CONGRESO NACIONAL DEL MEDIO AMBIENTE
2026

Valorización de residuos en el noroeste argentino: herramientas de decisión para productores forestales

Análisis integral de residuos de biomasa forestal

Edita: Fundación Conama

Año: 2026

Este documento está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional.

Personas autoras de la presente comunicación técnica

Autor Principal de la comunicación: Carolina del Rosario Subelza. Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional -INENCO-, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas -CONICET-, Universidad Nacional de Salta -UNSa-, Salta, Argentina. Mail de contacto: c.subelza.95@gmail.com

Otros Autores: Laura Ailen Mosconi. Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional-INENCO-, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas -CONICET-, Universidad Nacional de Salta -UNSa-, Salta, Argentina. Mail de contacto: lmosconi@exa.unsa.edu.ar

Silvina Magdalena Manrique. Departamento de Geología, Geografía y Medio Ambiente, Campus Científico Tecnológico, Universidad de Alcalá, ctra. Madrid-Barcelona km 33,600, código 28802, Alcalá de Henares, Madrid, España. silvina.manrique@uah.es

Índice

Resumen **4**

Introducción **4**

Metodología **7**

Estudio del recurso: formatos 7

Caracterización físico-química 7

Determinación de densidad básica y aparente 8

Determinación de Volumen, Rendimiento, Productividad y Efectividad 9

Formulación y Evaluación de Modelos Predictivos 11

Resultados **12**

Caracterización físico-química 12

Densidad básica y aparente 14

Evaluación del rendimiento en aserradero 15

Evaluación del rendimiento en carpintería 16

Modelos Predictivos (PCS) 17

Conclusiones y Propuestas de Valorización **18**

Agradecimientos **20**

Referencias **20**

Resumen

La situación energética actual demanda una necesaria conducción hacia las energías renovables y la economía circular, revalorizando residuos biomásicos que podrían ser utilizados -entre otros fines- como recursos energéticos. Entre estos residuos se encuentran los subproductos forestales generados en las industrias de transformación de la madera (despuntes, cortezas, aserrines, virutas, recortes sólidos, entre otros). En la Cuenca Forestal Caimancito (Jujuy, Argentina), la transformación primaria de la madera por parte de pequeños productores y PyMEs familiares genera un volumen sustancial de residuos leñosos. En general dichos residuos se acumulan o se queman a cielo abierto, desaprovechando un potencial energético y generando impactos ambientales en la región. Para responder a esta problemática y dotar a los pequeños productores de herramientas accesibles para la gestión eficiente de sus residuos, este estudio se propuso caracterizar la biomasa residual leñosa industrial; evaluar y comparar modelos predictivos de poder calorífico superior (PCS) determinar la capacidad bioenergética regional y proveer un marco de decisión práctico para los pequeños productores forestales. La determinación experimental mediante bomba calorimétrica reflejó un PCS promedio de 16,88 MJ/kg en base seca al aire. Mientras que los modelos basados en análisis próximo ofrecen la alternativa de menor costo operacional mediante el uso de equipos convencionales de laboratorio, el modelo basado en la composición elemental de carbono e hidrógeno presentó el mejor ajuste predictivo (R2 = 0,58). Estos modelos demuestran que es posible estimar con precisión el potencial energético de la biomasa residual industrial sin recurrir a costosos ensayos calorimétricos. La aplicación de estas herramientas predictivas otorga a los pequeños productores forestales un mecanismo práctico para planificar la valorización energética de sus subproductos, promoviendo el autoconsumo térmico, la disminución de costos operativos y la conversión de pasivos ambientales en activos socioeconómicos dentro de un esquema de economía circular.

Palabras Clave: Bioeconomía circular; Biomasa residual leñosa; Poder Calorífico Superior; Densidad básica; Cuenca Caimancito; Yungas.

Introducción

La bioeconomía como fuente de alternativas

El contexto climático global y los compromisos internacionales de descarbonización exigen una acelerada transición hacia fuentes de energía renovable y esquemas de economía circular. La biomasa lignocelulósica constituye la principal fuente bioenergética a nivel mundial, representando aproximadamente el 90% de la bioenergía consumida para la producción de calor y electricidad [1, 2]. Dado que el carbono emitido durante su combustión proviene de la fijación atmosférica mediante fotosíntesis en los ecosistemas forestales, el aprovechamiento sostenible de biocombustibles sólidos garantiza un ciclo neutro en carbono que sustituye directamente a los combustibles fósiles y mitiga las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) [3, 4]. Utilizar biomasa residual forestal,

por tanto, no solo tiene un impacto positivo a nivel climático y ambiental, sino también energético y socio-económico local, al permitir diferentes fuentes de ingreso y/o ahorro de combustibles fósiles. En las economías regionales del Norte Argentino, la cadena de transformación leñosa basada en bosques nativos registra barreras estructurales vinculadas a la obsolescencia tecnológica, la baja eficiencia de conversión y la generación masiva de residuos no contabilizados [5-7]. Durante el procesamiento primario en aserraderos y secundario en carpinterías, una gran cantidad de materia prima se convierte en subproductos leñosos (cortezas, leñas/lepas, aserrín fino y grueso, virutas y recortes sólidos), los cuales son comúnmente acumulados a intemperie como pasivos ambientales o sometidos a quemas descontroladas a cielo abierto [8, 9].

Para evaluar y revertir esta ineficiencia, el enfoque de la bioeconomía circular introduce el concepto de uso en cascada y herramientas cuantitativas de biocircularidad, destacándose el Factor de Utilización de Biomasa (BUF). El BUF cuantifica tanto la eficiencia de producción en cada etapa como la frecuencia con la que la biomasa es reutilizada a lo largo de la cadena de valor. Un valor de BUF inferior a 1,0 refleja un sistema lineal ineficiente con elevadas pérdidas materiales —situación actual de la Cuenca Forestal Caimancito, con un BUF baseline de 0,81—, mientras que un BUF superior a 1,0 (alcanzando hasta 1,52 en escenarios de valorización integral) demuestra un aprovechamiento biocircular donde cada tonelada de madera extraída genera múltiples servicios productivos y energéticos antes de su disposición final [10].

En la ecorregión de las Yungas Australes (Cuenca Caimancito, Jujuy), donde conviven más de 30 micro-aserraderos y carpinterías artesanales con 32 comunidades originarias (Guaraní, Kolla y Ocloya) bajo altos índices de Necesidades Básicas Insatisfechas (NBI), la bioeconomía circular forestal posee una relevancia estratégica fundamental [7]. La reconversión de los residuos industriales en vectores bioenergéticos locales permitiría sustituir derivados del petróleo, abastecer calderas de secado térmico para agregar valor a la madera nativa y erradicar los focos de contaminación por quema de biomasa, articulando la eficiencia industrial con la equidad social y la preservación de las Yungas.

