica de la renovación de recursos en la región.

PALABRAS CLAVE

Forestal, Michoacán, Sustentabilidad, Bioenergía, Biocombustibles

ABSTRACT

Climate change and the use of fossil fuels have driven the shift towards renewable energy sources. In this context, forest biomass has become a key alternative in the energy transition process, particularly in rural areas. This research analyzed the technical and economic feasibility of utilizing wood waste from residential Pinus trees, collected in 12 communities of the Purépecha Plateau, Michoacán, Mexico, for the production of densified biofuels. The results showed a significant volume of waste with high energy potential; communities such as Angahuan (49,500 kg/month) and La Mojonera (25,666 kg/month) have the largest volumes of waste, representing a clear advantage for bioenergy projects. The physicochemical and energetic characterization demonstrated that the collected material is optimal for this purpose, given its average moisture content of 12.76% and a high average calorific value of 17.89 MJ/kg. Additionally, the high lignin content (26.07% on average) promotes compaction and the overall energy efficiency of the solid biofuels. Similarly, the economic analysis, using an estimated expected cost of USD 0.025/kg, suggests a total cost of USD 41,700 for utilizing the waste from the 12 communities. The results indicate that the wood waste in the Purépecha Plateau offers favorable conditions for the production of densified biofuels, which contributes to energy self-sufficiency, local economic development, and the practice of resource renewal in the region.

KEYWORDS

Forestry, Michoacán, Sustainability, Bioenergy, Biofuels

INTRODUCCIÓN

El cambio climático constituye uno de los más serios problemas socioambientales a los que nos enfrentamos en la actualidad. Las emisiones que resultan del extenso uso de combustibles fósiles han incrementado las concentraciones atmosféricas de gases de efecto invernadero (GEI), alterando los ciclos biogeoquímicos y afectando la estabilidad del clima en todo el planeta. Ante esta situación, la necesidad de buscar fuentes de energía renovable, segura y asequible se ha convertido en una prioridad en nuestro afán de lograr un desarrollo sostenible. En este sentido, los recursos forestales y la biomasa se convierten en alternativas cruciales que facilitan el camino a seguir en la transición energética en particular en áreas rurales o bien con poco compromiso energético [1][2].

La biomasa en su acepción de materia orgánica de la naturaleza, ya sea vegetal o animal se presenta como una fuente de energía renovable muy versátil, ya que parte de residuos agrícolas, forestales o incluso industriales para generar calor, electricidad o biocombustibles [3].

Los residuos maderables generados en la explotación forestal o en la industria de la madera aserraderos, trabajos de talas y transformación y cortes suponen una parte importante de la biomasa potencial en muchos de los territorios boscosos [4].

El aprovechamiento de residuos forestales para bioenergía proporciona infinitas ventajas. Por un lado, supone una diversificación de la matriz energética y una disminución de depender de los combustibles fósiles y las emisiones de CO₂ ya que la combustión de la biomasa recicla el carbono biogénico previamente capturado en la producción de biomasa. Por otra parte, se desarrollan economías circulares, que permiten la reducción de residuos forestales, generan menor presión de extracción de combustibles fósiles y, a la vez, en el medio rural pueden generar servicios sociales como el trabajo, el desarrollo económico local y la autosuficiencia energética [5].





Paralelamente, la pertinencia del empleo sostenible de la biomasa se encuentra estrechamente vinculada a los compromisos internacionales en relación al desarrollo sostenible. Efectiva, el ODS 7 (Objetivo de Desarrollo Sostenible) parte del objetivo de que "en 2030 se haya asegurado el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna para todos, con la promoción de las fuentes de energía renovables como es el caso de la bioenergía no sólo contribuirá a la seguridad energética, sino que también se conseguirán los objetivos de tanto los ambientales como los climáticos y se contribuirá a una transición energética justa y responsable [6].

Particularmente en el caso de México, se ha reconocido que la biomasa forestal es una fuente estratégica para la energía energética renovable; su utilización como biocombustible puede contribuir a la diversificación energética del país y a la autonomía energética. En zonas rurales y en las comunidades forestales, en las que existen residuos de madera, la producción de biocombustibles sólidos (astillas, pellets, briquetas) es una alternativa técnica viable, con potencial para su implementación local, que reduce residuos y proporciona energía [7].

No obstante, el uso de biomasa debe comprenderse desde la sostenibilidad en su sentido más amplio, es decir, en la interrelación de las dimensiones ambientales, técnicas, económicas y sociales. La conversión de residuos forestales en energía debe hacerse bajo criterios de gestión forestal sostenible, para evitar la transformación en energía a expensas de la regeneración del bosque, de la biodiversidad, o bien de la capacidad de secuestro de carbono del ecosistema [8].

