



Análisis del poder calorífico de pellets y briquetas en el aprovechamiento del pseudotallo de Plátano (*Musa paradisiaca*). *Analysis of the calorific value of pellets and briquettes in the utilization of plantain pseudostems (*Musa paradisiaca*).*

Sandra Emperatriz Peña Murillo ^{1*}; Eddie Manuel Zambrano Nevárez ²; Sandra Elvira Fajardo Muñoz ³;
Nahir Alondra Pérez Ortiz ⁴; Darla Rosario Vaca Choez ⁵; Pablo Fajardo Echeverri ⁶.

Recibido: 12/09/2024 – Aceptado: 20/04/2025 – Publicado: 01/07/2025

Artículos de
Investigación



Artículos de
Revisión



Artículos de
Ensayos



* Autor para correspondencia.



Resumen.

Los biocombustibles sólidos pertenecen a la segunda generación de acuerdo con el tipo de biomasa, obteniéndose de desechos agrícolas, forestales e industriales como el pseudotallo de plátano que es una biomasa lignocelulósica la cual se puede emplear como una alternativa para la generación de energía renovable en forma de pellets y briquetas debido a sus propiedades energéticas. El objetivo de estudio es determinar la eficiencia del poder calorífico de los biocombustibles sólidos en base al pseudotallo de Plátano (*Musa paradisiaca*). La metodología de estudio se dividió 3 partes: (1) Obtención y acondicionamiento de la biomasa, (2) elaboración de Biocombustibles Sólidos y (3) el análisis físico, proximal, potencial energético de la biomasa y el ANOVA respectivo de pellet y briqueta. Encontrándose un alto poder calorífico para las composiciones 55-45% en pellet con 22,657 MJ/Kg y 50-50% en briqueta con 22,680 MJ/kg, cumpliendo con los parámetros establecidos en las normas ENplus y NTC 2060 respectivamente.

Palabras clave.

Pseudotallo, Biomasa, Poder Calorífico, Pellet y Briqueta.

Abstract.

Solid biofuels belong to the second generation according to the type of biomass obtained from agricultural, forestry, and industrial wastes, such as banana pseudostem, which is a lignocellulosic biomass that can be used as an alternative for the generation of renewable energy in the form of pellets and briquettes due to its energetic properties. The study aims to determine the calorific value efficiency of solid biofuels based on Plantain (*Musa paradisiaca*) pseudostem. The study methodology was divided into three parts: (1) obtaining and conditioning of biomass, (2) elaboration of solid biofuels, and (3) physical, proximal, and energy potential analysis of biomass and the respective ANOVA of pellets and briquettes. A high calorific value was found for the compositions 55-45% in pellet with 22,657 MJ/kg and 50-50% in briquette with 22,680 MJ/kg, complying with the parameters established in the ENplus and NTC 2060 standards, respectively.

Keywords.

Pseudostem, Biomass, Calorific value, Pellet and Briquette.

1. Introducción

Ecuador, es un país que produce grandes cantidades de biomasa y residuos lignocelulósicos por año, que no son aprovechados en su totalidad en el área agrícola, aun cuando, la biomasa es de gran importancia en la generación de energía limpia ya que se explora como alternativa de materia prima para la producción de biocombustibles sólidos. Por lo tanto, la biomasa es un recurso disponible, el cual tiene ventajas como su facilidad de combustión, contenido de celulosa y neutra emisión de carbono [1].

De acuerdo, al Atlas Bioenergético del Ecuador empleo la base de datos de ESPAC, en 2012 tuvo una productividad de 559 319 ton/año, donde 372 576 t/año corresponde a residuos de campo (Hojas, pseudotallo), de la cual se obtuvo un Poder calorífico Inferior (PCI) de 4,180 TJ/kg. Sin embargo, según la INEN en 2022, Ecuador registro 133 145

h de superficie plantada, dando una cosecha de 114 526 h, obteniendo una producción de 857 561,89 toneladas métricas [2]. Se estima que de una planta de plátano que pesa alrededor de 100 kg se obtiene 88% que representa a los residuos totales y el racimo un 12%, dando una relación entre residuos de la cosecha y el racimo es de 2:1 [3], [4]. Los residuos lignocelulósicos generados, son las partes de los cultivos de especies vegetales desecharados en el período de cosecha, que no son empleados para el consumo [5], por lo que en el sector agrícola se estiman 1,44 MMt de biomasa anual, sin embargo, en el sector forestal se producen 0,22 MMt/año [6].

Nuestro país, tiene gran demanda de exportación de plátano verde, cual procede del género *Musa* de la familia *Musaceae*, de la especie *paradisiaca L*. Es una planta

¹ Universidad de Guayaquil; sanda.penam@ug.edu.ec ; <https://orcid.org/0000-0002-7848-8021> ; Guayaquil – Ecuador.

² Universidad de Guayaquil; eddie.zambranon@ug.edu.ec ; <https://orcid.org/0000-0003-0358-0402> ; Guayaquil – Ecuador.

³ Universidad de Guayaquil; sandra.fajardom@ug.edu.ec ; <https://orcid.org/0000-0002-2127-0777> ; Guayaquil – Ecuador.

⁴ Investigador Independiente; nahirperez11@hotmail.com ; Guayaquil - Ecuador.

⁵ Investigador Independiente; darlavaca22@outlook.es ; Guayaquil – Ecuador.

⁶ Universidad del Valle; pablo.fajardo@correounivalle.edu.co ; <https://orcid.org/0000-0001-5257-0548> ; Cali – Colombia.

herbácea de gran tamaño, que está compuesto por un rizoma, un pseudotallo, hojas, flores y fruto (racimo) [7]. Aproximadamente para obtener una tonelada de racimos de verde, se produjo de raquis 150 kg, de hojas 480 kg y el pseudotallo 3 toneladas, por lo que estos residuos son empleados como abono y alimento para animales [8].

El pseudotallo que se presenta en grandes cantidades de biomasa residual. Es un tallo formado de vainas anchas, su tamaño vario de 3,5 a 6 m y pesa alrededor de 50 kg. Esta estructura está compuesta por compuestos lignocelulósicos como: Celulosa, lignina, hemicelulosa y otros compuestos químicos (K, Na, Ca, Mn, P). Por sus propiedades puede emplearse como biomasa para la generación de energía, mediante la producción de biocombustibles y así contribuir con la disminución de emisiones de los gases que contaminan el ambiente. En la actualidad, Ecuador se ha dedicado a adoptar energías renovables como parte habitual de su suministro energético, y el empleo de biomassas representa el 1,99% de la producción de electricidad [9].