Cadena de valor y cuenca forestal de interés

La Cuenca Forestal Caimancito (CFC) constituye el principal polo maderero de bosques nativos en la provincia de Jujuy, Argentina, abarcando una superficie territorial superior a las 740.000 hectáreas (14,5% de la superficie provincial) distribuida entre los departamentos de Ledesma y Santa Bárbara [7, 8]. Desde el punto de vista biogeográfico, más del 60% de la cuenca pertenece a la ecorregión de las Yungas Australes (Selva Subtropical de Montaña y Selva Pedemontana), caracterizada por una elevada biodiversidad arbórea, interactuando en su franja oriental con el Chaco Seco [7, 11].

La cuenca es el epicentro de mayor demanda de madera nativa de Jujuy, procesando más del 70% del volumen total industrializado en la provincia [7]. La actividad económica y forestal se articula a lo largo de una cadena de valor integrada por tres eslabones fundamentales [8, 10] (Figura 1):

- **Eslabón de Extracción y Aprovechamiento Forestal (En Monte):** Se realiza mediante la selección de fustes arbóreos que cumplen con el diámetro mínimo de corta (DMC) establecido por la normativa ambiental provincial (Resolución 081/2009) [7]. Las principales

especies aprovechadas son Cebil Colorado (Anadenanthera colubrina), Quina (*Myroxylon peruiferum*), Cedro (*Cedrela balansae*), Lapacho (*Handroanthus impetiginosus*), Urundel (*Astronium urundeuva*) y Tipa (*Tipuana tipu*) [7, 8]. Este eslabón registra un nivel de informalidad operacional que supera el 90%, con técnicas de apeo y tronzado que generan volúmenes considerables de biomasa residual en el campo (ramas, copas y fustes defectuosos) [6, 8].

- **Eslabón Industrial Primario (Aserraderos):** Representado por aproximadamente 10 establecimientos industriales localizados en el polo Caimancito, donde más del 90% corresponde a micro-industrias (capacidad de procesamiento ≤940 m³/año) [7,8]. La tecnología empleada es predominantemente obsoleta, articulada por una sierra sin fin principal con carro (40 HP) para el despiece del rollo y una sierra sin fin secundaria (20 HP) para el reaserrado de tablas y listones [8]. En esta etapa se generan como residuos primarios: cortezas, lepas/leñas, aserrín fino, aserrín grueso y recortes sólidos [8] (Figura 2).
- **Eslabón Industrial Secundario (Carpinterías y Remanufactura):** Comprende alrededor de 60 sitios entre talleres artesanales y carpinterías que transforman la madera aserrada primaria (tablas y varillas de Cedro, Quina y Cebil) en productos de mayor valor agregado como sillas, camas, aberturas y palos de escoba destinados a ferias regionales [8]. Equipadas con maquinarias tradicionales (garlopa, cepilladora, tupí y sierra sin fin), estas producen volúmenes masivos de aserrines, virutas acumuladas y polvos leñosos que se constituyen en serios pasivos ambientales [8, 10], Figura 2.

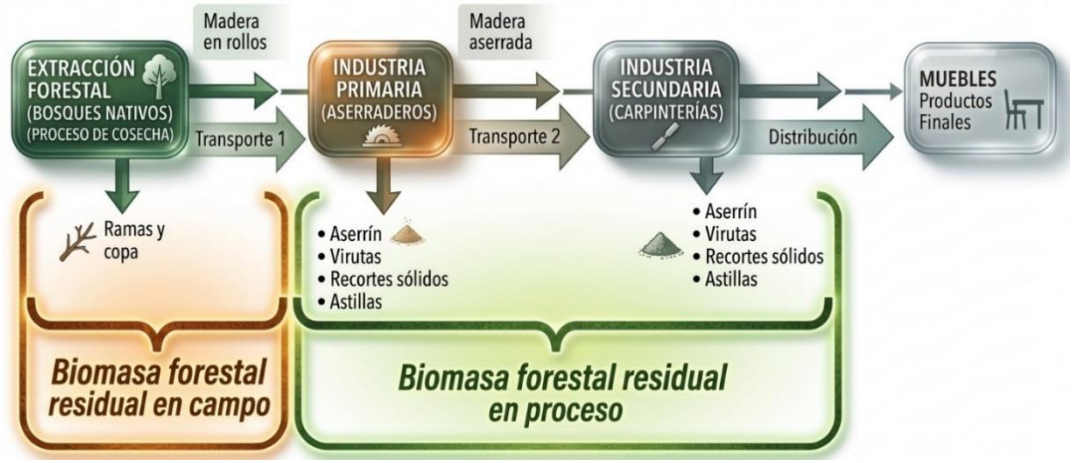


Figura 1. Esquema de la cadena forestal estudiada



(a)



(b)

Figura 2. Tipos de biomasa residual generada en la transformación primaria y secundaria. (a) Pila de leñas. (b) Pila de aserrín

El presente manuscrito plantea una estrategia integral que vincula la optimización de los procesos industriales madereros con la valorización energética de los residuos leñosos en la Cuenca Forestal Caimancito (Provincia de Jujuy, Argentina). Para superar las barreras estructurales y económicas que afectan a los pequeños productores —quienes carecen de equipamiento calorimétrico sofisticado para determinar la densidad energética de sus biocombustibles—, se investiga la aplicación de modelos matemáticos predictivos del Poder Calorífico Superior (PCS) basados en parámetros de análisis proximal (fácilmente medibles mediante ensayos convencionales de laboratorio) y análisis elemental.

Los objetivos de este trabajo (que forma parte de un proyecto más amplio sobre gestión de bosques y bioeconomía forestal) son caracterizar cuantitativamente los flujos de biomasa residual en la Cuenca Caimancito, evaluar la eficiencia de conversión industrial, formular y comparar modelos predictivos del Poder Calorífico Superior (PCS) basados en análisis proximal y elemental, y brindar un marco de decisión práctico para la valorización bioenergética de residuos en pequeños productores rurales.

Metodología

Estudio del recurso: formatos

En cuanto al recurso biomásico a lo largo de la cadena de valor, se efectuaron entrevistas y recorridos en las industrias de transformación. Se llevó a cabo un muestreo general de los sitios de generación identificando y clasificando diferentes tipos de formatos de biomasa residual más comunes que pueden verse en el cuadro 1.