En este sentido, se hace necesario, llevar a cabo investigaciones de carácter local para evaluar la viabilidad técnica y económica del aprovechamiento energético de residuos maderables, tomando en cuenta las características ambientales, sociales y productivas de cada área; para territorios como la Meseta Purépecha (Michoacán, México), donde la explotación y transformación de madera de *Pinus* spp. es habitual; conocer el volumen de residuos que se generan, las características físico-químicas de los mismos, la capacidad calorífica, los costos de recolección y procesamiento y la cantidad de energía que se pueda acumular, es sin lugar a dudas, importante. En la Meseta Purépecha, Michoacán, numerosas comunidades generan permanentemente residuos procedentes de la explotación y transformación de la madera de *Pinus* spp., que muchas veces no son aprovechados; el propósito de esta investigación es valorar esos residuos maderables provenientes de 12 comunidades de la región, para conocer su viabilidad técnica y económica para la producción de biocombustibles densificados; los resultados esperan generar un diagnóstico del potencial energético de los residuos de madera e información de interés para la generación de estrategias que promuevan su aprovechamiento responsable y que fomenten la autosuficiencia energética en comunidades rurales, fortaleciendo prácticas productivas y ambientales en la Meseta Purépecha [9].

MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 SELECCIÓN DE LAS 12 COMUNIDADES DE ESTUDIO

La ejecución de la investigación tuvo como punto de partida la selección de las 12 comunidades de estudio de la Meseta Purépecha, Michoacán, México, para la que se definieron unos criterios específicos que garantizaran la pertinencia y representatividad de los datos obtenidos. El primer criterio implicaba que cada comunidad tuviese como actividad económica factible de su recurso maderable, concretamente en los procesos relacionados al manejo y transformación de la madera. Un segundo criterio es que las comunidades generen residuos maderables no aprovechados, ya fuesen limitaciones técnicas, económicas o la ausencia de proyectos para su valorización. El tercer criterio consistía en que, las actividades producidas estuvieran directamente vinculadas a la producción forestal de madera de las especies de *Pinus* spp., por su amplia distribución en la región y por su importancia a nivel de la industria local [10].

Con las comunidades seleccionadas, se hace la recolección de datos de campo a través de visitas técnicas, entrevistas con autoridades comunales y productores forestales y observación directa de los procesos de aprovechamiento y transformación de la madera. A la par, se hace el registro cuantitativo y cualitativo de los residuos maderables generados en cada sitio, considerando variables como tipo de residuo, volúmenes estimados, frecuencia de generación y prácticas locales de manejo.

Se recogieron también muestras representativas de los residuos para su análisis en laboratorio, donde se evaluaron características físicas (mecánicas) y propiedades energéticas relevantes que sirvieron para determinar su viabilidad, técnica y económica, en la producción de biocombustibles densificados. Todo el proceso metodológico se llevó a cabo siguiendo principios de una investigación aplicada, bajo el enfoque de la sostenibilidad y la economía circular y el uso eficiente de los recursos forestales.

2.2 CUANTIFICACIÓN Y ESTIMACIÓN DE LOS RESIDUOS MADERABLES

La segunda fase de la investigación fue la cuantificación de los residuos maderables generados en cada una de las 12 comunidades objeto de estudio. Para tal fin se realizaron visitas a cada una de las comunidades y se definió, como criterio mínimo, un aserradero de cada comunidad representativo de la producción de madera basada en *Pinus* spp.

Durante cada visita, se llevó a cabo una estimación mensual de la cantidad de residuos generados, de manera de poder obtener un valor aproximado de la producción regular de subproductos maderables. El procedimiento de cuantificación consistió en pesar los residuos en un costal de almacenamiento que utilizamos como unidad estándar para la medición. Una vez hecho el pesaje del costal lleno, multiplicamos este valor por el número total de costales acumulados en el aserradero durante el periodo de referencia, de forma tal que obtuvimos la estimación mensual de residuos en kilogramos.

Una vez hecha la cuantificación, se evaluó también la viabilidad energética de esos residuos; para ello se utilizó la misma fórmula que hicimos servir para calcular el potencial energético (PE) expresado en megajulios (MJ) [11]. La expresión utilizada fue la siguiente:

$$PE = \text{Masa del residuo (kg)} \times \text{Poder Calorífico (MJ/kg)} \quad (1)$$

Esta fórmula permitió estimar la energía potencial disponible en los residuos maderables generados en cada comunidad, proporcionando información clave para su posible aprovechamiento en la producción de biocombustibles densificados.

2.3 CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA Y ENERGÉTICA DE LOS RESIDUOS

El tercer paso de la investigación era llevar a cabo un análisis físico, químico y energético de los residuos maderables de *Pinus* spp. previamente caracterizados en las 12 comunidades elegidas. Este análisis tenía como finalidad poder determinar si los residuos analizados presentaban las características adecuadas para aprovecharse en la elaboración de biocombustibles densificados, considerando tres parámetros básicos: contenido de humedad, composición química básica y poder calorífico.

