

Biomasa leñosa residual del árbol
**de eucalipto peruano y
su aprovechamiento en
la forma de pellets de
biomasa**

A man with a beard, wearing a red and black plaid shirt, is looking into a large, dark, cylindrical biomass pellet mill. The interior of the mill is illuminated with a warm, orange-red light, highlighting the texture of the wood chips being processed. The background is slightly blurred, showing what appears to be a workshop or industrial setting.

Caracterización y microgasificación de *pellets* de biomasa a partir de residuos leñosos para cocción y calefacción

Characterization and microgasification of biomass pellets from woody waste for cooking and heating

RESUMEN

El objetivo principal es caracterizar la biomasa obtenida de los residuos leñosos de *Eucalyptus globulus* en la comunidad rural de San Francisco de Raymina, región Ayacucho, a 3800 m s. n. m., para su transformación a *pellets* y aprovechamiento energético mediante el proceso de microgasificación, a fin de satisfacer las demandas de cocción y calefacción de viviendas rurales. Los *pellets* son un biocombustible sólido que permite aprovechar de forma más eficiente el contenido energético de la biomasa residual. La caracterización de la biomasa peruana se realizó en el laboratorio del Instituto de Investigación de Energías Renovables (IER) de la Universidad de Castilla – La Mancha, Albacete, España, y en el Laboratorio de Energías Renovables de la Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú, con el propósito de comparar resultados utilizando la norma ISO 17225-2. Los resultados indicaron que la biomasa leñosa residual del árbol de eucalipto de la localidad peruana presenta un alto potencial energético (19,75 MJ/kg) y bajos niveles de azufre, cloro y cenizas, lo que permite su aprovechamiento en la forma de *pellets* de biomasa. Se determinó experimentalmente la composición óptima de los *pellets* utilizando insumos locales para lograr un combustible ecológico de biomasa para uso doméstico rural utilizando cocinas de microgasificación.

ABSTRACT

The main objective is to characterize the biomass obtained from the woody residues of Eucalyptus globulus in the rural community of San Francisco de Raymina, Ayacucho region, at 3800 meters above sea level, for its transformation into pellets and energy use through the microgasification process, in order to satisfy the cooking and heating demands of rural homes. Pellets are a solid biofuel that allows the energy content of residual biomass to be used more efficiently. The characterization of the Peruvian biomass was carried out in the laboratory of the Renewable Energy Research Institute (IER) of Castilla–La Mancha University, Albacete, Spain, and in the Renewable Energy Laboratory of La Molina National Agrarian University, Lima, Peru, with the purpose of comparing results using the ISO 17225-2 standard. The results indicated that the residual woody biomass of the eucalyptus tree from the Peruvian locality has a high energy potential (19.75 MJ/kg) and low levels of sulfur, chlorine and ash, which allows its use in the form of pellets. biomass. The optimal composition of the pellets was experimentally determined using local inputs to achieve an ecological biomass fuel for rural domestic use using micro-gasification stoves.



Palabras Claves

Biomasa leñosa, energías limpias, pellets, biocombustible sólido, aprovechamiento energético, microgasificación.

Key words

Residual biomass, Clean energy, Pellets, Solid biofuel, Energy use, Micro-gasification.

INTRODUCCIÓN

La biomasa sólida es un producto energético renovable que abarca un gran grupo de materiales de diversos orígenes y con características muy diferentes [5]. La energía contenida en la biomasa es energía solar almacenada en sus tejidos a través de la fotosíntesis, proceso por el cual algunos organismos vivos, como las plantas, utilizan la energía solar para convertir los compuestos inorgánicos que asimilan de la atmósfera (como el CO_2) en compuestos orgánicos fijos [2]. La aplicación de nuevas tecnologías relacionadas con el aprovechamiento de la biomasa constituye en la actualidad una de las alternativas para la generación de energía limpia. Entre ellas, se encuentra la tecnología de gasificación de *pellets* producidos a partir de los desechos de biomasa sólida provenientes en su mayoría de residuos leñosos de la industria forestal, los que mediante su gasificación se transforman en un gas combustible (gas pobre) que es útil para abastecer de energía limpia tanto a grandes, medianos y pequeños consumidores [9]. Los *pellets* son productos densificados de la biomasa leñosa, de tamaño uniforme y de composición homogénea, catalogados como biomasa sólida, formados por cilindros muy pequeños, de unos pocos milímetros de diámetro [7]. Estos son reconocidos como biocombustibles sólidos estandarizados y con alto rendimiento calorífico. Para la elaboración de los *pellets*, se utiliza principalmente el proceso de densificación de la biomasa leñosa consistente en la compactación o compresión de la biomasa residual (virutas, astillas, aserrín, etc.). Mediante el pelletizado, se consigue un biocombustible más homogéneo y de mayor densidad [8]. Al fabricar y comercializar este tipo de biocombustibles sólidos, se disminuye considerablemente la cantidad de residuos, se reduce el volumen transportado, así como también se logra una combustión más limpia y eficiente [3]. Los *pellets* de biomasa pueden ser combustionados directamente como se hace con la leña u otro combustible sólido. Sin embargo, si se procede a la gasificación de los *pellets* de biomasa leñosa en un reactor donde se combustionan con aire en forma incompleta (no estequiométrica), se produce una gasificación completa (solo quedan las cenizas) por medio de una serie de reacciones termoquímicas, obteniéndose una mezcla gaseosa rica en monóxido de carbono (CO), metano (CH_4) e hidrógeno (H_2) que son gases combustibles, acompañado de dióxido de carbono (CO_2) y nitrógeno (N_2) que son gases inertes, principalmente. Esta mezcla de gas combustible producto de la gasificación recibe el nombre de «gas pobre» cuando el comburente es aire (cuando el comburente es oxígeno o vapor de agua, el gas combustible obtenido de la gasificación se conoce como «gas de síntesis») [10]. Este trabajo está limitado a estudiar el potencial aprovechamiento energético de la microgasificación de pellets de biomasa leñosa con aire para satisfacer las demandas de cocción y calefacción de viviendas rurales.