Este artículo de investigación trata sobre el empleo de la biomasa de *Musa paradisiaca* para la producción de biocombustible sólido en forma de pellet y de briqueta, para reducir los contaminantes que producen los combustibles fósiles eligiendo esta alternativa de remplazo para además, reducir la erosión del suelo, desertización, degradación de bosques y cultivos ya que, proporcionan una combustión limpia. Se utilizará los estándares de calidad establecido en las normas Enplus y NTC 2060 respectivamente. Además, se empleó la norma ASTM 3172-89 para los análisis proximales de biomasa y biocombustible sólido [10]. Por eso el objetivo de estudio es Determinar la eficiencia del poder calorífico de los biocombustibles sólidos en base al pseudotallo de Plátano (*Musa paradisiaca*).

1.1. Pseudotallo de Plátano

El pseudotallo tiene un peso cercano a los 50 kilogramos y su longitud oscila entre 3,5 y 7,5 metros, siendo su función principal sostener las hojas que emergen en la parte superior y el racimo. Estas hojas, de tono verde oscuro y considerable extensión, miden alrededor de 2 a 4 metros de longitud por 1,5 metros de ancho [11]. Su estructura se asemeja a un tronco de árbol, es de naturaleza herbácea y suelen tener un aspecto robusto y grueso debido a la acumulación de fibras vegetales. A diferencia de los árboles, los plátanos no tienen un tronco de madera sólido, en su lugar, el pseudotallo está compuesto por hojas dispuestas en capas concéntricas, que se sobreponen unas a otras. El pseudotallo también cumple la función de almacenar nutrientes y agua para el crecimiento de la planta [12].

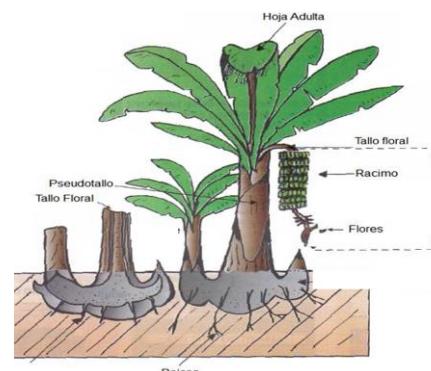


Figura 1 Planta de Plátano. Fuente: [13].

El cultivo de plátano en el Ecuador es de 128.861 hectáreas plantadas, el cual está repartido en 21 provincias como se muestra en la Figura 2, señala la producción de plátano a nivel nacional se obtuvo 763.455 toneladas.

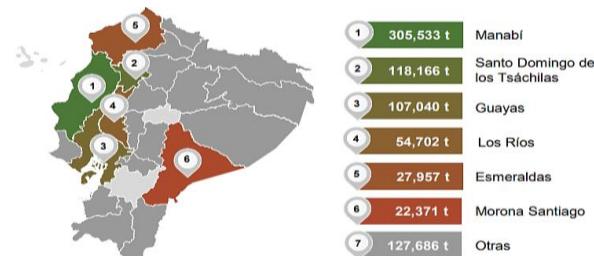


Figura 2 Distribución de producción. Fuente: [14].

A diferencia, en 2022 se registró en 133.145 hectáreas plantadas, como se observa en la Figura 3, se obtiene el tercer lugar en superficie plantada, se logrando una producción de 857.561,89 toneladas métricas y un rendimiento del 7,49 en toneladas/ hectáreas, el cual es el cuarto lugar en cultivos permanentes en el Ecuador. [2] [15].

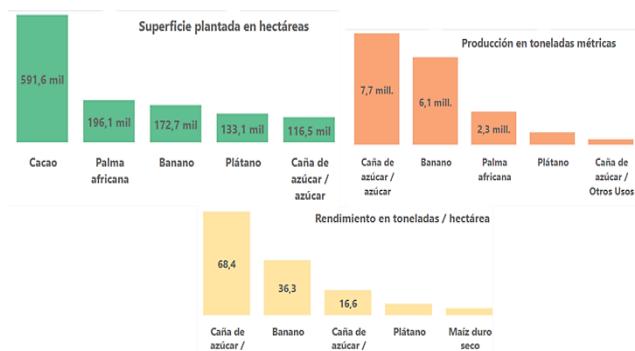


Figura 3 Superficie plantada de Plátano en el Ecuador 2022. Fuente: [2].

1.2. Biocombustible

Son carburantes que se fabrican con biomasa, lo que permite disminuir las emisiones de los gases invernadero, solo si sus procesos son sustentables, es decir que emitan una pequeña huella de carbono. En la generación de energía por combustión, la biomasa utilizada debe poseer porcentajes bajos de lignina, para de esta manera producir menores

cantidades de residuos carbonosos, de no ser así la degradación térmica producirá grandes cantidades de los mismos [1]. Estos biocombustibles se clasifican de acuerdo con su generación:

- Los biocombustibles de primera generación utilizan biomasas provenientes de cultivos agrícolas alimentarios.
- La segunda generación emplea biomasas lignocelulósicas procedentes de desechos forestales, agrícolas y urbanos.
- La tercera generación, su biomasa es de origen de especies no comestibles.
- Por último, la cuarta generación se fabrica de microrganismos modificados genéticamente [16].

También los biocombustibles se dividen de acuerdo con su estado en: Líquidos (Bioetanol, biodiesel, bioaceites), Sólidos (Pellet, astillas, briquetas, carbón) y Gaseosos (biogás, biometano, biohidrógeno) [17].

Esta investigación se enfoca en los biocombustibles sólidos (pellet y briquetas) que pertenecen a la segunda generación lo cual permite una huella de carbono nula, debido a que su materia prima son residuos lignocelulósicos que es una fuente biológica no explorada en su totalidad, la cual sería una gran alternativa de biomasa para la producción de biocombustibles [18].

1.3. Biocombustibles Sólidos

Los biocombustibles sólidos son formas de combustible elaboradas a partir de material orgánico de origen vegetal o animal que pueden emplearse en distintas aplicaciones para la generación de energía. Se adquieren a través de métodos físicos como compresión, astillado o trituración [19].