El contenido de humedad inicial se determinó o por triplicado mediante el método de deshidratación mediante el secado en estufa, conforme a la Norma UNE-EN 14774-1 [12]. Y aplicando la siguiente ecuación:

$$CH = \frac{(\text{Peso húmedo} - \text{Peso seco})}{(\text{Peso húmedo})} \times 100 \quad (2)$$

donde P_h representa el peso inicial de la muestra fresca y P_s el peso final después del secado a temperatura constante. Este parámetro permitió conocer el grado de humedad presente en los residuos, un factor decisivo para la eficiencia energética y la calidad del biocombustible.

Posteriormente, se realizó el análisis químico básico de los residuos mediante un método estandarizado en el que se determinan cuatro componentes básicos fundamentales: celulosa, hemicelulosa, lignina y extraíbles. Se estableció por medio de un procedimiento de análisis de fibras basado en el método gravimétrico denominado Van Soest utilizando a-amilasa [13]. Para ello se tomaron 0.5 g de harina de conos de pino en peso anhidro, para este proceso se utilizó un equipo ANKOM-200. Con ello se determinó la composición estructural del material y su potencial para ser transformado en un biocombustible sólido de calidad.

Finalmente, el poder calorífico de cada una de las muestras fue determinado mediante la utilización de una bomba calorimétrica, instrumento que permite medir la cantidad de energía que se libera por unidad de masa en el proceso de combustión total del residuo. Este valor es necesario para poder determinar la



viabilidad energética del material pues indica la cantidad de energía que se podría liberar una vez el residuo se haya densificado y utilizado como biocombustible [14].

La determinación del contenido de humedad, así como el análisis químico básico y la determinación del poder calorífico, han sido elegidos porque son aquellos parámetros que se pueden considerar como indicadores en la evaluación técnica de los residuos maderables en torno a su uso en la obtención de biocombustibles sólidos; todos estos parámetros dan lugar a una visión del comportamiento físico, de la composición estructural y del rendimiento energético, parámetros básicos que determinan el potencial de aprovechamiento del propio material en las condiciones exigidas de sostenibilidad.

2.4 ANÁLISIS ECONÓMICO DEL RESIDUO MADERABLE

El cuarto paso del proceso de indagación consistió en llevar a cabo un estudio económico de los residuos maderables de *Pinus* spp. con el fin de estudiar su viabilidad técnica y económica para su aprovechamiento como recurso energético o productivo. Esta fue una investigación de tipo cuantitativo que permitió estimar los costos integrales asociados a la utilización de los mencionados residuos en las 12 comunidades objeto de estudio.

Para ello, se generó una base de datos que concentró la información obtenida en etapas de cuantificación y caracterización de los residuos. Posteriormente, se definieron los parámetros económicos inherentes a su manejo, transporte y eventual transformación. La principal línea de estudio estuvo centrada en poder establecer la relación correspondiente entre la cantidad total de residuos disponibles (kg) y su costo unitario por kilogramo, lo que permitió llegar a una estimación clara y comparable entre las comunidades.

La evaluación económica se llevó a cabo utilizando una ecuación de costo total básico que integra la disponibilidad del recurso y su valor económico unitario, tal y como se formula (ver Ecuación 3):

$$\text{Costo Total (CT)} = Q_r \times C_{kg} \quad (3)$$

donde:

Q_r = Cantidad de residuo maderable disponible (kg),

C_{kg} = Costo unitario por kilogramo del residuo.

Esta ecuación permitió determinar el costo estimado de los residuos maderables para cada comunidad, facilitando la comparación entre escenarios y contribuyendo a la evaluación de su factibilidad económica para la generación de biocombustibles densificados.

RESULTADOS

3.1 COMUNIDADES SELECCIONADAS

Las comunidades participantes en el estudio, que fueron seleccionadas de acuerdo a criterios previamente establecidos vinculados al aprovechamiento forestal como principal actividad económica, quedan presentadas en la Tabla 1, donde aparecen las comunidades que fueron escogidas, dado que sus características más relevantes para esta investigación son la existencia de actividades productivas asociadas al uso de recursos maderables de *Pinus* spp., la presencia de aserraderos locales, así como también la generación continua de residuos derivadas de procesos de transformación primaria de la madera.

La información inicial evidencia que las comunidades mantienen una fuerte dependencia por la actividad forestal como la principal actividad económica del lugar. Esta situación permitió evidenciar un volumen importante de residuos maderables susceptibles de ser evaluados por su posible aprovechamiento energético y/o productivo. También se evidenció que, en la mayoría de los casos, los residuos no se encuentran valorizados, lo que los convierte en una oportunidad para ser integrados en procesos de generación de bioenergía o bien en procesos de elaboración de biocombustibles densificados.

De acuerdo con la información obtenida, las características sociodemográficas y productivas de las comunidades permiten cumplir con las condiciones necesarias para avanzar hacia alternativas sustentables que propicien un uso eficiente de los residuos forestales. La información obtenida en la Tabla 1 puede considerarse como un punto de partida importante para entender el contexto territorial y productivo en el cual se ha desarrollado el trabajo y estudio que se presenta en esta investigación.