FUNDAMENTOS

En el Perú, la fuente de energía más utilizada en el medio rural tradicional se limita principalmente a la leña (biomasa residual). El consumo de leña que utilizan las familias rurales es aproximadamente 10 kg por día [1]. La carencia de tecnologías eficientes para el uso de la biomasa residual en los sectores rurales ha sido un factor limitante, entre otros, para contrarrestar los problemas de salud que aquejan a los pobladores debido a la ingesta de humo durante el proceso de cocción o calefacción.

Resulta indispensable el uso de combustibles que reduzcan la contaminación y sean eficientes.

Por tal motivo, en este trabajo se ha realizado un estudio experimental para caracterizar biomasa leñosa residual del árbol de eucalipto (*Eucalyptus globulus*) en la comunidad rural San Francisco de Raymina, localizada a 3800 m s. n. m., en la Región Ayacucho, Perú, con la finalidad de aprovechar el potencial energético disponible en la localidad para la manufactura de pellets con fines energéticos, como una alternativa tecnológica eficiente y sostenible.

METODOLOGÍA

La metodología empleada en este trabajo se basó en recolectar muestras de biomasa leñosa residual de eucalipto en la comunidad de San Francisco de Raymina, distrito de Huambalpa, provincia de Vilcashuamán, región Ayacucho, Perú, y trasladarlas hasta el laboratorio del Instituto de Investigación en Energías Renovables (IER) de la Universidad de Castilla, La Mancha en Albacete, España, donde se realizaron las pruebas y los análisis mediante tres estancias doctorales de investigación en julio de 2019, enero de 2020 y octubre de 2021. Las pruebas y los análisis para la caracterización de la biomasa tuvieron el siguiente orden:

- Preparación de las muestras de biomasa leñosa residual de eucalipto.
- Determinación de sus propiedades fisicoquímicas.
- Proceso de pelletización de la biomasa.
- Evaluación de la calidad de los pellets producidos.
- Comparación de los datos de caracterización de biomasa y calidad de pellets obtenidos en laboratorio con la información que brindan las normas internacionales.
- Finalmente, determinación de parámetros en ensayos de combustión empleando pellets producidos en laboratorio.

En forma paralela, también se realizaron ensayos de caracterización en el Laboratorio de Energías Renovables de la Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú, con el propósito de comparar resultados utilizando la norma ISO 17225-2.

DESARROLLO EXPERIMENTAL

Selección de la muestra de biomasa

La biomasa leñosa de las diversas especies forestales existentes difiere en sus características fisicoquímicas, para su aprovechamiento como combustible, por lo que se hace necesario conocer la variación de estas características para aprovechar eficientemente la biomasa leñosa de una determinada especie y variedad forestal. Para las pruebas en laboratorio, se seleccionó biomasa residual proveniente de la especie *Eucalyptus globulus*, extraída de la zona boscosa de la comunidad de San Francisco de Raymina. La localidad se ubica en el distrito de Huambalpa, Provincia de Vilcashuamán, Región Ayacucho, a 3800 m s. n. m., con coordenadas: latitud $13^{\circ}44'34.70''$ sur y longitud $73^{\circ}53'04.50''$ oeste. La zona cuenta con los siguientes parámetros meteorológicos promedios: temperatura $9,3^{\circ}\text{C}$, humedad relativa 69,2 %, irradiación solar diaria de $249,2\text{ W/m}^2$ (promedio sobre 24 horas) [6]. La temporada de lluvias ocurre entre los meses de diciembre y abril, donde ocasionalmente se producen tormentas eléctricas y granizadas. El resto del año el clima es seco. La mayoría de la población se dedica a

la agricultura y, en sus campos, siembran tubérculos, hortalizas y cereales; toda la producción es para autoconsumo. En los terrenos comunales, la población tiene plantaciones forestales de pinos y eucaliptos con fines ecológicos y aprovechamiento de la madera como combustible de uso doméstico, y eventualmente para construcción.

Caracterización experimental de la biomasa

Los ensayos de caracterización experimental de las muestras de biomasa leñosa residual peruana se realizaron principalmente en las instalaciones del Laboratorio del Instituto de Energías Renovables (IER) de la Universidad Castilla - La Mancha, en Albacete, España, durante el periodo comprendido entre los meses de enero a marzo de 2020.

La evaluación experimental de las muestras representativas fue desarrollada de acuerdo con lo que establece la Norma Europea UNE-EN ISO 17225-2 [11], la cual comprende las pruebas para la determinación de las características físicas, químicas y energéticas de la biomasa leñosa.

Preparación de las muestras

Las muestras cortadas de eucalipto y pino se llevaron desde el Perú al laboratorio IER en España para su análisis. La preparación de la muestra es de gran importancia desde el punto de vista de la representatividad y homogeneidad de la misma. Con el propósito de garantizar estas dos cualidades, se desarrolló el procedimiento normalizado para la preparación de muestras de biocombustibles sólidos de acuerdo con la norma europea UNE-EN ISO 14780 [21]. Inicialmente, se reduce la masa de la muestra original a una o más porciones, mediante el método del cono y cuarteo, como se muestra la figura 1. De esta forma, se obtiene submuestras del tamaño necesario para su caracterización física.

Para la caracterización química y termoquímica, se requiere una submuestra con un tamaño de partícula inferior a 1 mm, para lo cual se utiliza un molino de cuchillas para su reducción a partes más pequeñas (molino marca Retsch modelo SM100) con tamices de hasta 0,5 mm, obteniendo un aserrín de 0,5 mm a 1,0 mm. Véase la figura 2. A estas submuestras, estabilizadas al aire durante al menos 24 horas en un recipiente abierto, se les denomina muestra de ensayo. Las porciones de ensayo para la determinación del poder calorífico se tomaron según la norma ISO 18135 [23].