Específicamente, en la generación de energía eléctrica y térmica, se utilizan biocombustibles sólidos producidos a partir de los restos de biomasa de operaciones forestales o agroindustriales. La relevancia de los biocombustibles sólidos se encuentra en su gran capacidad para satisfacer las necesidades energéticas relacionadas con el aumento de la población. La utilización de biocombustibles sólidos posibilitará sustituir a los combustibles fósiles en la generación de electricidad y calor, al mismo tiempo que reducirá los inconvenientes ocasionados por los combustibles tradicionales [16]. Dentro de la gama de biocombustibles sólidos se encuentran las astillas, briquetas y pellets, los cuales son formas compactas con una alta capacidad calorífica [20].

Los principales componentes empleados en la producción de biocombustibles sólidos son derivados de materiales lignocelulósicos, los cuales provienen de la agricultura o la silvicultura, por ello los desechos provenientes de la agroindustria tienen múltiples usos potenciales, incluyendo la creación de abono orgánico o la fabricación de biocombustibles [16].

Tabla 1 Tipos de Biocombustibles Sólidos.

Tipos	Provienen/fuente	Uso
Astilla	Residuos agrícolas y forestales.	Hornos de panadería, cerámicos, en pequeñas industrias, viviendas y calefacción.
Carbón Vegetal	Cultivos leñosos.	Industria Agroalimentarios.
Pellet y Briqueta	Residuos Madera y residuos vegetales.	Doméstico.
	Industria Maderera.	Combustible: en áreas industriales y de envergadura.
	Ejemplo: Teca, alfalfa, etc.	

Nota: Información obtenida de [21]. Fuente: [22].



Figura 4 Tipos de Biocombustibles Sólidos. Fuente: [21].

A continuación, algunas características de pellet y briquetas.

1.3.1. Pellet

Son de biocombustibles de forma cilíndrica, de diferente tipo de biomasa de la cual va a depender su color (vegetal, animal, residuos sólidos agroindustriales y urbanos), donde su rango de dimensiones es: diámetro de 6-8 mm y de 3,15-40mm de longitud. Donde la propiedad fundamental es el poder calorífico $\geq 16,5 \frac{MJ}{Kg}$. Otras propiedades son su porcentaje de humedad de $\leq 10\%$ este valor determina la cantidad de energía que producirán los pellets cuando sean sometidos a combustión, e otras palabras, si el contenido de agua es alto, en la combustión se eliminará primero esta y luego se producirá calor obteniéndose un bajo poder calorífico [23]. Además, la ceniza debe ser $\leq 0,7\%$ y una densidad aparente de $600 \frac{Kg}{m^3} - 750 \frac{Kg}{m^3}$, estas propiedades son de acuerdo a la Norma En Plus [24].



Figura 5 Pellets. Nota: Pellets producidos de cascarilla de Arroz. Fuente: [25].

1.3.2. Briquetas

Son bloques sólidos de forma variada (las más utilizadas rectangular y redonda), las cuales poseen un diámetro superior a 5 cm y una longitud entre. Donde la propiedad fundamental es el poder calorífico de $12.500\text{--}21.000 \frac{\text{MJ}}{\text{Kg}}$. Otras propiedades son su porcentaje de humedad de 2,5% y ceniza 30% estas propiedades son de acuerdo a la Norma Colombiana [26].



Figura 6 Briquetas. Nota: Briquetas de diferentes materias y formas.
Fuente: [27].

1.4. Biomasa

Es un tipo de energía renovable que se obtiene a partir de la materia orgánica, como los residuos agrícolas, forestales, alimentos, estiércol, entre otros. Esta materia orgánica se puede utilizar como combustible para la generación de calor, electricidad y biocombustibles (Tepale Gómez, 2020). Además, la biomasa es una fuente de energía renovable, ya que proviene de organismos biológicos que pueden ser cultivados y regenerados en un período de tiempo relativamente corto [20]. Esto la convierte en una opción sostenible para la producción de energía, a diferencia de los recursos fósiles que son limitados y no se pueden regenerar [28].

Otro beneficio de la biomasa es que su procesamiento y utilización no requiere de tecnologías complejas. Puede utilizarse directamente en forma de leña, pellets o briquetas, o puede convertirse en diferentes formas de energía como electricidad, calor o biogás a través de procesos de combustión, gasificación o fermentación [6].

El uso de la biomasa como recurso energético tiene varias ventajas en comparación con el petróleo, carbón y gas [6]:

-Mejora de la situación socio-económica de las áreas rurales: El aprovechamiento de los residuos agrícolas para generar energía a partir de biomasa puede generar empleo e ingresos en las zonas rurales, impulsando el desarrollo económico de estas áreas [6].

-Reducción de emisiones contaminantes: Al utilizar biomasa en lugar de combustibles fósiles, se reducen las emisiones de contaminantes como azufre, partículas, monóxido de carbono (CO), metano (CH₄) y óxidos de nitrógeno (NO_x), lo cual tiene un impacto positivo en la calidad del aire y la salud pública [6].

-Ciclo neutro de CO₂: La biomasa tiene la ventaja de ser un recurso renovable y su combustión no contribuye al efecto invernadero de manera significativa, ya que el dióxido de carbono (CO₂) liberado durante la quema es el mismo que fue absorbido por las plantas durante su crecimiento [29]. Esto ayuda a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y a mitigar el cambio climático.

-Potencial de América Latina y el Caribe: Estas regiones cuentan con una gran cantidad de recursos naturales y agrícolas, lo que las posiciona como potenciales productores de biomasa. El desarrollo de la bioeconomía en estas áreas puede impulsar su desarrollo socioeconómico, así como promover la seguridad energética y reducir la dependencia de los combustibles fósiles [6].

En resumen, el uso de biomasa como recurso energético presenta diversas ventajas, tanto a nivel socioeconómico como ambiental, lo que la convierte en una alternativa interesante y sostenible en comparación con los combustibles fósiles tradicionales [6].

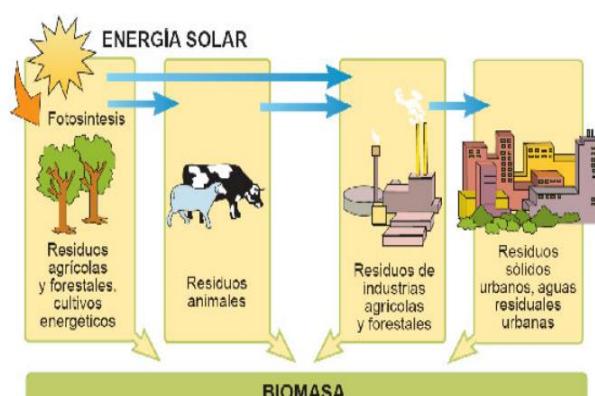


Figura 7 Biomasa. Fuente: [21].