Tabla 1. Comunidades analizadas

Comunidad	Ubicación geográfica
Angahuan	19°32'50" 102°13'34"
Arantepacua	19°35'44" 101°58'06"
Capacuaro	19°32'47" 102°03'08"
Cherán	19°41'16" 101°57'17"
Comachuen	19°34'16" 101°54'18"
La Mojonera	19°42'11" 101°50'00"
Nahuatzen	19°39'18" 101°54'59"
Paracho	19°38'50" 102°02'54"
Pichátaro	19°34'15" 101°48'25"
Sevina	19°37'44" 101°54'02"
Turícuaró	19°34'15" 101°56'23"
Quinceo	19°35'37" 101°59'58"

3.2 ESTIMACIÓN DE LA CANTIDAD DE RESIDUOS Y POTENCIAL ENERGÉTICO

Las doce comunidades seleccionadas para este estudio quedan reflejadas en la Tabla 2, donde se aporta información sobre la cantidad de residuos maderables generados y su potencial energético estimado. A medida que se cuantificaron los residuos de aserrín de *Pinus* spp en kg. por mes se procedió a calcular su potencial energético anual a partir de la Ecuación 1, lo que nos permitió estimar la viabilidad de la biomasa generada para la generación de biocombustibles densificados.

En términos generales, los resultados demuestran una notable variabilidad entre comunidades tanto en la generación de residuos y el potencial energético asociado, y dicha variabilidad parece estar relacionada directamente con la intensidad de las actividades forestales, así como con la intensidad de aprovechamiento maderable propia de cada una de las localidades.

Los valores obtenidos indican que la comunidad de Angahuan genera un mayor volumen de residuos, alcanzando los 49,500 kg/mes, lo que se traduce en un potencial energético en el orden de los 11,632.6 TJ del mismo modo que la comunidad con mayor cantidad de biomasa utilizada para fines energéticos. Por el contrario, Turícuaró y Paracho son los que tienen los volúmenes más bajos, 3,000 kg/mes, y 3,200 kg/mes, con potenciales energéticos para la generación de biocombustibles que no alcanzan los 800 TJ/año.

La Tabla 2. presenta de forma resumida los resultados del análisis anual de los residuos maderables de *Pinus* spp. contenidos en los mismos y su potencial energético estimado para cada una de las comunidades evaluadas.

A partir de los resultados se identifica las comunidades que poseen un mayor potencial al momento de desarrollar proyectos de bioenergía, siendo Angahuan y La Mojonera las que más producen residuos, circunstancia que les brinda una clara ventaja comparativa para poder generar biocombustibles densificados. Este hecho es un soporte fundamental para la toma de decisiones que vayan encaminadas a la valorización energética de los residuos forestales ubicados en la región de la Meseta Purépecha.



Tabla 2. Estimación del residuo maderable de *Pinus* spp., y su potencial energético

Comunidad	Residuos de biomasa de aserrín (kg/mes)	Potencial energético (TJ/año)
Angahuan	49,500	11,632.6
Arantepacua	8,500	2,856.4
Capacuaro	9,000	2,890
Cherán	8,000	2,728
Comachuen	5,000	2,062
La Mojonera	25,666	6,704.50
Nahuatzen	5,200	2,116.96
Paracho	3,200	787.36
Pichátaro	10,000	3,172
Sevina	5,200	2,116.96
Turícuro	3,000	740.8
Quinceo	6,700	2,439.16

3.3 CARACTERIZACIÓN FISCOQUÍMICA Y ENERGÉTICA

La caracterización físicoquímica y energética de los residuos maderables de *Pinus* spp. generados en las 12 comunidades seleccionadas se muestra en la Tabla 3. Estos resultados permiten evaluar la viabilidad técnica del material para la producción de biocombustibles densificados, considerando variables fundamentales como el contenido de humedad, poder calorífico, composición estructural (celulosa, hemicelulosa), lignina, extraíbles y contenido de cenizas. Los valores de contenido de humedad mostraron diferencias significativas entre comunidades, presentando, en términos generales, un contenido de humedad de 12.76%. Restando a las comunidades con los menores valores de humedad se encuentran: Nahuatzen (5.61%), Arantepacua (6.24%), Capacuaro (10.29%).

Se considera que, en la elaboración de biocombustibles sólidos, es un excelente resultado una humedad menor a un 12% puesto que no es necesario realizar procesos previos, lo que contribuiría en rebajar. Los procesos previos y requerimientos de tiempo de acondicionamiento. La literatura científica sugiere que los biocombustibles con un contenido inferior al 12% permiten la optimización de los procesos de compactación, una reducción de pérdidas de energía en el momento de la combustión, así como una mejor distribución de las condiciones de combustión [15][16]. En este sentido, las comunidades citadas configuran materiales idóneos para el briqueteado o el peletizado.