Cuadro 1. Formatos de biomasa residual en las industrias de transformación
Fuente. [8, 12]

Formato	Abreviatura	Proceso/maquinaria de generación	Tamaño (mm)
Aserrín fino	AF	Aserrado primario, cepillado	0.47
Aserrín grueso	AS	Aserrado primario, cepillado	0.60
Recortes sólidos	RS	Aserrado primario	50-150
Viruta	VR	Garlopa, tupi	1-30
Astillas	AS	Lijado, cepillado	5-100

Caracterización físico-química

Para el uso de los residuos forestales como posibles portadores energéticos es preciso determinar sus características físico-químicas con el fin de determinar su comportamiento frente a tratamientos de conversión energética o anticipar su desempeño en determinadas instalaciones. En este sentido, los análisis que se llevaron a cabo fueron: análisis proximal; análisis elemental y poder calorífico. Las determinaciones analíticas de laboratorio se realizaron bajo normativas internacionales UNE-EN ISO:

- **Humedad (Mad) Humedad de la porción de ensayo según se analiza:** Secado en estufa a 105 °C hasta masa constante (UNE-EN ISO 18134-3).
- **Cenizas (A):** Calcinación en mufla a 550 °C (UNE-EN ISO 18122).
- **Materia Volátil (V):** Pirólisis controlada a 900 °C durante 7 minutos sin aire (UNE-EN ISO 18123).
- **Carbono Fijo (CF):** Calculado por diferencia en base seca: CF (%) = 100 - (A + V).
- **Poder Calorífico Superior (PCS / HHV):** Determinado experimentalmente mediante bomba calorimétrica de oxígeno Parr Model 1341 (UNE-EN ISO 18125).
- **Análisis Elemental (C, H, N, S, O):** Determinado mediante analizador CHNS/O 2400 Series II en muestras de aserrín y completado con observaciones de literatura armonizadas en base seca.

Determinación de densidad básica y aparente

Densidad Básica de especies forestales

Su estimación resulta importante con el fin de aportar hacia el estudio futuro de la biomasa del árbol en pie o como aporte a la confección de futuras ecuaciones alométricas [13].La densidad básica es la relación entre la masa anhidra Po (seca en estufa a 105ºC) y su volumen verde o saturado (Vv) y se calcula como Db = Po / Vv (g/cm3), [14,15].

Para su cálculo se aplicó el método de desplazamiento de agua para tres especies forestales de importancia en la cuenca forestal: Quina *(Calycophyllum multiflorum)*, Cedro *(Cedrela balansae)* y Peteribi *(Cordia trichotoma)*. Las probetas de madera provenientes de trozas del fuste y ramas del árbol se secaron en estufa por 24hs hasta alcanzar su peso constante y se realizó su pesaje (peso anhidro). Posteriormente, se sumergieron en un recipiente con agua hasta su saturación (peso constante) por 5 días. Luego de ese periodo de tiempo, en un vaso de precipitado graduado con agua se introdujo cada muestra de madera sin que tocara las paredes ni el fondo del recipiente. De este modo se obtuvo el volumen del agua desplazada (misma que corresponde al volumen de la muestra Vv), considerando la densidad del agua como la unidad.

Densidad aparente de biomasa residual forestal

Esta propiedad física fue calculada para los formatos de biomasas residuales generados en las industrias de primera y segunda transformación. En el caso de las partículas de menor tamaño como los aserrines y virutas, se determinó la densidad a granel de las mismas, cálculo que se realizó sobre las pilas de viruta y aserrines anteriormente medidas, según norma UNE-EN 17.828 [16] (Figura 3). Se efectuaron ensayos por duplicado. La fórmula para la determinación de densidad a granel según se recibe corresponde a la ecuación 1 a continuación:

$$BD_{ar} = \frac{(m_2 - m_1)}{V} \qquad \text{Ec. 1}$$

BD_{ar}= densidad a granel según se recibe en kg/m^3
m1= Masa del recipiente vacío en kg

m2= Masa del recipiente con muestra en kg
V= Volumen del recipiente de medida en m^3



Figura 3. Estimación de densidad básica en virutas a través de norma UNE-EN 17.828
Fuente. Propia

Por otro lado, en el caso de los recortes sólidos, la determinación de la densidad aparente de los mismos fue calculada a través de la fórmula de densidad, como Dap = Peso / Volumen (g/cm3). La estimación de estos se efectuó sobre pilas de leñas pequeñas de las cuales se realizó el pesaje de un grupo de ellas y su respectiva estimación de volumen. De esta manera se obtuvo el valor de densidad aparente.

Determinación de Volumen, Rendimiento, Productividad y Efectividad

El conocimiento de los indicadores de rendimiento facilita la evaluación del desempeño del proceso y la toma de decisiones, anticipándose a situaciones adversas, reduciendo gastos y pérdidas en el proceso productivo. Un aserradero eficiente es aquel donde, entre otras cosas, los cortes se realizan de tal forma que, a partir de la troza, se obtenga una mayor cantidad y calidad de madera aserrada [17]. Para cuantificar la relación entre materia prima y residuo, se seleccionaron dos unidades de estudio representativas en la Cuenca Caimancito en cuanto a escala de producción y técnicas de trabajo, figura:

• **Caso 1 (Procesamiento Primario):** Un aserradero típico de procesamiento primario dedicado al aserrado, recanteado y despuntado de rolos de Cebil Colorado para la producción de tablas comerciales de 1 pulgada (2,54 cm) de espesor y listones para palos de escoba (Figura 4).

• **Caso 2 (Procesamiento Secundario):** Una carpintería representativa de procesamiento secundario orientada a la fabricación en serie de piezas para sillas, utilizando maderas estacionadas de Cedro y Quina.



(a) (b)

Figura 4. Estudio de rendimiento: a) aserrado primario de rollo de madera; b) pesaje de piezas para sillas en la transformación secundaria.
Fuente. Propia

En cuanto el caso 1, para la cubicación de la madera rolliza que ingresa al aserradero, se midió el diámetro menor (d1), diámetro mayor (d2) y la longitud (L) de cada troza, aplicando la fórmula volumétrica de Smalian, ecuación 2:

$$Volumen\ rollo\ (\ m^3) = \frac{\pi}{4} * [\frac{(d1+d2)}{2}]^2 * L \qquad \text{Ec. 2}$$

Donde d_1 y d_2 corresponden a los diámetros cruzados inferior y superior en metros, y L es la longitud del rollo. El peso del rollo se estimó mediante la densidad verde de la especie (D_verde Cebil Colorado = 1200 kg/m³ según INTI-CITEMA [12].