1.5. Características

1.5.1. Contenido de Humedad

Para el ensayo se siguió el procedimiento de la normativa ASTM D-3173, en la cual se empleó la fórmula:

$$\%H = \frac{A - B}{A} * 100 \quad (1)$$

Donde:

A: gramos de muestra inicial en g.

B: gramos de muestra final en g.

1.5.2. Contenido de Ceniza

El contenido de cenizas de una masa se determina de acuerdo con la cantidad de minerales que contiene y para ello se emplea la siguiente fórmula [30].

$$\%C = \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} * 100 \quad (2)$$

m_1 : Masa del crisol vacío y tapa.

m_2 : Masa del crisol y tapa + 1 g de muestra.

m_3 : Masa del crisol y tapa + la muestra calentada de la mufla.



1.5.3. Densidad

Para esta prueba se pesó los biocombustibles y se obtuvo su volumen determinado, para luego aplicar la siguiente ecuación:

$$d = \frac{m}{v} \quad (3)$$

d= densidad

m = masa

v = volumen

1.5.4. Poder Calorífico

Es la cantidad de energía que se puede obtener al quemar una sustancia. Se refiere a la capacidad de una sustancia para producir calor al realizar una reacción química de combustión completa [31]. El poder calorífico se mide en unidades de energía por unidades de masa como julios o calorías.

1.5.5. Material Volátil:

Este ensayo del porcentaje del material volátil se trabajó de acuerdo con la norma [32], mediante la siguiente ecuación:

$$\%MV = \left(\frac{m_2 - m_3}{m_2 - m_1} * 100 \right) - h \quad (4)$$

m_1 : Masa del crisol vacío y tapa.

m_2 : Masa del crisol y tapa +1 g de muestra.

m_3 : Masa del crisol y tapa + la muestra

1.5.6. Carbón Fijo

Es la resta de 100 y el resultado de la sumatoria del porcentaje de humedad, ceniza y material volátil [33].

$$C.Fijo = [100 - (H\% + C\% + MV\%)] \quad (5)$$

H: Porcentaje de humedad.

C: Porcentaje de ceniza.

MV: Porcentaje de material volátil.

2. Materiales y métodos.

Área de estudio

El área de estudio comprende el lote 9 de la urbanización Canaán I del Cantón Cumandá (Chimborazo-Ecuador).

2.1. Metodología

La metodología del estudio está dividida en 3 secciones: (1) Obtención y acondicionamiento de la biomasa (materia prima), (2) elaboración de Pellet y briqueta y (3) Métodos de Caracterización física, análisis proximal, estructural y el anova respectivo.

2.2. Obtención y acondicionamiento de la biomasa

La elección de esta biomasa se basa en su abundante disponibilidad como residuo agrícola en el Ecuador y su alto contenido de componentes lignocelulósicos, adecuados para la producción de biocombustibles sólidos. Este paso inicial también incluye un análisis de las condiciones de crecimiento de las plantas para asegurar uniformidad en las muestras, incluyendo datos de la edad de la planta, condiciones del suelo, y época de cosecha.

Las muestras de pseudotallo de plátano de las especies dominico y barraganete se recolectaron aleatoriamente después de la cosecha, luego se procedió a cortar en forma rectangular (2cmx5cm) y los trozos fueron expuestos al sol por 8 días, para reducir el contenido de humedad. Se siguió con secado de las muestras mediante una estufa a la temperatura de 60°C por 12 horas en latas de aluminio. Luego, se introdujo en un molino de martillo, con el fin de disminuir su tamaño, para después colocar en una máquina vibradora por 5 minutos, hasta que las partículas disminuyeron a un tamaño de malla de 0,8 mm, 0,63 mm y 0,315 mm. Para terminar con el acondicionamiento de la biomasa se eliminó la humedad a 100°C por 6 h.

2.2.1. Composición Química de la Biomasa

El análisis proximal, realizado según la norma ASTM D3172-89 para determinar el contenido de celulosa, hemicelulosa y lignina. La composición promedio obtenida fue de 31.27% de celulosa, 15.07% de hemicelulosa y 23.9% de lignina, lo que evidencia un alto contenido energético adecuado para su uso en biocombustibles.

2.3. Elaboración de pellet y briqueta

En esta etapa se homogenizó la biomasa con el aglutinante de acuerdo con las composiciones seleccionadas donde se utilizó las siguientes cantidades de biomasa- aglutinante.

Tabla 2 Composiciones de los Biocombustibles Sólidos.

Composición	Cantidad de Biomasa (g)	Cantidad de aglutinante (g)	Cantidad de Residuo (g)	Cantidad de Biocombustibles
Pellet 50-50	26	26	2	14 Pellets
Pellet 55-45	28,6	23,4	2	13 Pellets
Pellet 60-40	31,2	20,8	3	11 Pellets
Briquetas 50-50	205	205	8	6 Briquetas
Briquetas 55-45	270,6	221,4	6	6 Briquetas
Briquetas 60-40	246	164	11	6 Briquetas

Nota: Información Obtenida de [22].

Con las cantidades empleadas en cada composición se obtuvo una masa compacta por medio de la peletizadora y briquetadora. Para finalizar con el secado al ambiente por 72 h de los pellets y las briquetas producidos.

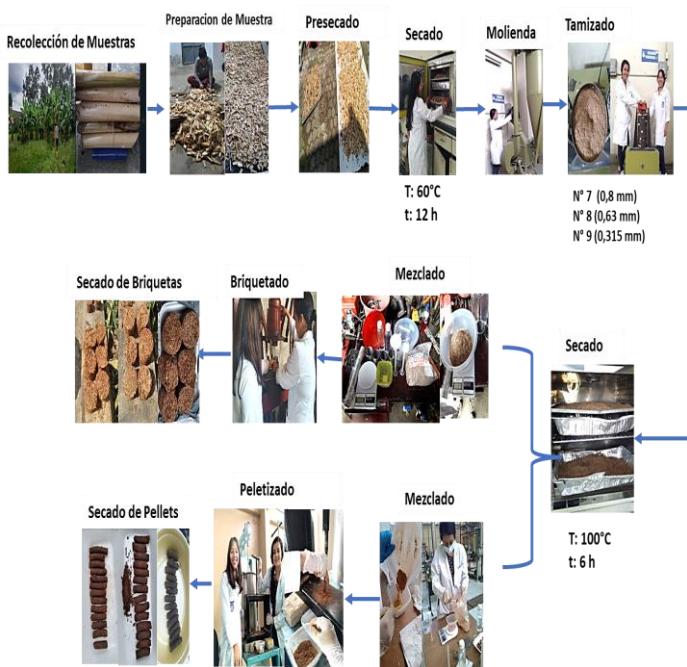


Figura 8 Diagrama de Flujo. Fuente: [22].