El poder calorífico (PC) representa un valor fundamental para la elaboración de biocombustibles sólidos, ya que es un parámetro que permite saber qué cantidad de energía puede producirse en el proceso de combustión. La Tabla 3 presenta un promedio de 17.89 MJ/kg, con las mejores comunidades siguientes: Cherán (19.0 MJ/kg), Paracho (18.9 MJ/kg), Quinceo (18.9 MJ/kg), Turícuro (18.8 MJ/kg) y Sevina (18.6 MJ/kg). Estas cifras altas de PC son muy coincidentes con las obtenidas para biomasa de *Pinus* spp. en trabajos anteriores, donde los rangos son entre 18 y 20 MJ/kg [17][18]. La obtención de poderes caloríficos altos sugiere que los residuos evaluados tienen una gran habilidad para generar energía térmica, ya que favorecen combustiones eficientes y estables en biocombustibles sólidos en ámbitos domésticos o industriales.

Tabla 3. Caracterización físicoquímica y energética

Comunidad	Contenido de humedad (%)	Poder calorífico (MJ/kg)	Celulosa (%)	Hemicelulosa (%)	Lignina (%)	Extraíbles (%)	Cenizas (%)
Angahuan	15.68	18.9	55.64	14.93	25.75	2.46	1.22
Arantepacua	6.24	17.2	52.58	14.29	27.16	2.72	3.25
Capacuaro	10.29	16.2	57.70	15.33	24.34	1.45	1.18
Cherán	15.69	19.0	51.09	13.63	26.30	7.24	1.74
Comachuen	11.78	18.7	53.04	18.59	24.96	2.20	1.21
La Mojonera	11.84	17.5	54.33	17.33	24.64	1.53	2.17
Nahuatzen	5.61	16.3	53.02	16.88	25.44	1.20	3.46
Paracho	13.85	18.9	49.50	16.51	25.76	4.99	3.24
Pichátaro	23.53	17.1	52.36	17.23	25.46	1.77	3.18
Quinceo	13.22	18.9	51.00	17.47	26.66	1.62	3.25
Sevina	13.84	18.6	50.76	13.68	28.95	5.44	1.17
Turícuro	16.61	18.8	52.27	16.73	27.38	2.45	1.17
Promedio	12.76(± 3.31)	17.89(± 0.16)	52.61(± 2.09)	15.22(± 2.13)	26.07(± 1.30)	2.84(± 2.00)	2.186(± 0.963)

La lignina es uno de los más poderosos efectores de la calidad de los biocombustibles densificados. La presencia de lignina incluye directamente valores de poder calorífico más altos y mejor capacidad de ignición, al igual que también actúa como aglutinante natural en el proceso de compactado. La caracterización muestra contenidos de lignina elevados en las comunidades como: Sevina (28.95%), Cherán (26.30%), Quinceo (26.66%), Paracho (25.76%). Los contenidos de lignina más altos al 25% aparecen en materiales con buenos desempeños energéticos y alta estabilidad estructural, lo cual está en concordancia con lo reportado en estudios previos en los cuales la lignina es reportada como una de las características para mejorar el desempeño de briquetas y pellets [19][20][21]. Esto indica que los restos de maderas comunes de estas comunidades presentan algunas características intrínsecas en las que propician el uso de biocombustibles densificados.

La celulosa y la hemicelulosa, aunque menos influyentes en la iniciación del fuego que la lignina, juegan un papel fundamental en la cantidad de energía total registrada, con valores promediados de 52.61% para celulosa y de 15.22% para hemicelulosa, los cuales corresponden a los rangos que se encuentran reportados para diferentes tipos de maderas pertenecientes a las coníferas.



Estas moléculas estructurales ceden energía en forma de gases combustibles en virtud de la descomposición producida por la descomposición térmica de la celulosa y la hemicelulosa, manteniendo la combustión y la liberación de calor a partir de la propagación de la flameante ignición, como confirman y explican autores en sus pertinentes estudios de composición dentro de la biomasa lignocelulósica [18].

Los resultados obtenidos son coherentes con los trabajos previos de *Pinus* spp., los cuales explican que los materiales que presentan humedades menores de 10%, un alto contenido de lignina (<25%) y un alto poder calorífico (~18 MJ/kg) son óptimos para la producción de biocombustibles sólidos.

Los trabajos de Carrillo-Parra [20] y Correa-Méndez [22], también demuestran la importancia de estas características en la eficiencia en la combustión, las reducciones de emisiones y la compactación de briquetas y pellets, características que no necesitan de la adición de componentes externos. Así mismo, la variabilidad entre comunidades que se ha puesto en evidencia en este trabajo hace también que esas variaciones no se deban a la coincidencia de las comunidades, como el caso de la altitud, el manejo del arbolado, la edad del árbol o las condiciones de almacenamiento y que incluso son consistentes a las reportadas en otras comunidades por autores que han evaluado biomasa forestal en ambientes montañosos del resto de América Latina, como ya fue mencionado.

En resumen, los valores obtenidos son positivos. Es evidente que los residuos maderables de las comunidades evaluadas reúnen condiciones óptimas para su aprovechamiento energético y están en condiciones para producir biocombustibles densificados, entendiendo como tales briquetas o pellets de baja humedad, alto poder calorífico y enriquecidos en lignina porque representan alternativas muy competitivas frente a otros recursos que hay en la región.