Los indicadores de desempeño del proceso industrial se determinaron mediante las siguientes relaciones:

1. **Rendimiento de Aserrío (%):** Relación porcentual entre el volumen total de productos aserrados resultantes (tablas primarias, secundarias y listones) y el volumen de madera rolliza ingresado. Se comparó la cubicación teórica de Smalian, ecuación 3, frente a la regla comercial aplicada en Jujuy (medición de diámetro únicamente en la punta fina).

$$Rendimiento\ total\ (\%) = \frac{m^3\ madera\ aserrada}{m^3 madera\ rolliza} * 100 \qquad \text{Ec. 3}$$

2. Productividad (P): Volumen de madera aserrada producida por unidad de tiempo mensual: P (m³/mes) = VM × T × D. Donde VM es el volumen producido por hora (m³/h), T es la duración del turno (8 hs/día) y D los días laborales al mes [18].

3. Efectividad / Eficiencia (E): Relación entre el volumen de trozas procesadas por jornada y el número de operarios involucrados: E (m³/operario/día) = VT / O, [18].

4. Rendimiento en Carpintería (%): En carpintería, se midió el pesaje individual de las piezas terminadas de la silla y, conociendo la densidad anhidra del INTI-CITEMA, se obtuvo el volumen neto por pieza para relacionarlo con el volumen bruto de las tablas y varillas de materia prima.

Formulación y Evaluación de Modelos Predictivos

Con el propósito de proveer a las PyMEs forestales de herramientas de estimación rápida sin requerir ensayos calorimétricos costosos, se formularon modelos de regresión lineal múltiple clasificados como:

- **Modelo Proximal Base (Modelo A):** Considera variables categóricas según el formato del residuo (AF: aserrín fino Ø=0.47mm; AG: aserrín grueso Ø=0.60mm; RS: residuos sólidos Ø=10cm) y el contenido de Carbono Fijo (CF) del análisis proximal.
- **Modelo Proximal Ampliado (Modelo B):** Incorpora el término de interacción (CF × V) para evaluar el efecto combinado de las fracciones fija y volátil.
- **Modelo Elemental (Modelo C):** Basado en el análisis elemental de Carbono (C) e Hidrógeno (H) en base seca.

El detalle de los modelos planteados se desarrolla a continuación.

- **Modelo A**

Se comenzó planteando el modelo más simple con base en los formatos de biomasa estudiados y la fracción de carbono fijo que tiene una relación directa con el poder calorífico superior [19]:

$$PCS = \beta_0 + \beta_1 AF + \beta_2 AG + \beta_3 RS + \beta_4 CF \quad \text{Ec. 4}$$

Donde:

- PCS_{bs}: poder calorífico superior en base seca (J/g)
- AF, AG, RS: variables categóricas asociadas al tipo de residuo siendo AF= aserrín fino (diámetro promedio 0,47 mm), AG= aserrín grueso (promedio 0,60 mm); RS= residuos sólidos (promedio 10 cm diámetro).
- CF: carbono fijo (%)

El carbono fijo constituye uno de los indicadores más utilizados para describir el comportamiento energético de combustibles sólidos, debido a su asociación con la fracción carbonosa remanente tras la volatilización y su relación con el contenido energético de la biomasa. Es una variable estándar en la literatura de análisis proximal. Además, emplear estos datos tiene otras ventajas:

- Es fácil de medir.
- Tiene significado físico.
- Es ampliamente utilizada.

- **Modelo B**

A continuación, se propuso:

$$PCS = \beta_0 + \beta_1 AF + \beta_2 AG + \beta_3 RS + \beta_4 (CF \times V) \quad \text{Ec.5}$$

Aunque el carbono fijo representa una medida directa del residuo carbonoso, el PCS también depende de la distribución relativa entre carbono fijo y materia volátil (V) [17]. Por ello se evaluó un término de interacción derivado del producto CF×V para explorar si la combinación de ambas fracciones permitía capturar una proporción adicional de la variabilidad observada.

- **Modelo C**

El modelo planteado fue:

$$PCS = \beta_0 + \beta_1 . C + \beta_2 . H \qquad \text{Ec. 6}$$

Donde:

- PCS_{bs}: poder calorífico superior en base seca (J/g)
- H: Porcentaje de Hidrógeno elemental en base seca (%)
- C: Porcentaje de Carbono elemental en base seca (%)

Debido al reducido número de muestras experimentales disponibles para análisis elemental, se amplió la base de datos incorporando diez observaciones adicionales procedentes de literatura especializada correspondientes a biomasas lignocelulósicas comparables [20], obteniéndose un conjunto final de 17 observaciones. Se evaluaron diferentes combinaciones de variables elementales con el objetivo de identificar la formulación más robusta para la estimación del PCS.

Resultados

Caracterización físico-química

A partir de los analisis efectuados en los disitintos formatos de biomasa, los valores promedios del analisis proximal según se recibe (Mad (%), Cenizas (%), Volatiles (%) y carbono fijo (%)) se

observan en la Figura 5. Asimismo se visualiza mediante un rombo rojo los valores promedio de PCS (J/g) en base seca de los formatos de biomasa estudiados.