2.4. Métodos de caracterización física, análisis proximal, estructural y el anova.

El poder calorífico fue evaluado mediante una bomba calorimétrica bajo el estándar ASTM D5865. Este análisis incluyó la medición del contenido energético en MJ/kg de las muestras producidas en diferentes composiciones. Además, se utilizó el análisis estadístico ANOVA y la prueba post-hoc de Tukey para determinar la significancia de las diferencias entre las composiciones de pellets y briquetas

2.4.1. Caracterización física

En esta caracterización se basó con los procedimientos de la norma ASTM S3172-89 para el contenido de humedad para la biomasa molida. En cambio, para los biocombustibles sólidos se aplicó la misma norma de contenido de húmeda y se halló la densidad de estos.

Los análisis preliminares son esenciales para comprender la composición del pseudotallo. Puedes incluir un análisis de la cantidad de celulosa, hemicelulosa y lignina, que son elementos clave en el poder calorífico de la biomasa.

Basado en estudios anteriores, el pseudotallo de plátano presenta valores altos de celulosa (entre 30-60%) y lignina, lo que indica su idoneidad como biocombustible sólido

2.4.2. Análisis proximal

Se realizó la caracterización de la biomasa molida empleando la norma ASTM D3172-89, que describe los métodos de determinación del contenido de ceniza, material volátil y carbón fijo. Para el estudio del poder calorífico se aplicó la norma ASTM D240 a cargo del laboratorio LAQUINS ESPOL.

2.4.3. Análisis Estructural

Las muestras se enviaron al laboratorio LAQUINS ESPOL, para la caracterización de lignina, celulosa y hemicelulosa. Estos análisis se realizaron según la norma TAPPI T 203 y 222.

2.4.4. Anova

Es el procedimiento estadístico utilizado para evaluar hipótesis se conoce como ANOVA y se emplea para contrastar dos o más promedios asociados a un factor común. Este método es aplicado al conjunto de datos, el cual genera variaciones, donde se somete a condiciones distintas donde se verifica si es similar o desigual. Posee hipótesis Nula y Alterna, que para rechazarse la hipótesis nula no debe cumplir la condición de una de las medias sea diferente del resto. Y en cambio para que la hipótesis alterna sea rechaza todas las medias deben ser iguales [34].

2.4.5. Método de Tukey

El método Tukey complementa la información obtenida de ANOVA, permitiendo comparar las medias muestrales conseguidas de un ensayo experimental. El valor $T\alpha$ se calcula a partir de la siguiente ecuación (Cajal, 2022):

$$T\alpha = q\alpha(K, N - K)\sqrt{CM_E/n_i} \quad (6)$$

$T\alpha$ = número HSD (Diferencia Honestamente Significativa)
 $q\alpha$ = cuantiles de la distribución de tukey (tabla con significancia relativa de 0,05% igual a 95% de confiabilidad)

n = número de repeticiones del estudio

CM_E = factor Cuadrado Medio del Error representa el error estándar de cada promedio

La prueba tukey establece que cuando la variación entre dos medias es mayor al valor de $T\alpha$, se considera desigual, no obstante, si la diferencia es inferior se estima que es estadísticamente idéntico [35].

3. Análisis e Interpretación de Resultados.

La caracterización física, análisis proximal y estructural que presenta la biomasa molida de pseudotallo de plátano se muestra en la tabla 3.

Tabla 3 Resultados de la Caracterización de la Biomasa

Parámetro	Unidad	Resultado	Método de Análisis
*Poder calorífico	MJ/Kg	14,44	ASTM D240
Humedad	%	4,24	ASTM D3172-89
Ceniza	%	6,76	ASTM D3172-89
Material Volátil	%	80,65	ASTM D3172-89
Carbón Fijo	%	8,34	ASTM D3172-89
*Lignina	%	23,9	TAPPI T 222
*Hemicelulosa	%	12,9	TAPPI T 203
*Celulosa	%	13,7	TAPPI T 203

Nota: Los análisis se realizaron en el Laboratorio de nuestra Facultad.

*Resultado tomado del informe del Laboratorio Laquins Espol. Fuente: [36].

Los resultados del análisis proximal de la biomasa procedente del pseudotallo de plátano, correspondientes a



4,240%, 6,761%, 80,659% y 8,3406% para el porcentaje de humedad, ceniza, material volátil y carbón fijo respectivamente, al igual que se obtuvo 14,447 MJ/Kg de poder calorífico, que conforme a la norma En plus y la norma colombiana NTC 2060 es un valor cercano al límite permisible de contenido energético para la elaboración de biocombustibles sólidos.

Por otra parte, los resultados del análisis proximal realizados a la biomasa señalaron que se obtuvo un 23,9% de lignina, representando el mayor componente del pseudotallo de plátano siguiéndole con fracciones más bajas la hemicelulosa y celulosa con los porcentajes de 12,9% y 13,7% respectivamente. Estos valores permitieron que en la etapa de mezclado se obtengan combinaciones homogéneas.

Tabla 4 Comparación de los parámetros de los resultados del Pellet con la Norma española.

Parámetro	Unidad	50%-50%	55%-45%	60%-40%	ENplus
*Poder calorífico	$\frac{MJ}{Kg}$	22,566	22,657	20,835	Cumple
Humedad	%	5,190	6,888	6,403	Cumple
Ceniza	%	3,641	3,425	4,248	No cumple
Material Volátil	%	87,001	86,301	86,181	-
Carbón Fijo	%	2,685	3,385	3,167	-
Densidad	$\frac{Kg}{m^3}$	750	650	273	Cumple ^{1 y 2}

Nota: Los análisis se realizaron en el Laboratorio de nuestra Facultad.

*Resultado tomado del informe del Laboratorio Laquins Espol. Fuente: [36] y Autores.