3.4 ANÁLISIS ECONÓMICO

Mediante la aplicación del análisis económico realizado en las doce comunidades que disponían de residuos maderables de *Pinus* spp. se consideraron las cantidades mensuales de residuos generados en las localidades (Tabla 2). Aplicada la ecuación de costo total (Ecuación n.º 3) estableciendo un valor unitario estimado de 0,025 USD/kg, el coste por el aprovechamiento de los residuos llegó hasta variar entre estos dos extremos: 900 USD y 14.850 USD, dependiendo de la cantidad que se tenía disponible. El coste total de las doce comunidades alcanzó un coste total proyectado de 41.700 USD. Este resultado constituye una referencia fundamental para la dimensión económica de la viabilidad del aprovechamiento de estos residuos como energía o alimentación de la industria dentro de los marcos de la bioeconomía circular comunitaria. Dichos valores se muestran en la Figura 1.

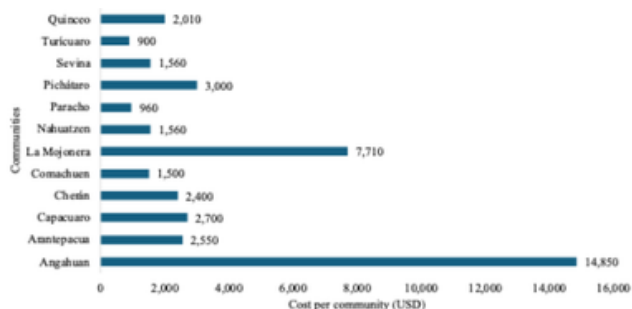


Figura 1. Proyección económica por comunidad del aprovechamiento de los residuos maderables

Los valores se hallan dentro de los rangos recogidos por la bibliografía científica internacional. Por ejemplo, un estudio desarrollado en Indonesia pone de manifiesto que el valor de los residuos de aserradero utilizados como leña fue de 0,019 USD/kg, mientras que dicho valor aumentó hasta 0,0296 USD/kg cuando fueron aprovechados para la producción de pellets -lo que significa un aumento del 56 % [23] en su valorización. Complementariamente, un análisis comparativo internacional, en el cual se incluyen países como Canadá, Brasil, Argentina y China, fijó un coste medio entre 0,018 y 0,036 USD/kg [24]. Este último dato confirma que la estimación empleada en este estudio (0,025 USD/kg) es razonable y se encuentra dentro de los parámetros de la media a escala internacional.

En el caso de América Latina, trabajos como el desarrollado en Costa Rica [25] consideran la cantidad y calidad de los residuos maderables, aunque sin la elaboración de un precio unitario.

En definitiva, los resultados van en la dirección de poder avanzar hacia evaluaciones de costo-efectividad más globales o integrales, que consideren los costes de transformación, transporte y comercialización, pero también los beneficios derivados de la sustitución de las fuentes de energía convencionales. Igualmente, confirman la conveniencia de impulsar los esquemas comunitarios de aprovechamiento energético que favorecen la autonomía energética, el desarrollo económico de proximidad y la reducción del impacto ambiental, en la línea de los principios de la economía circular y la transición energética justa.

CONCLUSIONES

La investigación muestra que resulta altamente factible técnica y económicamente la posibilidad de producir biocombustibles densificados en forma de briquetas o pellets a partir de los residuos constitutivos de los residuos de *Pinus* spp., generados en las 12 comunidades forestales caracterizadas en la Meseta Purépecha en Michoacán, México.

Así pues, el primer punto importante resulta ser el alto potencial de biomasa disponible para su aprovechamiento. Su cuantificación puso de manifiesto una destacada variabilidad, con Angahuan y La Mojonera, que generan dos de los mayores volúmenes de residuos y, como consecuencia, del mayor potencial energético estimado. Este excedente de residuo, que no tiene un aprovechamiento en la mayoría de los casos en la actualidad, constituye una materia prima local y continua que facilita el desarrollo de proyectos de bioenergía en comunidades. La caracterización fisicoquímica y energética respalda la calidad intrínseca de los residuos para su transformación.

Los promedios de poder calorífico (17.89 MJ/kg) son elevados y coinciden con los rangos de los valores reportados para *Pinus* spp., asegurando un rendimiento térmico adecuado, y el contenido de humedad promedio de 12.76% sumado con los contenidos de lignina altos (26.07%) son óptimos además; la disminución de la humedad permite compactar con poca necesidad de secados, y la lignina actúa de aglutinante natural aumentando la estabilidad del producto final (briquetas o pellets) y su calidad, prescindiendo de un aditivo sintético alguno.

El análisis de cenizas en los residuos de *Pinus* spp., de 12 comunidades presenta un promedio de 2.186 % (± 0.963), que es notablemente inferior a los límites establecidos para biocombustibles sólidos; como resultado, es posible comprobar que los residuos, tras combustión, generan un número mínimo de cenizas, evitando el hecho de tener que afrontar problemas operativos. Por tanto, estos materiales ofrecen un alto potencial para la producción de biocombustibles densificados y aseguran su calidad y eficiencia.