Figura 1. Vista del método de cono y cuarteo para reducción de masa de muestra

Fuente: Elaboración propia.



Figura 2. Vista del molino de cuchillas Retsch

Fuente: Elaboración propia.

Determinación de propiedades fisicoquímicas de la muestra preparada

A. Determinación de densidad

Se determinaron los parámetros físicos más importantes como la dimensión de partícula, densidad de la partícula y densidad aparente. Estas propiedades determinan el sistema de alimentación que se debe emplear en el proceso de pelletización de la biomasa. Asimismo, la densidad aparente influye en el transporte y el almacenamiento del combustible sólido.

B. Determinación de la humedad

El procedimiento para determinar la humedad de la muestra consiste en calentar, de manera controlada, una porción de ensayo de 1,0 g a 105 °C hasta alcanzar una masa constante. Se considera que se ha alcanzado una masa constante cuando el cambio en la masa es inferior a 0,1 mg durante un periodo de calentamiento de 60 minutos. A continuación, la muestra se enfría a temperatura ambiente en un desecador. Las pruebas se realizan en un horno mufla marca Memmert modelo UNB 400, utilizando la Norma Técnica ISO 18134-3:2015 [19] e ISO 16993:2015 [13].

C. Caracterización química y termoquímica

a. Análisis elemental

Este análisis proporciona el contenido de carbono, hidrógeno, nitrógeno, azufre, cloro y oxígeno en la muestra de ensayo, expresado en porcentaje en masa. El procedimiento utilizado para el análisis del C, H y N deriva de las normas ISO 18122:2015 [16] e ISO 16948:2015 [12]; mientras que el del S y del Cl deriva de la norma [20]. Para la determinación del contenido en carbono, nitrógeno, hidrógeno y azufre se utiliza un analizador elemental

marca LECO modelo TruSpec. Este equipo realiza la combustión en atmósfera altamente oxidante, de una cantidad de muestra entre 100 mg y 400 mg. Los gases de la combustión se dirigen a distintas celdas en las que se contabiliza individualmente el porcentaje de cada elemento. El contenido en carbono se determina mediante absorción en espectrofotómetro infrarrojo. El contenido en C, H y N se realizan en un mismo ensayo, mientras que el contenido en S se determina en un ensayo independiente en un módulo separado del citado equipo.

b. Análisis inmediato

Este análisis proporciona el contenido en volátiles, cenizas y carbono fijo de la muestra a analizar.

c. Determinación del contenido en volátiles

La materia volátil se determina contabilizando las pérdidas de masa que sufre una muestra de ensayo al ser calentada sin contacto con aire a 900 +/- 10 °C durante 7 minutos. El análisis se ha realizado según la Norma ISO 18123:2015 [18], utilizándose un horno mufla marca Hobersal Modelo 12pr/400 PAD.

d. Determinación del contenido en cenizas

El contenido en cenizas se determina a partir de la masa inicial y final de la muestra tras ser sometida a un proceso de calentamiento en atmósfera de aire en horno mufla. Se sigue el procedimiento establecido en la Norma ISO 18122:2015 [17] donde las rampas de calentamiento son 5 °C/min hasta alcanzar los 250 °C, Isoterma a 250 °C durante 60 minutos, luego 10 °C/min hasta alcanzar 550 +/- 10 °C y, finalmente, Isoterma a 550 °C durante 120 min. Tras someter la muestra a estas rampas, se vuelve a introducir en el horno a 550 °C durante periodos adicionales de 30 minutos hasta que el cambio de masa sea menor de 0,2 mg. Ver figura 6.

e. Determinación del contenido en carbono fijo

El contenido en carbono fijo se calcula como la diferencia entre el cien por cien del carbono en la muestra y los porcentajes de volátiles.

D. Poder calorífico

Experimentalmente, se usa un calorímetro marca PARR modelo 6100 para determinar el poder calorífico superior (PCS) a volumen constante de la muestra, expresado en las unidades del sistema internacional, kJ/kg. El PCS en base húmeda y en base seca, a volumen constante, se determinan a partir del resultado experimental y de una serie de expresiones que se detallan a continuación. El procedimiento seguido deriva de la norma ISO 18125:2017 [22].

a. Poder calorífico superior (PCS) a volumen constante en base húmeda

La muestra de ensayo se somete a una combustión con exceso de oxígeno en el calorímetro. A partir del incremento de temperatura que sufre el baño de agua donde está sumergida la bomba en la que se produce la combustión, el equipo determina el PCS a volumen constante de la muestra del ensayo (PCS_v) en base húmeda.

b. Poder calorífico superior (PCS) a volumen constante en base seca

El poder calorífico a volumen constante en base seca (PCS_{v,b,s}) se determina a partir del PCS_v y el porcentaje de humedad de la muestra de ensayo (M) según la ecuación (1).

$$PCS_{v,b,s} = \frac{PCS_v}{\left(1 - \frac{M}{100}\right)} \quad (1)$$

E. Proceso de pelletización de la biomasa

Para realizar la prueba, se utilizó una máquina de pelletizado de 2 HP, marca Ecofrío, ver figura 3. Para fines de esta investigación, se emplearon los términos y definiciones incluidos en la Norma ISO 16559:2022 [24]. Se pelletizó la muestra de biomasa de madera de eucalipto peruana en el equipo de laboratorio Ecofrío, y se obtuvo las condiciones preliminares de trabajo para el proceso de pelletizado a escala, para diferentes valores de grado de humedad, diámetro de los agujeros de entrada de la matriz y grado de compresión de la misma. De acuerdo con la norma de pelletizado ISO 17225-2:2014 [11], se estableció preliminarmente como condición óptima A1 aquella que proporciona un *pellet* de durabilidad igual o superior al 97,5 %, con una densidad aparente igual o superior a 600 kg/m³ y un contenido en finos inferior o igual al 1 %. También se establece como condición de calidad A1 que el *pellet* no debería contener un porcentaje en humedad superior al 10 %.