En la Tabla 4, se especifican los resultados del análisis proximal de pellets. Dado que el contenido de humedad en los biocombustibles es un factor importante ya que a medida que este disminuye el poder calorífico aumenta, se puede deducir que esto no se ve reflejado en los pellets obtenidos, ya que conforme aumenta el contenido de humedad de 5,19% también lo hace su poder calorífico de acuerdo con las composiciones 50-50 y 55-45, lo cual significa que el calor liberado en la combustión que es utilizado para evaporar el agua, no influye desfavorablemente en el poder calorífico. Teniendo en cuenta que la composición 55-45 tiene 22,566 MJ/kg de PC se considera que los pellets cumplen con los parámetros de calidad de biocombustible sólido ideal para la producción de energía, conforme a la norma ENplus.

De acuerdo con la Norma Española, el valor de densidad de pellets debe ser mayor o igual a $600 \frac{Kg}{m^3}$, por lo tanto, las composiciones 50-50 y 55-45 obedecen a esa condición, dado que constan con una densidad de $750 \frac{Kg}{m^3}$ y $650 \frac{Kg}{m^3}$, no obstante, con los datos obtenidos del contenido de ceniza en

pellet, ninguna composición cumple con ese parámetro, sin embargo, la composición 60-40 tiene mayor porcentaje de ceniza lo que se puede relacionar con que la biomasa contenga un contenido de compuestos inorgánicos elevado. El contenido de ceniza es inversamente proporcional al poder calorífico.

Tabla 5 Comparación de los parámetros de los resultados del Briqueta con la Norma NTC.

Parámetro	Unidad	50%-50%	55%-45%	60%-40%	Norma NTC
*Poder calorífico	$\frac{MJ}{Kg}$	22,680	19,907	19,416	Cumple
Humedad	%	5,005	4,357	4,132	No cumple
Ceniza	%	2,736	3,613	4,512	Cumple
Material Volátil	%	85,576	87,425	87,4227	No cumple
Carbón Fijo	%	6,682	4,603	3,882	Cumple
Densidad	$\frac{Kg}{m^3}$	569,4	592,9	376,7	-

Fuente: [36] [22].

Como se puede observar en la tabla 5, los resultados obtenidos de las pruebas fisicoquímicas: el contenido de humedad está vinculado con el contenido energético, en este caso se visualiza que a menor contenido de humedad se obtiene menor poder calorífico, por lo que en la composición 60-40 se obtuvo mayor contenido de humedad e igual mayor contenido de energía, por lo que se considera que esta característica no afecta al poder calorífico en este tipo de biocombustible, el cual comprende que la composición 50-50 con $22,680 \frac{MJ}{Kg}$ tiene mayor contenido energético con respecto a las proporciones de 55-45 y 60-40 con $19,907 \frac{MJ}{Kg}$ y $19,416 \frac{MJ}{Kg}$ respectivamente, en cierta medida aunque los porcentajes del contenido de humedad no están dentro de los límites permisibles de la norma NTC 2060, su PC, si lo está, al igual que el contenido de ceniza.

El análisis proximal de cada briqueta indica que la composición de 55-45 tiene una mayor densidad de $592,9 \frac{Kg}{m^3}$, le sigue la proporción 50-50 con $569,40 \frac{Kg}{m^3}$ y 60-40 con un valor menor de $376,7 \frac{Kg}{m^3}$.

4. Discusión

4.1. Comparación del poder calorífico entre pellet y briqueta

Tabla 6 Biocombustible Sólido Idóneo.

Parámetro	Unidad	Pellet 50%-50%	Pellet 55%-45%	Briqueta 50%-50%	Briqueta 55%-45%
Poder calorífico	$\frac{MJ}{Kg}$	22,566	22,657	22,680	19,907

Fuente: [36].

En los pellets de la composición 55-45 se obtuvo mayor poder calorífico (PC), pero en la 50-50 disminuyó, dando



22,657 $\frac{MJ}{Kg}$ y 22,566 $\frac{MJ}{Kg}$ respectivamente. Por otra parte, en las briquetas dio alto contenido energético en la composición de 50-50 con un 22,680 $\frac{MJ}{Kg}$, en cambio en la 55-45 se redujo a 19,907 $\frac{MJ}{Kg}$. Por lo tanto, se considera que la utilización del pseudotallo de plátano como biomasa para el aprovechamiento energético dio un resultado óptimo en la briqueta de composición 50-50, de acuerdo con el PC.

Cabe considerar, que la configuración 55-45 de pellet no tiene variación significativa en el PC en comparación a la composición 50-50 briqueta, por ello se consideró que la *Musa paradisiaca* es apta como materia prima para la producción de biocombustibles sólidos en las proporciones mencionadas.

Tabla 7 Varianza de resultados de poder calorífico de pellets.

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Composición 50-50%	3	67,697	22,6566667	1,23333E-05
Composición 55-45%	3	67,972	22,6573333	1,23333E-05
Composición 60-40%	3	62,506	20,8353333	1,23333E-05

Fuente: [22].

Tabla 8 ANOVA.

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	6,32214022	2	3,16107011	256302,98	1,60E-15	5,1432528
Dentro de los grupos	7,4E-05	6	1,23333E-05			
Total	6,32221422	8				

Fuente: [22].

Decisión

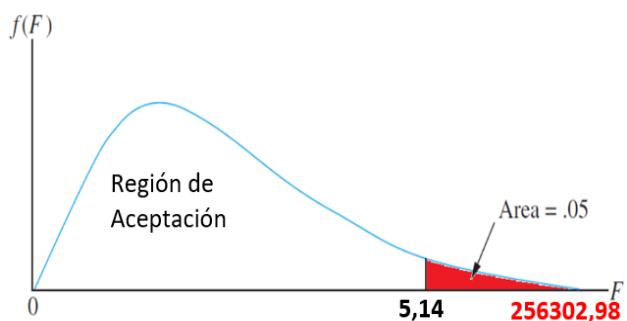


Figura 9 Distribución F. Fuente: [37].

La figura 9, señala que el valor correspondiente a F sobrepasa el valor crítico 5,14 de acuerdo con la zona de aceptación, habiendo diferencia significativa se rechazó la hipótesis nula.

Tabla 9 Prueba Tukey a Pellets según su poder calorífico.

Composiciones A(50-50); B(55-45);C(60-40)	Diferencia muestral	Decisión
$\mu_A - \mu_B$	0,09	Significativa
$\mu_A - \mu_C$	1,73	Significativa
$\mu_B - \mu_C$	1,82	Significativa

Nota: μ = promedio de muestra en valor absoluto. Fuente: [22].