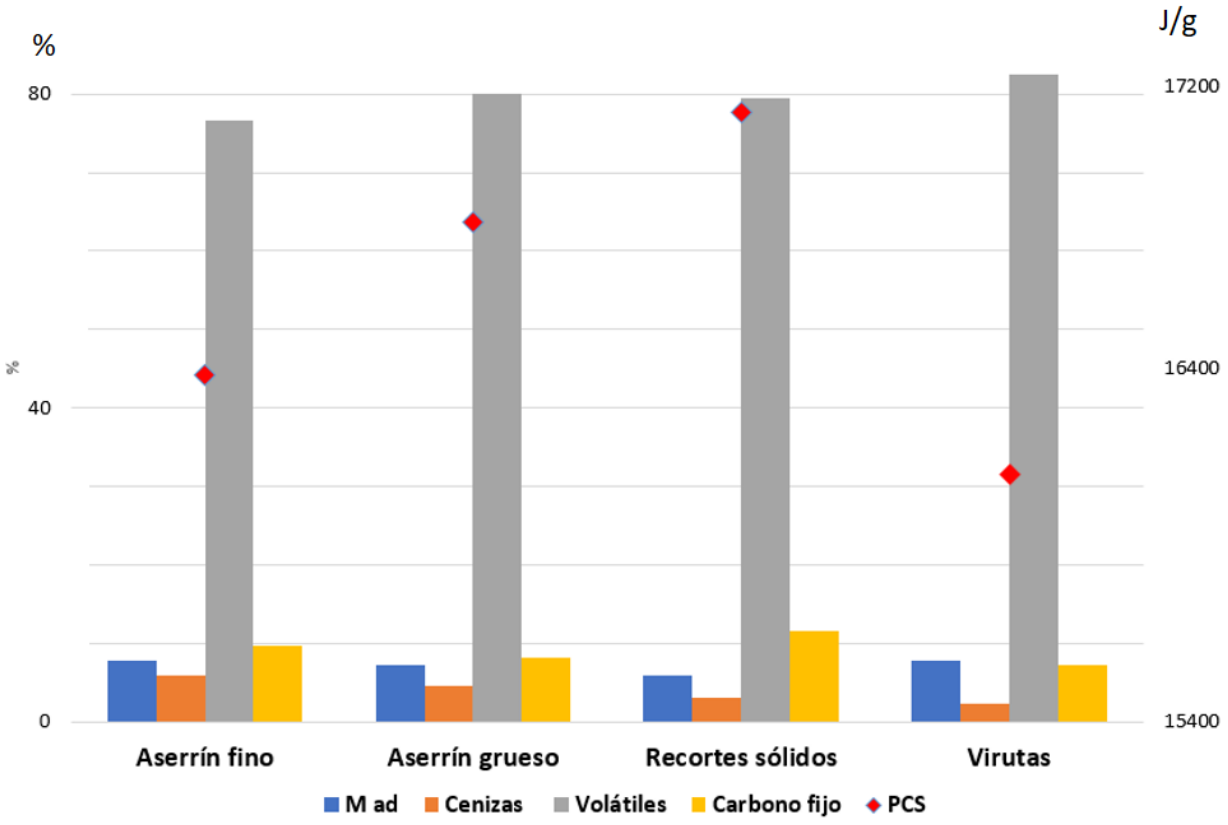


Figura 5. Análisis proximal según se recibe y contenido energético de los formatos de biomasa residual estudiados
Fuente. Elaboración propia

El conjunto de muestras de aserrín son los que mayor contenido de humedad presentaron, muy similares a los de la viruta. Al ser partículas de menor tamaño tienden a tomar mayor humedad del ambiente a diferencia de cuerpos de mayor dimensión, como los recortes sólidos. Estos presentaron mayor contenido energético al ser más densos en referencia a las partículas de menor tamaño como los aserrines y virutas, los cuales, se caracterizan por ser dispersos y menos densos, y tienden a poseer menor poder calorífico superior.

El análisis proximal o inmediato resulta importante para el estudio del fenómeno de la combustión de biomasa. Por ejemplo, el contenido de cenizas en biomasas puede causar problemas en la ignición y combustión. Cuando el punto de fusión de las cenizas disueltas es bajo causa problemas de incrustaciones y escoria. Mientras que una alta volatilidad de la biomasa ofrece muchas ventajas como materia prima para la combustión. El carbono fijo y la materia volátil aumentan el poder calorífico de cualquier combustible de biomasa [19].

Densidad básica y aparente

Los datos de densidad básica de las especies de mayor importancia forestal de la región, se muestran en la Figura 6. Allí se contrastan con los datos publicados por el INTI-CITEMA [21]. Cabe destacar que los valores obtenidos experimentalmente presentaron valores en promedio un 26% mayores a los reportados en la bibliografía para las especies analizadas en kg/m^3. Esta diferencia puede atribuirse a errores propios de la metodología aplicada o a la falta de uniformidad en la toma de muestras de las probetas del fuste y ramas de los arboles apeados.

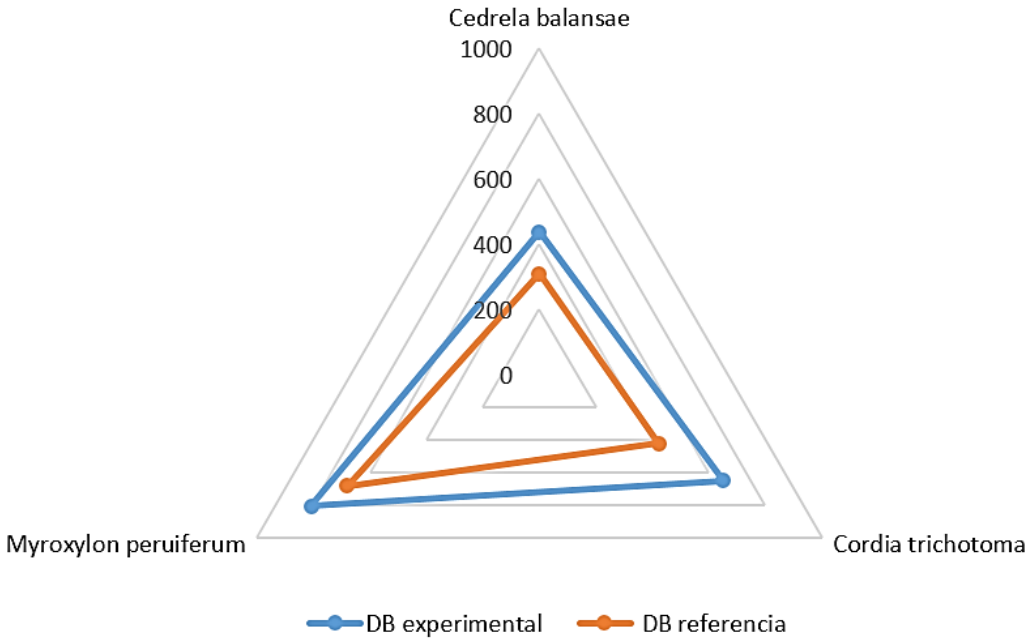


Figura 6. Comparación entre densidad básica experimental (azul), y densidad básica de referencia [21]
Fuente. Elaboración propia

Por otro lado, en relación con los ensayos de densidad aparente realizados sobre los distintos formatos de biomasa residual (Figura 7), los valores obtenidos experimentalmente se compararon con los datos de referencia establecidos en la norma UNE-EN ISO 17225 [12] y con información proveniente de una base de datos de materiales de una empresa (Big Bag Perú) [22], dedicada a la fabricación de bolsas para embalaje.

Los resultados muestran diferencias entre los valores experimentales y los bibliográficos para los formatos de virutas y recortes sólidos. En cambio, para el aserrín se observa una mayor correspondencia entre los valores determinados experimentalmente y los reportados en las referencias consultadas.