Figura 3. Vista del proceso de pelletizado de biomasa peruana con máquina de pelletizado de 2 HP, marca Ecofrío

Fuente: Elaboración propia.

F. Evaluación de la calidad del pellet producido

Se realizó mediante un análisis físico de durabilidad, densidad y contenido en finos. La durabilidad mecánica se determinó en el durabilímetro Mabrick, modelo DBM 203, mediante un ensayo de centrifugado donde la muestra de pellets se somete a golpes controlados en una cámara rotativa a 50 r. p. m. durante 10 minutos. Este ensayo se llevó a cabo de acuerdo con la Norma ISO 17831-1:2015 [16] (ver figura 4). Inicialmente, se eliminan los finos de la muestra mediante cribado manual con un tamiz de 3.15 mm de luz de paso, y se pesa la masa de pellets retenidos al inicio (m_{bi} , DU). Después, se somete la muestra al ensayo de centrifugado y se vuelve a hacer un cribado para separar los finos generados durante el proceso, anotando el peso del material final que no atraviesa la malla de 3.15 mm (m_{bf} , DU). De esta forma, la durabilidad (DU) expresa el porcentaje en masa, se calcula como la ecuación (2):

$$DU = \frac{m_{bf,DU}}{m_{bi,DU}} \cdot 100 \quad (2)$$



Figura 4. Vista del ensayo de la durabilidad mecánica de los pellets, con el durabilímetro marca Mabrick DBM 203

Fuente: Elaboración propia.

Para determinar la densidad aparente, se siguió el método descrito en la Norma ISO 17828:2015 [15] consistente en introducir la muestra en un recipiente de volumen (V) y masa (m_1) conocidos, para obtener el peso neto de la muestra por volumen normalizado, ver figura 5. Para llenar el recipiente, la muestra se deja caer desde una altura de 20 cm; después, este se deja caer contra el suelo dos veces para que el material se asiente y se rellena el espacio libre con más cantidad de muestra. El peso del recipiente lleno se denomina m_2 , valor con el que se calcula la densidad aparente (ρ_a) según la ecuación (3):

$$\rho_a = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad (3)$$



Figura 5. Vista del ensayo de densidad aparente de pellets, con recipiente normado

Fuente: Elaboración propia.

Comparación de los datos obtenidos con las normas internacionales

Con los resultados obtenidos, los cuales toman en cuenta los parámetros óptimos de control de calidad, es posible otorgar la categoría de calidad que le corresponde al pellet, siempre que cumpla con los requisitos de la norma ISO 17225-2:2014 [11]. Esta normativa sobre calidad de los biocombustibles sólidos es importante porque define indicadores de calidad y su valor límite para las distintas calidades de pellets de biomasa. Así, se facilita que los pellets de biomasa se consideren de calidad estándar, independientemente de su lugar de procedencia.

RESULTADOS

Caracterización de las muestras de biomasa: Determinación de las propiedades fisicoquímicas

A. Análisis elemental

Se obtuvieron los valores experimentales de C (49,93 %), N (0,44 %) y S (0,003 %) para los pellets obtenidos con muestras de eucalipto peruano, los cuales se presentan en la tabla 1 junto con los valores obtenidos para pino peruano (52,2 % para C, 0,41 % para N y 0,003 %). Los valores obtenidos en S para ambas especies coinciden con los valores establecidos en la norma [11] (ver tabla 2). El valor de C (52,2 %) obtenido para el pino es 2,27 % superior al obtenido para el eucalipto (49,93 %). Esto significa que el eucalipto es de menor calidad energética que el pino. Los valores del N (0,44 %) obtenidos para el eucalipto están 0,03 % por encima del valor obtenido para el pino (0,41 %), por lo que el eucalipto tendrá mayores emisiones de NO_x y N₂O.

B. Caracterización energética de la biomasa

Para la caracterización energética de la biomasa, se determinó el PCS e inferior (PCI), expresado en MJ/kg, y el porcentaje de cenizas, siendo el PCI el valor utilizado comúnmente para definir el poder calorífico de un material de biomasa. Se determinó el PCI del árbol para muestras de sus diferentes materiales (corteza y madera), expresados como materia seca (porcentaje de humedad).

En la tabla 1, se aprecia que la madera de pino presentó el mayor PCI con 19,76 MJ/kg, seguido por la madera del eucalipto con 19,58 MJ/kg y, finalmente, la corteza del eucalipto con 16,45 MJ/kg.

En cuanto al porcentaje de cenizas, los resultados indicaron que la madera de eucalipto presenta un valor mayor (0,67 %) en comparación con la del pino (0,56 %). Se concluye que el eucalipto peruano tiene un porcentaje de cenizas menos favorable en comparación con el pino peruano, en relación con lo establecido por la Norma UNE-EN ISO 18122:2015 ($\leq 1,5$ %). Por tanto, la utilización del eucalipto peruano para producir

energía reduce en forma mínima la eficiencia de la combustión, ocasionando ligeramente mayores perjuicios en la combustión para las cocinas de uso rural ya explicados anteriormente.

Proceso de pelletizado de la biomasa

Los ensayos de pelletizado con biomasa leñosa peruana se han llevado a cabo con dos objetivos: por un lado, estudiar el proceso y sus variables más significativas, y, por otro, fabricar *pellets* para caracterizarlos y estudiar su comportamiento durante la combustión.