Según la prueba Tukey los valores de la diferencia muestral expresada en valor absoluto son comparados con el de Tukey $T_\alpha = 0,009$, mostrando diferencia significativa en más de una prueba, lo cual indica que hipótesis nula es rechazada y la hipótesis alterna, aceptada.

Tabla 10 Varianza de resultados de poder calorífico de briqueta.

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Composición 50-50%	3	68,042	22,681	9,33333E-06
Composición 55-45%	3	59,721	19,907	9E-06
Composición 60-40%	3	58,248	19,416	1E-06

Fuente: [22].

Tabla 11 ANOVA.

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	18,59235622	2	9,2961781	1442510,3	8,99506E-18	5,1432528
Dentro de los grupos	3,86667E-05	6	6,44E-06			
Total	18,59239489	8				

Fuente: [22].

4.2. Decisión



Figura 10 Distribución F. Fuente: [37].

En la Figura 10, se muestra la distribución de los valores F con una probabilidad de significancia de 0,05. Se rechaza la hipótesis nula, ya que el valor de F esta fuera de la región de aceptación señalando diferencia significativa entre los valores de poder calorífico de las briquetas.

**Tabla 12** Prueba Tukey a Pellets según su poder calorífico.

Composiciones A(50-50); B(55-45);C(60-40)	Diferencia muestral	Decisión
$\mu_A - \mu_B$	2,77	Significativa
$\mu_A - \mu_C$	3,26	Significativa
$\mu_B - \mu_C$	0,49	Significativa

Nota: μ = promedio de muestra en valor absoluto. Fuente: [22].

En la *Tabla 12*, muestran que los valores de diferencia muestral dados en valor absoluto son superiores en comparación al valor de $T\alpha = 0,006$, lo que indica que todas las composiciones tienen diferencia significativa aprobando la hipótesis alterna, que especifica que por lo menos un valor debe ser diferente a los demás, al contrario de la hipótesis nula que expresa que la diferencia de los valores de las medias deben ser iguales, es decir no muestran diferencia significativa, para ser aceptada.

5. Conclusiones.

Los residuos de la planta de plátano son una materia prima generada en grandes cantidades en Ecuador. En esta investigación se determinó la eficiencia de los biocombustibles sólidos a partir del análisis de poder calorífico dando como resultado, que tanto pellets y briquetas están dentro de la normativa para biocombustibles sólidos, con un 22,657 MJ/Kg y 22,680 MJ/Kg respectivamente. Por lo que se evidencia que el biocombustible sólido con mayor poder calorífico es la briqueta a base de pseudotallo de plátano, donde se alcanzó un 5% de humedad y un rendimiento de producción del 98,04%. Por lo tanto, los resultados demuestran que el pseudotallo de Plátano es viable y una gran alternativa de biomasa para la producción de briquetas, debido a que desde la biomasa molida se alcanzó $14,44 \frac{MJ}{Kg}$ de poder calorífico, la cual se destaca porque sin la aplicación de una sustancia aglomerante cumple con la Norma NTC 2060 donde establece que para que sea catalogada como briqueta su poder calorífico debe estar entre el rango de $12,5 - 21 \frac{MJ}{Kg}$. Además, con esta investigación se da el inicio para más estudios sobre los residuos de la planta de plátano, en el cual se use el 100% de biomasa sin necesidad de aglomerantes, donde se podría reducir la cantidad de residuos de esta planta, para la generación de energía de forma renovable y con una huella de carbono nula, lo cual contribuye al cuidado del medio ambiente.

6.- Author Contributions (Contributor Roles Taxonomy (CRediT))

1. Conceptualización: Nahir Alondra Pérez
2. Investigación: Nahir Alondra Pérez
3. Metodología: Nahir Alondra Pérez
4. Administración del proyecto: Sandra Peña
5. Recursos: Sandra Peña

6. Supervisión: Sandra Peña
7. Validación: Darla Vaca
8. Visualización: Sandra Peña
9. Redacción - borrador original: Nahir Alondra Pérez y Sandra Peña
10. Redacción - revisión y edición: Sandra Fajardo
11. Reseña: Eddie Zambrano y Pablo Fajardo

7.- Referencias.

- [D. A. Aguilar Romero, «Determinación del potencial energético de la biomasa residual del cultivos de banana en el Cantón Machala, el Oro, Ecuador.,» Noviemvre 2019. [En línea]. Available: <https://dspace.ups.edu.handle/123456789/18090>.
- [INEN, ESPAC, «Superficie de bajo labor agropecuario,» 2022. [En línea]. Available: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiZTEyY2NiZDItYjIzYi00ZGQ1LTlkNGEtNDE1OGViM2Q1N2VlliwidCl6ImYxNThhMmU4LWNhZWMiNDQwNi1iMGFiLWY1ZT1OWJkYTExMiJ9&pageName=ReportSection>.
- [UPM, «El plátano, más residuos que producto. ¿Una fuente de bioenergía?,» 17 Mayo 2016. [En línea]. Available: <https://www.upm.es/UPM/SalaPrensa/Noticias?fmt=detail&prefmt=articulo&id=8b69e368289a4510VgnVCM10000009c7648a>.
- [C. Jiménez Coello, «Evaluación de polímeros presentes en pseudotallos de Musa acuminata AAA, Musa sapientum ABB y Musa paradisiaca AAB para la elaboración de bioplástico.,» 2017. [En línea]. Available: https://ecosur.repositoryinstitutional.mx/jspui/bitstream/1017/1586/1/10000058414_documento.pdf.
- [R. A. Sanchez Landi, «Evaluación Del Aporte De Residuos De Pseudotallo En El Crecimiento Y Vigor De Plantas De Banano (Musa Aaa),» 2021. [En línea]. Available: <https://cia.uagraria.edu.ec/Archivos/SANCHEZ%20LANDI%20ROS A%20ANGELICA.pdf>.
- [Y. Vargas-García, J. Pazmiño-Sánchez y J. Dávila-Rincón, «Potencial de biomasa en América del Sur para la producción de bioplásticos. Una Revisión,» 2022.
- [J. E. Pincay Moran, J. F. Ramírez Salcan, A. F. López Vargas, F. J. Duque-Aldaz, W. Villamagua Castillo y R. Sánchez Casanova, «Evaluation and Proposal for an Environmental Management System in a Mango Plantation,» *INQUIIDE*, vol. 7, nº 1, p. 23–34, 2025.
- [L. E. Velázquez Áraque, J. M. Aguilar Sierra y E. A. Tulcán Álvarez, «Study of the energy potential of pelletized Ecuadorian rice husk for use as fuel,» *INQUIIDE*, vol. 2, nº 1, p. 44–51, 2022.
- [J. Serrano, W. Mejía, J. Ortiz, A. Sánchez y S. Zalamea, «Determinación del Potencial de Generación Eléctrica a Partir de Biomasa en el Ecuador,» *Revista de la Facultad de Ciencias Químicas*, nº 17, 18 Septiembre 2017.
- [S. E. Fajardo Muñoz y V. M. Lituma Mandujano, «Pellet processing using the peel of breadfruit (*Artocarpus Altilis*) to be used as a biofuel,» *INQUIIDE*, vol. 2, nº 2, p. 21–33, 2022.
- [ECORAE;UMDS;OEA;INIAP;GTZ, Compendio de recomendaciones tecnológicas para los principales cultivos de la Amazonía ecuatoriana, Quito, 2001, p. 120.
- [J. Domingues Lima, N. De Souza Bravo, D. Eduardo Rozane, E. Shigueaki Nomura, S. Modenese Gorla da Silva y E. Nardini Gomes, «Waste management of pseudostem to increase the growth of banana seedlings,» 2020.
- [D. E. Carchi Maurat, «Aprovechamiento de los Residuos Agrícolas provenientes del cultivo de Banano para obtener Nanocelulosa,» 2014. [En línea]. Available: <http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/5292/1/tesis.pdf>.