El análisis económico confirma que existen posibilidades de iniciar proyectos de valorización. La estimación de un costo total proyectado de 41,700 USD (dólares estadounidenses) por el volumen de residuos anuales correspondientes a las 12 comunidades, para un coste unitario razonable de 0.025 USD/kg de residuo, da un buen punto de partida para futuras evaluaciones de costes que tengan en cuenta la transformación y comercialización.

Al mismo tiempo, el contexto pone de manifiesto que la implementación de estos esquemas de aprovechamiento ayudaría en la medida de lo posible al desarrollo sostenible y a la economía circular; se ahorraría dependencia de combustibles fósiles, ayudando a reducir las emisiones de CO₂ y, con el aprovechamiento de los residuos, se generarían oportunidades de autoabastecimiento y empleos locales (por ejemplo, en las comunidades).

Estos resultados son un diagnóstico fundamental para la formulación de unas estrategias responsables que ayuden a fortalecer las prácticas productivas y ambientales en la Meseta Purépecha.

AGRADECIMIENTOS

Mario Morales Máximo agradece al CONAHCYT por la beca Posdoctoral de estancia académica por México Convocatoria 2023(1) (6175421), para llevar a cabo la investigación. Asimismo los autores expresamos nuestro agradecimiento a cada una de las comunidades que participaron y brindaron



las facilidades necesarias para el desarrollo de esta investigación. De igual manera, reconocemos el apoyo académico y logístico de las instituciones educativas involucradas, particularmente a la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo y a la Universidad Intercultural Indígena de Michoacán, cuya colaboración fue fundamental para la realización de este trabajo.