Tabla 1
Caracterización fisicoquímica de biomasa leñosa peruana realizada en el Instituto de Investigación de Energías Renovables de la UCLM, España

Parámetros	Unidad	Especie eucalipto				Pino Madera
		Corteza 1	Madera 1	Corteza 2	Madera 2	
Cenizas	% en masa	5,50	0,47	6,90	0,67	0,56
Sólidos volátiles	% en masa	76,71	85,23	73,87	84,73	76,71
Carbono fijo	% en masa	17,79	14,30	19,23	14,60	22,73
C (Carbono)	% en masa	47,12	50,95	45,97	49,93	52,20
H (Hidrógeno)	% en masa	5,18	5,39	5,10	5,69	5,82
N (Nitrógeno)	% en masa	0,56	0,50	0,62	0,44	0,41
S (Azufre)	% en masa	0,07	0,06	0,02	0,003	0,00
Cl (Cloro)	% en masa	0,04	0,02	0,02	0,00	0,00
PCS	MJ/kg	17,97	19,75	17,57	19,59	19,75
PCI	MJ/kg	16,84	18,57	16,45	18,34	18,48

Fuente: Elaboración propia.

Las astillas de eucalipto peruano se muelen y pelletizan con el propósito de comparar las condiciones de molienda y compresión, así como la humedad y la velocidad de alimentación. A continuación, la tabla 2 muestra los requisitos establecidos por la norma ISO 17225-2:2014 [11], comparados con los resultados

obtenidos en esta investigación. Cabe mencionar que el valor de la densidad medida de 685,93 kg/m³, para la madera de eucalipto peruano, cumple con la densidad establecida en la norma ISO 17225-2:2014 [11], para una calidad de *pellets* A1 y A2 (≥ 600 kg/m³).

Tabla 2
Caracterización de pellets a partir de madera de eucalipto y pino peruano realizados en el Instituto de Investigación de Energías Renovables de la UCLM (España)

Parámetros	Unidad	Especie eucalipto				Pino Madera de Pino
		Corteza 1	Madera 1	Corteza 2	Madera 2	
Durabilidad mecánica	% en masa	-	94,38	-	95,02	97,08
Densidad a granel	kg/m ³	-	685,93	-	685,81	684,01
Humedad	% en masa	8,64	10,25	8,64	10,25	10,00
Finos	% en masa	-	< 1,0	-	< 1,0	3,15

Fuente: Elaboración propia.

En efecto, en la tabla 2, se evidencia que las cenizas de la biomasa de eucalipto peruano (0,47 %) y pino (0,56 %) cumplen con los valores máximos establecidos en la norma ISO 17225-2

($\leq 0,7$ %) de la tabla 3 para su uso como materia prima alternativa o de complemento en la fabricación de *pellets*.

Ensayo de combustión empleando pellets producidos en laboratorio

En la tabla 3, se presenta un resumen de los requisitos normativos y los estándares de valores límites establecidos por la norma ISO 17225-2:2014 [11], para las calidades de *pellets* A1, A2 y B, comparativamente con los resultados obtenidos en esta investigación. Según la norma, las clasificaciones A1 y A2 representan madera virgen y residuos de madera no tratada químicamente: la clase A1 de la tabla 2 alude a combustibles de

madera con bajo contenido en cenizas y nitrógeno, mientras que la clase A2 tiene algo más de cenizas y nitrógeno. La clase B permite el uso de subproductos y residuos industriales de madera tratada químicamente y madera no tratada químicamente, y su contenido de cenizas y nitrógeno es mayor. En este sentido, se considera que la clase A1 tiene un mayor valor comercial y ecológico porque su potencial de contaminación es menor. Las clases A2 y B tienen un mayor potencial de contaminación, y esa diferencia se refleja en sus menores precios de venta a nivel europeo.

Tabla 3
Especificaciones de *pellets* de madera clasificados para aplicaciones comerciales y residenciales

Clase de propiedad/ Método de análisis	Unidades	A1	A2	B
Origen y fuente, EN 17225-1		1.1.3 Fuste 1.2.1 Residuos de madera no tratada químicamente ^a	1.1.1 Árboles enteros sin raíces 1.1.3 Fuste 1.1.4 Restos de corta 1.2.1 Residuos de madera no tratada químicamente ^a	1.1 Bosque, plantaciones y otra madera virgen 1.2 Subproductos y residuos de la industria del procesamiento de la madera 1.3.1 Madera usada no tratada químicamente
Diámetro, D^b y longitud, L ISO 17829 Según la figura 1	mm	D06, 6 ± 1; 3,15 < L ≤ 40 D08, 8 ± 1; 3,15 < L ≤ 40	D06, 6 ± 1; 3,15 < L ≤ 40 D08, 8 ± 1; 3,15 < L ≤ 40	D06, 6 ± 1; 3,15 < L ≤ 40 D08, 8 ± 1; 3,15 < L ≤ 40
Humedad, M ISO 18134-1, ISO 18134-2	%(m/m) según se recibe, base húmeda	M10 ≤ 10	M10 ≤ 10	M10 ≤ 10
Cenizas, A^d, ISO 18122	%(m/m) en base seca	A0.7 ≤ 0,7	A1.2 ≤ 1,2	A2.0 ≤ 2,0
Durabilidad mecánica, DU, ISO 17831-1	%(m/m) según se recibe	DU97.5 ≥ 97,5	DU97.5 ≥ 97,5	DU96.5 ≥ 96,5
Finos F^e, ISO 18846	%(m/m) según se recibe	F1.0 ≤ 1,0	F1.0 ≤ 1,0	F1.0 ≤ 1,0
Aditivos^f	%(m/m) según se recibe	≤ 2 A declarar tipo y cantidad	≤ 2 A declarar tipo y cantidad	≤ 2 A declarar tipo y cantidad
Poder calorífico neto, Q, ISO 18125	MJ/kg o kWh/kg según se recibe	Q16.5 ≥ 16,5 o Q4.6 ≥ 4,6	Q16.5 ≥ 16,5 o Q4.6 ≥ 4,6	Q16.5 ≥ 16,5 o Q4.6 ≥ 4,6
Densidad a granel, BD^g, ISO 17828	kg/m ³ según se recibe	BD600 ≥ 600	BD600 ≥ 600	BD600 ≥ 600
Nitrógeno, N, ISO 16948	%(m/m) en base seca	N0.3 ≤ 0,3	N0.5 ≤ 0,5	N1.0 ≤ 1,0
Azufre, S, ISO 16994	%(m/m) en base seca	S0.04 ≤ 0,04	S0.05 ≤ 0,05	S0.05 ≤ 0,05
Cloro, Cl, ISO 16994	%(m/m) en base seca	Cl0.02 ≤ 0,02	Cl0.02 ≤ 0,02	Cl0.03 ≤ 0,03