- [INEC, ESPAC, «Boletín Situacional,» 2021. [En línea]. Available: 1 http://sipa.agricultura.gob.ec/boletines/situacionales/2021/boletin_situacion_platano_2021.pdf.]
- [INEC, ESPAC, «Ficha de Cultivo (Musa AAA),» 2022. [En línea]. Available: <http://sipa.agricultura.gob.ec/index.php/platano>.]
- [I. M. Ríos Badrán, J. Santos Cruz y C. Gutiérrez Antonio, «Biocombustibles Sólidos: Una solución al calentamiento global,» *Ciencia*, vol. 68, nº 4, pp. 1-7, Diciembre 2017.]
- [M. U. Arteaga Peñafiel, M. Briones Córdova y P. Velásquez Pionce, «Extraction and application of essential oils from feijoa as a preservative in the production of fine dough sausages,» *INQUIIDE*, vol. 3, nº 12, p. 64-74, 2023.]
- [M. D. Cortés Sánchez, E. Gata Montero, A. Pipió Ternero, Á. Rodríguez Rivas y J. Sánchez Santos, «Biocombustibles: Tipos y estrategias de producción,» *MOLEQLA*, nº 35, pp. 20-25, 16 10 2019.]
- [F. J. Duque-Aldaz, E. R. Haymacaña Moreno, L. A. Zapata Aspiazu y F. Carrasco Choque, «Prediction of moisture content in the cocoa drying process by simple linear regression.,» *INQUIIDE*, vol. 6, nº 2, pp. 20-20, 2024.]
- [S. E. Peña Murillo y E. M. Zambrano Nevárez, Biocombustibles Aprovechamiento de la Biomasa, Primera ed., Savez, 2021, p. 183.]
- [A. I. De Lucas Herguedas, Biomasa, Biocombustible y Sostenibilidad, Palencia, 2012, pp. 77-152.]
- [N. A. Pérez Ortiz y D. R. Vaca Choez, «Aprovechamiento del pseudotallo de plátano (*Musa paradisiaca*) como alternativa para,» 09 2023. [En línea]. Available: <http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/70726>.]
- [J. M. Aguilar Sierra y E. A. Tulcám Álvarez, Artists, *Estudio del potencial energético de la cáscara de arroz ecuatoriano peltizado para su uso como combustible*. [Art]. Universidad de Guayaquil, 2018.]
- [European Pellet Council, «Esquema de certificación de calidad para pellet de madera,» Agosto 2015. [En línea]. Available: <https://enplus-pellets.eu/es/component/attachments/?task=download&id=162:ENplus-Manual-Espaa-vs-3>.]
- [I. Ríos Badrán, I. Lizardo Ocampo, J. Santos Cruz, G. T. Juan y C. Gutiérrez Antonio, «iocombustibles sólidos: Una alternativa económica y sostenible para la generación de energía eléctrica en México,» *Digital Ciencia*, vol. 12, nº 2, pp. 61-66, 12 2019.]
- [NTC 2060, «NTC 2060 - Briquetas combustible para uso doméstico,» ICONTEC, 04 Noviembre 1987. [En línea]. Available: <https://tienda.icontec.org/gp-briquetas-combustibles-para-uso-domestico-ntc2060-1987.html>. [Último acceso: 19 12 2024].]
- [INTEREMPRESAS, «Briquetar para aprovechar,» 24 10 2011. [En línea]. Available: <https://www.interempresas.net/Mantenimiento/Articulos/57083-Briquetar-para-aprovechar.html>.]
- [S. Peña, E. Zambrano, D. Bermeo, F. Reyes, C. Forero, F. Velasco y E. Arango, «Evaluation of Sugarcane Cutting Residues for the Production of Solid Biofuel,» *Migration Letters*, vol. 20, nº S5, pp. 928-940, 24 08 2023.]
- [S. Peña Murillo y J. López Galán, «Desarrollo sostenible y oportunidad de aprendizaje de las biorrefinerías: Una alternativa de la biomasa,» *Revista de Ciencias Sociales*, vol. 26, pp. 401-411, 2020.]
- [ASTM D-3174, «Standard Test Method for Ash in the Analysis Sample of Coal and Coke,» 2012.]
- [L. V. Bermeo Valencia, «Obtención de biocarbón mediante torrefacción seca a partir de residuos de balsa (*Ochroma pyramidale*),» EPN, Quito, 2018.]
- [ASTM D-3175, «Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis Sample of Coal and Coke,» 2018.]
- [ASTM D-3172, «Standard Practice For Proximate Analysis of Coal and Coke,» 2002.]
- [C. Camacho, «Análisis de varianza,» Universidad de Sevilla, Sevilla, 2020.]
- [A. Cajal, «Prueba de Tukey,» Lifeder, 15 12 2022. [En línea]. Available: <https://www.lifeder.com/prueba-de-tukey/>. [Último acceso: 15 01 2025].]
- [LAQUINS-ESPOL, «Informe de análisis,» Guayaquil , 2023.]
- [E. Camones Ibarra, Dirección, *Cómo realizar el Análisis de Varianza ANOVA*. [Película]. 2021.]