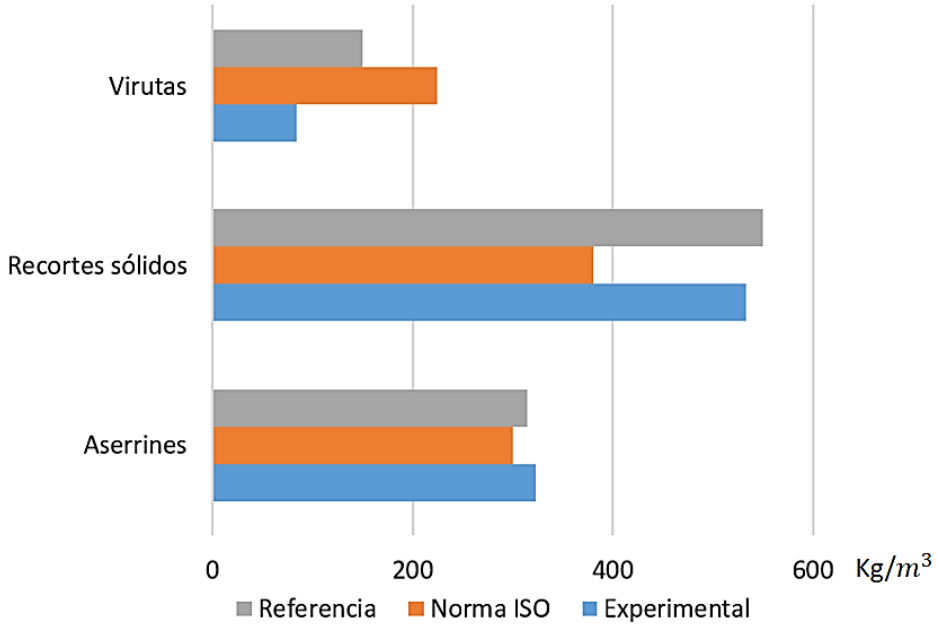


Figura 7. Densidad aparente (Dap) de los formatos de biomasa estudiados y su contraste con las referencias (Norma UNE-EN ISO 17225 y empresa Big Bag)
Fuente. Elaboración propia

Evaluación del rendimiento en aserradero

El relevamiento en el aserradero seleccionado se realizó durante una jornada operativa de procesamiento de troncos de Cebil Colorado (*Anadenanthera colubrina*). El equipo de trabajo estuvo integrado por 6 operarios distribuidos estratégicamente: 4 operarios en la sierra sin fin principal de carro (40 HP) y 2 operarios en la segunda sierra sin fin pequeña (20,12 HP / 15 kW) encargados del emprolijado, despunte y confección de varillas.

La cubicación detallada de los 5 rollos procesados arrojó un volumen promedio de 0,589 m³ por troza, Cuadro2.

Cuadro 2. Datos dimensionales de trozas, volumen y peso verde
Fuente. Elaboración propia

Troza N°	Largo (m)	D1 prom (m)	D2 prom (m)	Volumen Smalian (m³)	Peso Verde (kg)
1	3,70	0,418	0,590	0,759	910,86
2	3,10	0,445	0,580	0,651	780,71
3	3,13	0,460	0,455	0,515	617,46
4	4,12	0,405	0,345	0,458	549,54
5	3,98	0,455	0,390	0,561	673,55

En el primer aserrado (sierra principal de carro), la metodología de corte consistió en ejecutar 3 cortes longitudinales al rollo, realizar una rotación a 90° y repetir el esquema hasta abarcar los

cantos y obtener el tablón central de 6 cm de espesor (las tablas intermedias se cortaron a 1 pulgada). El relevamiento de tiempos arrojó un promedio de 16,25 cortes, 11,75 tablas primarias obtenidas, 4,5 lepas/cortezas descartadas y un tiempo de aserrado de 31,5 minutos por tronco, Cuadro3.

Cuadro3. Resumen de Rendimiento, Productividad y Efectividad en Aserrado Primario
Fuente. Elaboración propia

Parámetro Evaluado	Valor Obtenido	Base de Cálculo / Observaciones
Rendimiento Teórico	55,58%	Cubicación Smalian (diámetro mayor y menor)
Rendimiento Comercial	69,38%	Cubicación Jujuy (diámetro punta fina)
Productividad Mensual	98.954 m³/mes	Procesamiento diario en turno de 8 hs
Efectividad Laboral	1,495 m³/op/día	8,97 m³ procesados por día entre 6 operarios

El rendimiento real obtenido aplicando la fórmula de Smalian fue del 55,58%. Si se aplica el criterio comercial provincial de Jujuy (que cubica únicamente sobre el diámetro de la punta fina), el valor aparente asciende a 69,38%, sobreestimando la eficiencia del proceso. Frente al valor de referencia del Censo de Aserraderos de Jujuy [9] (49%), el establecimiento evaluado demuestra una buena recuperación de madera aserrada debido al aprovechamiento secundario de listones para palos de escoba.

Evaluación del rendimiento en carpintería

En el taller de carpintería, el estudio se enfocó en la fabricación en serie de piezas para sillas confeccionadas con maderas de Cedro y Quina. Se realizaron pesajes de precisión y mediciones volumétricas sobre las materias primas (tablas y varillas) y las piezas terminadas antes del ensamblaje, Cuadro 4.

Cuadro 4. Rendimiento Volumétrico de Piezas por Tabla/Varilla de Materia Prima
Fuente. Elaboración propia

Materia Prima	Dimensiones L×A×ALT (m)	Vol. Inicial (m³)	Producto	Especie	Rendimiento (%)
Tabla 1	2,00 × 0,115 × 0,0350	0,0081	14 listones espalda	Cedro	17,18%
Tabla 2	0,68 × 0,110 × 0,0600	0,0045	2 patas delanteras	Quina	72,65%
Varilla	1,02 × 0,055 × 0,0500	0,0028	6 listones respaldo	Cedro	21,13%
Tabla 3	0,47 × 0,160 × 0,0254	0,0019	1 pieza de asiento	Cedro/Quina	60,80%

El rendimiento promedio global estimado para el procesamiento en carpintería fue del 42,94%, lo que implica que más del 57% de la madera ingresada se convierte en residuo (virutas, retazos y

aserrín de lijado/cepillado). Se identificó además un pasivo ambiental crítico: una montaña de viruta acumulada al aire libre desde hacía 6 meses, cuyo volumen se estimó en 120,78 m³. Con una densidad aparente de 84,12 kg/m³, este único depósito representa 10.160,43 kg de biomasa seca desaprovechada.