REFERENCIAS

- [1] R. B. Mangoyana, "Bioenergy for sustainable development: An African context", *Phys. Chem. Earth Parts ABC*, vol. 34, núm. 1, pp. 59–64, ene. 2009, doi: 10.1016/j.pce.2008.01.002.
- [2] E. Medina-Ríos, M. Morales-Máximo, L. B. López-Sosa, A. Aguilera-Mandujano, y J. C. Corral-Huacuz, "Life cycle analysis (LCA) of the production of wood waste briquettes from *Pinus* spp.: Case study San Francisco Pichátaro, México.", *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 912, núm. 1, p. 012011, nov. 2021, doi: 10.1088/1755-1315/912/1/012011.
- [3] M. Fontecave et al., "What energy prospects for biomass? Report by the Energy Foresight Committee of the French Academy of Sciences - January 2024", *Academie des sciences*, 23, quai de Conti, 75006 Paris (France), INIS-FR-24-0247, ene. 2024. Consultado: el 29 de noviembre de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://inis.iaea.org/records/b0rj1-s3k14>
- [4] N. Ayala-Mendivil, G. Sandoval, N. Ayala-Mendivil, y G. Sandoval, "Bioenergía a partir de residuos forestales y de madera", *Madera Bosques*, vol. 24, núm. SPE, 2018, doi: 10.21829/myb.2018.2401877.
- [5] C. R. Plascencia, K. Mora, y N. Tancredi, "Bioenergía y desarrollo sostenible: Alternativa en la producción de biocombustibles", *GEOS*, vol. 44, núm. 2, dic. 2024, Consultado: el 29 de noviembre de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://geos.cicese.mx/index.php/geos/article/view/91>
- [6] B. Hasanain, "The Role of Ergonomic and Human Factors in Sustainable Manufacturing: A Review", *Machines*, vol. 12, núm. 3, Art. núm. 3, mar. 2024, doi: 10.3390/machines12030159.
- [7] C. T. Wright, K. L. Kenny, J. R. Hess, C. T. Wright, K. L. Kenny, y J. R. Hess, *A Review on Biomass Densification Technologies for Energy Application* Jaya Shankar Tumulu. 2010.
- [8] N. Ahmed, M. K. Banjare, S. B. Singh, A. B. Khan, K. N. Sharma, y K. Behera, "Biomass Wastes for Bioenergy-Based Applications", en *Biomass Wastes for Sustainable Industrial Applications*, CRC Press, 2024.
- [9] M. Morales-Máximo y J. G. Rutiaga-Quñones, "Analysis and utilization of lignocellulosic materials for the generation of solid biofuels from the Purépecha Plateau in the state of Michoacán, Mexico", *Results Eng.*, vol. 26, p. 105230, jun. 2025, doi: 10.1016/j.rineng.2025.105230.
- [10] M. Morales-Máximo, V. M. Ruiz-García, L. B. López-Sosa, y J. G. Rutiaga-Quñones, "Exploitation of Wood Waste of *Pinus* spp for Briquette Production: A Case Study in the Community of San Francisco Pichátaro, Michoacán, Mexico", *Appl. Sci.*, vol. 10, núm. 8, Art. núm. 8, ene. 2020, doi: 10.3390/app10082933.
- [11] M. Morales-Máximo et al., "Multifactorial Assessment of the Bioenergetic Potential of Residual Biomass of *Pinus* spp. in a Rural Community: From Functional Characterization to Mapping of the Available Energy Resource", *Fire*, vol. 6, núm. 8, Art. núm. 8, ago. 2023, doi: 10.3390/fire6080317.
- [12] UNE-EN 14774-1, "Biocombustibles sólidos. Determinación del contenido de humedad.", en Parte 1: Humedad total, AENOR., Madrid, España, 2010, p. 10.
- [13] H. K.; Goering y P. J. Van Soest, *Forage fiber analyses: apparatus, reagents, procedures, and some applications*, vol. No. 379. 1970.
- [14] L. F. Pintor-Ibarra, J. J. Alvarado-Flores, J. G. Rutiaga-Quñones, J. V. Alcaraz-Vera, M. L. Ávalos-Rodríguez, y O. Moreno-Anguiano, "Chemical and Energetic Characterization of the Wood of *Prosopis laevigata*: Chemical and Thermogravimetric Methods", *Molecules*, vol. 29, núm. 11, Art. núm. 11, ene. 2024, doi: 10.3390/molecules29112587.
- [15] Ö. Kabaş, İ. Ünal, S. Sözer, K. C. Selvi, y N. Ungureanu, "Quality Assessment of Biofuel Briquettes Obtained from Greenhouse Waste Using a Mobile Prototype Briquetting Machine with PTO Drive", *Energies*, vol. 15, núm. 22, Art. núm. 22, ene. 2022, doi: 10.3390/en15228371.
- [16] M. Järvinen et al., "Bioenergy and Waste", en *Designing Renewable Energy Systems within Planetary Boundaries: A Textbook for Energy Engineers*, M. Järvinen y H. Paulomäki, Eds., Cham: Springer Nature Switzerland, 2025, pp. 461–544. doi: 10.1007/978-3-031-69856-9_6.
- [17] C. Antwi-Boasiako y B. B. Acheampong, "Strength properties and calorific values of sawdust-briquettes as wood-residue energy generation source from tropical hardwoods of different densities", *Biomass Bioenergy*, vol. 85, pp. 144–152, feb. 2016, doi: 10.1016/j.biombioe.2015.12.006.
- [18] R. Bhattacharya, S. Arora, y S. Ghosh, "Utilization of waste pine needles for the production of cellulolytic enzymes in a solid state fermentation bioreactor and high calorific value fuel pellets from fermented residue: Towards a biorefinery approach", *Renew. Energy*, vol. 195, pp. 1064–1076, ago. 2022, doi: 10.1016/j.renene.2022.06.067.
- [19] L. Burhenne, J. Messmer, T. Aicher, y M.-P. Laborie, "The effect of the biomass components lignin, cellulose and hemicellulose on TGA and fixed bed pyrolysis", *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 101, pp. 177–184, may 2013, doi: 10.1016/j.jaap.2013.01.012.
- [20] C. P. Artemio, N. H. Maginot, C.-U. Serafin, F. P. Rahim, R. Q. J. Guadalupe, y C.-M. Fermín, "Physical, mechanical and energy characterization of wood pellets obtained from three common tropical species", *PeerJ*, vol. 6, p. e5504, sep. 2018, doi: 10.7717/peerj.5504.
- [21] J. G. Rutiaga-Quñones et al., "Characterization of Mexican Waste Biomass Relative to Energy Generation", *BioResources*, vol. 15, núm. 4, pp. 8529–8553, 2020, doi: DOI:10.15376/biores.15.4.8529-8553.
- [22] F. Correa-Méndez et al., "Distribución granulométrica en subproductos de aserrío para su posible uso en pellets y briquetas", *Rev. Mex. Cienc. For.*, vol. 5, núm. 25, pp. 52–63, oct. 2014, Consultado: el 9 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S2007-11322014000500005&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- [23] Bintang Charles Hamonangan SIMANGUNSONG et al., "Economic Value of Wood Processing Mill Residues as Feedstock for Bioenergy in Indonesia", *Journal of the Japan Institute of Energy*, vol. 98, núm. 05, pp. 110–114, 2019. Consultado: el 16 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.jstage.jst.go.jp/article/jie/98/5/98_110/_article
- [24] A. Canatay, L. Prieto, y M. R. Amin, "Integrating 'Neoliberal-Turn' and 'Social-Turn' Constructs in Examining Sustainable Development and Happiness and Life Satisfaction: A Global-, Country Cluster-, and Country-Level Study", *Sustainability*, vol. 15, núm. 13, Art. núm. 13, ene. 2023, doi: 10.3390/su151310010.
- [25] J. Soto Sandoval, J. A. Aguirre, J. Méndez, y G. Pérez, "Evaluación económica y ambiental de residuos forestales en aserraderos de Costa Rica", abr. 2000, Consultado: el 16 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/6288>