Fuente: Clases de *pellets* de madera, ISO 17225-2:2014 [11].

Cabe mencionar que la densidad medida corresponde a las astillas leñosas de las especies peruanas consideradas (eucalipto y pino), donde se aprecia que las muestras de madera cumplen con una densidad igual o mayor a 600 kg/m³, con la excepción del eucalipto. Sin embargo, el proceso de la confección de pellets densifica el material por compresión; por lo tanto, el pelletizado de las astillas de la madera aumentará la densidad del pellet obtenido a partir de la madera de eucalipto peruano.

Según la tabla 3, se concluye que los *pellets* producidos a partir de biomasa de eucalipto peruano no alcanzan el valor mínimo de durabilidad mecánica (≥97,5 %) exigido para la categoría A1. En

contraste, los elaborados con madera de pino sí cumplen con este requisito, lo que los posiciona como una opción viable para su uso como materia prima alternativa o complementaria en la fabricación de pellets.

El contenido de cenizas en la biomasa de eucalipto (0,47 %) y pino (0,56 %) del Perú se ajusta a los límites establecidos por la norma (≤ 0,7 %), lo que permite que la madera de ambas especies pueda utilizarse como material complementario a las materias primas destinadas a estos fines.

Evaluación de la calidad del *pellet* producido

De acuerdo con la norma [11], se estableció como condición óptima aquella que proporciona un *pellet* con una durabilidad mecánica superior a 97,5 %, una densidad aparente superior a 600 kg/m³ y un contenido en finos inferior a 1%. Además, el *pellet* debe contener un porcentaje de humedad inferior al 10 %.

El valor de durabilidad mecánica obtenido para el eucalipto (94,38%) utilizando una pelletizadora doméstica de 2 HP, marca Ecofrío, fue inferior a lo establecido en la norma [11] para calidades A1 y A2 (≥97,5 %). Igualmente, el eucalipto peruano tampoco podría considerarse de calidad B (≥96,5 %), que es la categoría más baja.

El valor de la densidad a granel para el eucalipto (685,925 kg/m³) es superior a la densidad a granel del pino (684,01 kg/m³).

Con respecto a los valores de humedad obtenidos para la madera de eucalipto (10,25 %) y pino (10,0 %) peruanos, se concluye que el eucalipto no se ajusta a la normativa ISO de humedad (≤10,0 %) para su uso en la tolva de pelletizado, mientras que el pino peruano cumple justo con el límite permitido.

Determinación complementaria de las propiedades fisicoquímicas de las muestras de biomasa

Entre septiembre a octubre de 2021, se encargó al Laboratorio de Energías Renovables, Unidad de Biomasa Energética (LER-UBE) de la Universidad Nacional Agraria La Molina, de Lima, Perú, la realización, en forma complementaria y simultánea, de las mismas pruebas fisicoquímicas realizadas en el IER-UCLM, España. Se realizaron coordinaciones entre ambos institutos de investigaciones de Perú y España las que produjeron resultados muy similares, como se evidencia en la tabla 4.

Tabla 4
Resultados de las pruebas fisicoquímicas de biomasa leñosa peruana, realizadas en el Laboratorio de Energías Renovables (LER), Unidad de Biomasa Energética (UBE), Universidad Nacional Agraria la Molina (Unalm), Lima Perú

Parámetros	Unidad	Especie eucalipto				Madera de Pino
		Corteza 1	Madera 1	Corteza 1	Madera 1	
Cenizas	% en masa	6,07	0,52	6,90	0,67	0,18
Sólidos volátiles	% en masa	75,42	77,63	75,58	77,42	77,91
Carbono fijo	% en masa	17,79	14,30	19,23	14,60	22,73
C (Carbono)	% en masa	42,59	48,60	46,04	49,02	48,47
H (Hidrógeno)	% en masa	5,19	6,07	5,42	5,88	6,13
N (Nitrógeno)	% en masa	0,42	0,19	0,26	0,16	0,13
S (Azufre)	% en masa	0,071	0,047	0,037	0,043	0,029
Cl (Cloro)	% en masa	0,006	0,008	0,006	0,0007	0,005
PCS	MJ/kg	14,18	18,67	17,32	18,21	19,75
PCI	MJ/kg	13,84	16,51	15,28	15,90	18,48

Fuente: Elaboración propia.

En el LER-UBE de la Unalm, se realizó el análisis proximal de la muestra por triplicado para determinar el contenido de humedad, cenizas, material volátil y carbono fijo, en porcentaje en masa, utilizando el equipo analizador termogravimétrico TGA-701 LECO, de acuerdo con la norma norteamericana ASTM D7582.

Se realizó un pretratamiento de reducción de tamaño de partícula hasta pasar por tamiz N 60, y de secado en estufa a 105 °C durante 24 horas, antes de realizar los análisis en base seca. El análisis elemental en la Unalm se realizó por triplicado para determinar el contenido de carbono, hidrógeno, nitrógeno, oxígeno y azufre en la muestra, en porcentaje en masa, utilizando el equipo analizador elemental CHN628 LECO, de acuerdo con la norma española [14].