Modelos Predictivos (PCS)

El ensayo experimental de referencia en bomba calorimétrica determinó un Poder Calorífico Superior (PCS) promedio de 16,88 MJ/kg (16.880 J/g) en base seca al aire para las biomasas forestales de la cuenca. Los modelos de regresión lineal múltiple desarrollados para la predicción del PCS se detallan a continuación:

a) Modelo A

Ecuación desarrollada sobre 33 observaciones experimentales:

$$PCS\ (J/g) = 19547{,}02 + 1999{,}07 \cdot AF + 1813{,}30 \cdot AG + 1211{,}14 \cdot RS - 101{,}73 \cdot CF \quad \text{Ec. 7}$$

Variables: AF (Aserrín fino, Ø=0,47mm), AG (Aserrín grueso, Ø=0,60mm), RS (Residuos sólidos, Ø=1,4cm), CF (Carbono Fijo en %).

El signo negativo asociado al coeficiente de Carbono Fijo (-101,73) dentro de las categorías de residuo refleja un efecto parcial condicionado por el formato y empaquetamiento de las partículas, actuando como un corrector de densidad dentro de la regresión.

b) Modelo B

Ecuación formulada para evaluar la interacción entre carbono fijo y materia volátil:

$$PCS\ (J/g) = 20103{,}97 + 1994{,}61 \cdot AF + 1816{,}10 \cdot AG + 1228{,}91 \cdot RS - 1{,}635 \cdot (CF \cdot V) \quad \text{Ec. 8}$$

La comparación rigurosa entre ambos modelos proximales demuestra que la inclusión del término CF × V genera una mejora marginal imperceptible en el ajuste ($\Delta R^2adj = +0{,}0001$; $\Delta RMSE < 1$ J/g). Atendiendo al principio de parsimonia científica y mayor interpretabilidad fisicoquímica, se selecciona el Modelo A (Carbono Fijo directo) como la formulación proximal definitiva.

c) Modelo C

Modelo formulado integrando determinaciones de laboratorio y base de datos armonizada (n = 17):

$$PCS\ (MJ/kg) = 16{,}72 + 0{,}253 \cdot C - 1{,}825 \cdot H \quad \text{Ec. 9}$$

Variables:

C (% Carbono elemental en base seca),

H (% Hidrógeno elemental en base seca).

El análisis elemental demuestra una capacidad explicativa superior al análisis proximal (R^2adj = 0,520 frente a 0,436). El coeficiente de Carbono es altamente significativo y positivo (+0,2526 MJ/kg por unidad de C), respaldando los fundamentos termodinámicos de la combustión. El signo negativo

del Hidrógeno refleja interrelaciones estequiométricas con la fracción de Oxígeno no medida en el sistema.

En conjunto, los resultados muestran que el modelo elemental basado únicamente en carbono e hidrógeno proporciona una descripción estadísticamente significativa del PCS y explica una proporción considerable de su variabilidad, Cuadro 5. La mejora observada respecto a los modelos desarrollados a partir del análisis proximal sugiere que la composición elemental captura de manera más directa los mecanismos fisicoquímicos responsables del contenido energético de la biomasa.

Cuadro 5. Comparativo de los Modelos Predictivos Evaluados y sus estadísticas
Fuente. Elaboración propia

Modelo Evaluado	Variables	R^2	R^2 ajustado	RMSE	Significación (p)
Modelo A (Proximal Base)	Formatos + CF	0,5163	0,4358	755,25 J/g	< 0,001
Modelo B (Proximal CF×V)	Formatos + CF×V	0,5073	0,4369	754,48 J/g	< 0,001
Modelo C (Elemental Final)	C % + H %	0,5797	0,5196	0,721 MJ/kg	0,0023

El modelo obtenido con datos del análisis elemental representa una herramienta predictiva, simple, y fundamentada químicamente para la estimación del PCS a partir de un número reducido de variables.

Conclusiones y Propuestas de Valorización

El modelo final desarrollado con la integración de cada una de las herramientas, facilitará la reconversión de subproductos en vectores energéticos limpios, alineando la producción regional con los principios bioeconómicos de sustentabilidad e innovación tecnológica y promoviendo la gestión forestal de la Cuenca Caimancito. Se resume una aproximación conceptual del proceso. (Figura 8).



Figura 8. Gestión sustentable del recurso biomásico a lo largo de la cadena forestal
Fuente. Elaboración propia

Se destacan a continuación los principales aportes y conclusiones logrados para la valorización bioenergética de la biomasa residual en la cadena de valor forestal estudiada:

- **Sobre la caracterización físico-química:** La determinación sistemática de los parámetros de análisis proximal (humedad, cenizas, materia volátil y carbono fijo) y análisis elemental (C, H) constituye una contribución científico-técnica inédita para la Cuenca Caimancito. Este cuerpo de datos establece la línea base de calidad de los biocombustibles sólidos locales, permitiendo anticipar su comportamiento en procesos de combustión o gasificación, optimizar el diseño de cámaras de combustión y evitar problemas operativos (como incrustaciones y corrosión por cenizas). Asimismo, evidencia que la biomasa leñosa local posee una densidad energética media de 16,88 MJ/kg (base seca), altamente competitiva para usos térmicos industriales.
- **Sobre densidades (básica y aparente):** El estudio experimental de la densidad básica (Db) en especies nativas clave (Quina, Cedro, Peteribí/Afata) provee insumos esenciales para perfeccionar las ecuaciones alométricas regionales y precisar los inventarios de biomasa en pie. Complementariamente, la caracterización de la densidad aparente y a granel (BDar) por formato residual resuelve un vacío crítico en la gestión logística. Permite a los productores e industrias convertir estimaciones volumétricas brutas (m^3 de pilas o montañas de residuos) en masa efectiva de materia seca (toneladas) y densidad energética comercial (MWh/m^3 según UNE-EN ISO 17225). Esta herramienta es indispensable para calcular costos de transporte, requerimientos de almacenamiento y dimensionamiento de calderas.
- **Herramientas predictivas accesibles**: Los modelos proximales (Modelo A) permiten estimar el potencial calórico de residuos con equipos básicos de laboratorio (mufla y estufa) con una precisión aceptable (R^2adj = 0,436). Para aplicaciones que requieran mayor exactitud, el Modelo C basado en C e H (modelo elemental) proporciona la mejor capacidad

explicativa (R^2adj = 0,520). Estas herramientas servirán de apoyo a los productores forestales y propietarios de industrias que pretendan ahondar en el estudio de los residuos madereros que genera su actividad, sin incurrir en los elevados costos de los ensayos calorimétricos de laboratorio y promoviendo una gestión eficiente del recurso.