El análisis de contenido energético en la muestra se realizó por triplicado para determinar el poder calorífico inferior (PCI) y el PCS utilizando el equipo calorímetro AC600 LECO, de acuerdo con la norma norteamericana ASTM D5865. Previamente, se ejecutaron los siguientes pretratamientos a la muestra: a) reducción de tamaño de partículas hasta pasar por tamiz N 60, y b) secado en estufa a 105 °C durante 24 horas.

El propósito de esta determinación complementaria, o doble caracterización, fue comparar la aplicación de la norma norteamericana ASTM con la norma europea ISO, ya que, en América Latina, generalmente, se utilizan las normas ASTM. Al contrastar los resultados obtenidos utilizando la norma ASTM en la tabla VII (resultados de la Unalm) con los obtenidos utilizando la Norma ISO (resultados en el IER-UCLM, tabla I), se observa que la variación es mínima. Asimismo, a partir de esta comparación, se podría afirmar que la norma europea es más estricta que la norteamericana por tener protocolos de análisis y pruebas más estandarizadas y exigentes que los de la norma americana.

CONCLUSIONES

De acuerdo con la norma ISO 17225-2 de calidad para la producción de *pellets* de biomasa, los parámetros determinados en *pellets* producidos a partir de muestras de eucalipto peruano obtuvieron valores que cumplieron con los estándares mínimos en contenido de nitrógeno, azufre y cloro, así como en PCI

y densidad a granel. Si bien los parámetros de durabilidad mecánica y humedad de la biomasa de eucalipto peruano no cumplen con los límites establecidos en la norma, la diferencia observada con los valores establecidos en la norma indicada es mínima.

Los resultados muestran una baja durabilidad mecánica de los pellets con eucalipto peruano, que no cumplen con la norma ISO mencionada. Sin embargo, solamente se realizó una prueba de durabilidad, cuyo valor variaría si se hubieran realizado varias pruebas.

Las cenizas de la biomasa de eucalipto peruano y pino cumplen con los valores máximos establecidos en la norma ISO para su uso como materia prima alternativa o de complemento en la fabricación de *pellets*.

La calidad de la madera depende principalmente de su nivel de humedad, por lo que debe secarse antes del análisis. Este es el caso de la muestra de biomasa de eucalipto peruano, cuyo contenido de humedad excede los límites establecidos por la norma ISO. Además, el exceso de humedad impacta negativamente en el proceso de combustión, haciéndolo más lento, reduciendo la eficiencia y provocando daños prematuros en los sistemas de alimentación de las cocinas de *pellets*.

Finalmente, se concluye que la biomasa residual del árbol de eucalipto de la localidad de San Francisco de Raymina tiene un alto potencial energético, y que su pelletización y aprovechamiento con fines energéticos es viable, y se posiciona como un combustible ecológico adecuado para uso doméstico.

REFERENCIAS

- [1] BVS MINSA. (2011). *Por un Perú sin humo. Campaña Nacional Medio Millón de Cocinas Mejoradas* [Archivo PDF]. <https://bvs.minsa.gob.pe/local/MINSA/2782.pdf>
- [2] Castells, X. (2012). *Energía, Agua, Medioambiente, territorialidad y Sostenibilidad*. Ediciones Díaz de Santos.
- [3] Fernández-Puratich, H., Oliver-Villanueva, J. V., Valiente, M., Verdú, S., & Albert, N. (2014). Pellets development from three woody species under Mediterranean conditions. *Madera y bosques*, 20(3), 97-111. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1405-04712014000300009&script=sci_abstract&tIng=en
- [4] Gonzáles Amao, W. (2018). *Construcción y caracterización de estufa con sistema de microgasificación*. [Tesis para obtener el grado académico de maestro en Ciencias con mención en Energías Renovables y Eficiencia Energética]. Universidad Nacional de Ingeniería. Facultad de Ciencias. <http://hdl.handle.net/20.500.14076/15990>
- [5] IDAE. (2007). *Energía de la Biomasa* [Archivo PDF]. https://www.idae.es/sites/default/files/documentos/publicaciones_idae/documentos_10374_energia_de_la_biomasa_07_b954457c.pdf
- [6] Molina, J., Espinoza, R., Horn, M. & Gómez, M. (2019). Thermal performance evaluation of isolation and two active solar heating systems for an experimental module: A rural Peruvian case at 3700 masl. *Journal of Physics: Conference Series*, 1173(1), 012003. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1173/1/012003>
- [7] Pinto, R. (2018). *Identificación de los productos y medios empleados para el control de plagas*. SEAG0110. IC Editorial.
- [8] Portero, H. (2018). *Estudio experimental de pelletizado en planta piloto y de combustión en caldera de biomasa a baja potencia*. [Tesis para optar el grado de doctor]. Universidad de Castilla-La Mancha. Departamento de Mecánica Aplicada e Ingeniería de Proyectos. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales. <https://hdl.handle.net/10578/18416>
- [9] Rojas Valdivia, A. (2004). *Prefactibilidad técnica y económica para la instalación de una planta de pellets para combustibles a partir de desechos de madera*. [Tesis para optar el título profesional de ingeniero forestal con mención en manejo de Recursos Forestales]. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Forestales. Departamento de manejo de Recursos Forestales. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/105033>
- [10] Sanchez, N. (2014). *Obtención de gas de síntesis a partir de biomasa utilizando catalizadores de níquel*. [Tesis para optar el grado en Ingeniería Química]. Universidad de Valladolid. Escuela de Ingenierías Industriales. <https://acortar.link/LWR1iy>
- [11] Una Norma Española. (2014). *Biocombustibles sólidos. Especificaciones y clases de combustibles. Parte 2: Clases de pélets de madera (ISO 17225-2:2014)*. Asociación Española de Normalización. <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0053748>
- [12] Una Norma Española. (2015a). *Biocombustibles sólidos. Determinación del contenido total de carbono, hidrógeno y nitrógeno (ISO 16948:2015)*. Asociación Española de Normalización. <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0055295>
- [13] Una Norma Española. (2015b). *Biocombustibles sólidos. Conversión de los resultados analíticos de una base a otra (ISO 16993:2015)*. Asociación Española de Normalización. <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0055297>
- [14] Una Norma Española. (2015c). *Biocombustibles sólidos. Determinación del contenido soluble en agua de cloruro, sodio y potasio (ISO 16995:2015)*. Asociación Española de Normalización. <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0055053>
- [15] Una Norma Española. (2016a). *Biocombustibles sólidos. Determinación de la densidad a granel (ISO 17828:2015)*. Asociación Española de Normalización. <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0057270>
- [16] Una Norma Española. (2016b). *Biocombustibles sólidos. Determinación de la durabilidad mecánica de pélets y briquetas. Parte 1: Pélets (ISO 17831-*

1:2015). Asociación Española de Normalización. <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0057456>

[17] Una Norma Española. (2016c). *Biocombustibles sólidos. Determinación del contenido de ceniza (ISO 18122:2015)*. Asociación Española de Normalización. <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0056486>

[18] Una Norma Española. (2016d). *Biocombustibles sólidos. Determinación del contenido en materia volátil (ISO 18123:2015)*. Asociación Española de Normalización. <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0056450>

[19] Una Norma Española. (2016e). *Biocombustibles sólidos. Determinación del contenido de humedad. Método de secado en estufa. Parte 3. Humedad de la muestra para análisis general (ISO 18134-3:2015)*. Asociación Española de Normalización. <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0056327>

[20] Una Norma Española. (2017). *Biocombustibles sólidos. Determinación del contenido total de azufre y cloro (ISO*

16994:2016). Asociación Española de Normalización. <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0057869>

[21] Una Norma Española. (2018a). *Biocombustibles sólidos. Preparación de muestras (UNE-EN ISO 14780:2017)*. Asociación Española de Normalización. <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0060316>

[22] Una Norma Española. (2018b). *Biocombustibles sólidos. Determinación del poder calorífico (ISO 18125:2017)*. Asociación Española de Normalización. <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0060319>

[23] Una Norma Española. (2018c). *Biocombustibles sólidos. Muestreo (ISO 18135:2017)*. Asociación Española de Normalización. <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0059669>


[24] Una Norma Española. (2022). *Biocombustibles sólidos. Vocabulario (ISO 16559:2022)*. Aenor. <https://tienda.aenor.com/norma-une-en-iso-16559-2022-n0070126>

ACERCA DEL AUTOR

Walter Gonzales Arnao

Es arquitecto, diseñador industrial y MSc. en Energías Renovables. Posee una certificación en Fabricación Digital en MIT en Boston. Asimismo, Es docente en la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI). Tuvo una estancia de investigación en la Universidad Castilla - La Mancha, en el Instituto de Energías Renovable en la ciudad de Albacete, España. Inventor y experto en patentes. Docente investigador Renacyt, nivel II. Tiene publicaciones y patentes.

Para mayor información: <http://fabacademy.org/archives/2012/students/gonzales.walter/index.html>

 wgonzalesa@uni.edu.pe

Javier Verastegui Lazo

Ingeniero industrial por la UNI y Bachiller en Ingeniería Química por la UNMSM (Universidad Nacional de San Marcos). Obtuvo el DEA (equivalente a MSc) en Química Analítica y el doctorado en Química en la Universidad de París - Sorbona (antes U. Paris VI Pierre et Marie Curie), Francia. En Perú, ha sido director de Tecnología del Itintec, hoy Indecopi, y experto en Tecnología de la Junta del Acuerdo de Cartagena, hoy CAN. Entre 1991 y 2002, trabajó en Ottawa, Canadá, siendo gerente de Programas en la División de Medio Ambiente y Recursos Naturales del Centro Internacional de Investigaciones para el Desarrollo (CIID); luego, se desempeñó como coordinador para América Latina en el Instituto Canadiense de Biotecnología (CIB) y como secretario

ejecutivo de CamBioTec, la Iniciativa Canadá - América Latina para el Desarrollo Sustentable de la Biotecnología, bajo el auspicio del CIID. En 1998-1999, dirigió el Proyecto Bioseguridad y Percepción Pública en Biotecnología Agrícola en el Cono Sur para formación de capacidades en Argentina y Chile, auspiciado por la Agencia Canadiense de Desarrollo Internacional (ACDI). En Perú, entre 2002 y 2007, ha sido sucesivamente coordinador nacional de la fase preparatoria del Programa de Ciencia y Tecnología (Fincyt 1), hoy ProInnovate, Director de Investigaciones y Jefe de la Oficina de Políticas en Ciencia y Tecnología del Concytec. De 2007 a 2009, ha sido secretario general de la Asociación BioEuroLatina en Madrid, España, donde dirigió el proyecto EULAFF «Acción Europa-América Latina en Alimentos Funcionales», auspiciado por la Comisión Europea. El Dr. Verástegui tiene una amplia experiencia en la enseñanza universitaria de postgrado en la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP), la UNI, Universidad Peruana Cayetano Heredia (UPCH), la UNMSM y la Universidad de San Martín de Porres (USMP). Tiene más de 30 publicaciones entre libros y artículos científicos. Asimismo, es consultor internacional en proyectos de gestión científico-tecnológica, gestión de la innovación, bioenergía, biodiversidad, biotecnología, y alimentos funcionales.

 verastegui.javier@gmail.com

Recibido: 19-02-24
 Revisado: 20-04-24
 Aceptado: 26-07-24



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons AtribuciónNoComercial 4.0 Internacional.