- **Diagnóstico de rendimiento en industrias de procesamiento**: Se han realizado aportes importantes que deben seguir siendo investigados en la Cuenca Caimancito. El aprovechamiento primario en aserraderos alcanza un rendimiento real de 56%, mientras que en carpinterías secundarias desciende al 43%. Esto implica que aproximadamente el 50% de la biomasa extraída del bosque nativo se convierte en residuos dentro del polo maderero. Este nuevo aporte podría ser fundamental para ajustar los valores utilizados actualmente por organismos y de esta manera estimar el volumen de residuos generados en las industrias de procesamiento y proponer una adecuada gestión de los mismos.
- **Promoción del autoconsumo térmico y biocircularidad local**: **Se recomienda la implementación de calderas de biomasa para el secado asistido de madera en los propios establecimientos. Esta estrategia permite sustituir combustibles fósiles importados, agregar valor a la madera nativa, erradicar los pasivos de viruta (superiores a 10 toneladas por taller) y elevar el Factor de Utilización**.

Agradecimientos

Este trabajo se realizó con financiamiento del Proyecto Unidades Ejecutoras INENCO-CONICET titulado: “Innovaciones Tecnológicas en Energía y Ambiente en Concordancia con los Objetivos de Desarrollo Sostenible y la Agenda 2030”. Código Proyecto 229 201801 00032 CO, línea de Bioeconomía Forestal. Asimismo, se agradece a la Red Iberoamericana de Tecnologías de Biomasa y Bioenergía Rural (ReBiBiR-T)- CYTED, por el apoyo financiero para la estancia de movilidad realizada en el marco de este proyecto en el grupo NEST de la UNIFEI (Itajubá, Brasil).

Un agradecimiento especial a la Municipalidad de Caimancito (Jujuy, Argentina), que brindó el apoyo logístico para el desarrollo de los estudios actuales en el marco del Convenio de Colaboración Mutua N° PR5142/2021. Se agradece de manera particular a los productores locales, quienes gentilmente han facilitado el acceso a sus fincas para la recopilación de datos y muestras, y en general a toda la comunidad de Caimancito.

Referencias

[1] WBA (World Bioenergy Association). (2019). *Global Bioenergy Statistics* 2019. Stockholm, Sweden.

[2] IEA (International Energy Agency). (2020). *World Energy Outlook 2020*. IEA, Paris.

[3] Manrique, S. M., Mosconi, L., Subelza, C., & Honorato, M. (2023). Biocombustibles sólidos. En: Usos y Aplicaciones Energéticas de la Biomasa: Hacia una bioeconomía circular (pp. 57-89). ReBiBiR-T, CYTED Ediciones. Madrid, España.

[4] Manrique, S. M. (2022). Actualidad, perspectivas y reflexiones en el uso de la biomasa con fines energéticos. *Ciencia e Investigación*, 72(2), 35-54.

[5] FAO. (2020). *Actualización del Balance de Biomasa con Fines Energéticos en la Argentina.* Documento Técnico N° 19. Buenos Aires, Argentina.

[6] MEN (Ministerio de Economía de la Nación Argentina). (2023). *La Foresto-Industria en Argentina: Oportunidades, Desafíos y Líneas de Acción*. Buenos Aires.

[7] SAyDS (Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable). (2019). *Plan Estratégico de Gestión Forestal de la Cuenca Caimancito*, Jujuy. 95 pp.

[8] Subelza, C. R., Mosconi, L. A., & Manrique, S. M. (2026). Valorización de residuos en el noroeste argentino: herramientas de decisión para productores forestales. Comunicación Técnica CONAMA 26, Fundación Conama, España.

[9] MINAGRO (Ministerio de Agroindustria). (2017). *Censo Nacional de Aserraderos: Informe de la Provincia de Jujuy*. Buenos Aires, Argentina.

[10] Manrique, S. M., Subelza, C. R., Toro, M. A., Quintero Bertel, Q. R., & Tauro, R. J. (2023). Forest Supply Chain for Bioenergy: An Approach for Biomass Study in the Framework of a Circular Bioeconomy. *Energies,* 16(20), 7140.

[11] Buitrago, L. G. (2000). El Clima de la Provincia de Jujuy. Editorial Universidad Nacional de Jujuy, San Salvador de Jujuy, Argentina.

[12] ISO (Organización Internacional de Normalización) (2014). Biocombustibles sólidos. Especificaciones y clases de combustibles. Requisitos generales. UNE-EN ISO 17225-1: 2014.

[13] Zobel, B.J. y J. Talbert. (1984). Applied forest trees improvement. John Wiley and Sons. Nueva York. 505 p

[14] Núñez C. E. (2007). Relaciones de conversión entre densidad básica y densidad seca de madera. *Ciencia Tecnológica* Año 9 / Nº 9 / 2007 / 44-50

[15] Valencia Manzo S. & J. Vargas Hernández. (1996). Método empírico para estimar la densidad básica en muestras pequeñas de madera. *Madera y Bosques* 3(1), 1997:81-87 81

[16] ISO (Organización Internacional de Normalización) (2016). Biocombustibles sólidos. Determinación de la densidad a granel. UNE-EN ISO 17828:2016

[17] Brown, N. C. y J. S. Bethel. (1987). “La industria maderera”. *Editorial Limusa*. México. 397 p.

[18] Refort, M. M., Spavento, E. M., & Keil, G. D. (2017). Proceso de aserrado: parámetros y factores que lo afectan. Facultad de Ciencias Agrarias, UNLP, La Plata, Argentina.

[19] Saidur R., Abdelaziza E.A., Demirbas A., Hossain M.S., Mekhilef S. (2011). A review on biomass as a fuel for boilers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15 (2011) 2262–2289

[20] Nakimuli C, Kawuma S, Okot D K, et al. (2026) Machine Learning Prediction of Higher Heating Value in Heterogeneous Biomass: An Evaluation of Synthetic Data Augmentation Strategies. *Cureus J Comput Sci 3* : es44389-026-00133-8. doi:https://doi.org/10.7759/s44389-026-00133-8.

[21] INTI-CITEMA (Instituto Nacional de Tecnología Industrial, Centro de Investigación de Tecnologías de la Madera). (2003). Densidad de maderas (kg/m^3) ordenadas por nombre común. https://www.inti.gob.ar/publicaciones/descargac/366

[22] Big bag Perú (11 de noviembre de 2026). Base de datos de densidad de productos a manipular https://www.bigbagperu.com/pdf/f785a2_densidades-aparentes.pdf