

Análise do poder calorífico de pellets e briquetes no uso do pseudocaule de banana (*Musa paradisiaca*).

*Análisis del poder calorífico de pellets y briquetas en el aprovechamiento del pseudotallo de Plátano (*Musa paradisiaca*).*

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

Recebido: 12/09/2024 – Aceite: 20 /04/2025 – Publicado: 01/07/2025

Artigos de
Investigação

Artigos de
Revisão

Artigos de
Ensaio

* Autor para correspondência.



Resumo.

Os biocombustíveis sólidos pertencem à segunda geração de acordo com o tipo de biomassa obtida a partir de resíduos agrícolas, florestais e industriais, como o pseudocaule de banana, que é uma biomassa lignocelulósica que pode ser usada como alternativa para a geração de energia renovável na forma de pellets e briquetes devido às suas propriedades energéticas. O estudo tem como objetivo determinar a eficiência do poder calorífico de biocombustíveis sólidos à base de pseudocaule de banana-da-terra (*Musa paradisiaca*). A metodologia do estudo foi dividida em três partes: (1) obtenção e condicionamento de biomassa, (2) elaboração de biocombustíveis sólidos e (3) análise do potencial físico, proximal e energético da biomassa e respectiva ANOVA de pellets e briquetes. Encontrou-se alto poder calorífico para as composições 55-45% em pellet com 22.657 MJ/kg e 50-50% em briquete com 22.680 MJ/kg, atendendo aos parâmetros estabelecidos nas normas ENplus e NTC 2060, respectivamente.

Palavras-chave.

Pseudocaule, Biomassa, Poder calorífico, Pellet e Briquete.

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.

1. Introdução

O Equador é um país que produz grandes quantidades de biomassa e resíduos lignocelulósicos por ano, que não são totalmente utilizados na área agrícola, embora a biomassa seja de grande importância na geração de energia limpa, uma vez que é explorada como matéria-prima alternativa para a produção de biocombustíveis sólidos. Portanto, a biomassa é um recurso disponível, que apresenta vantagens como facilidade de combustão, teor de celulose e neutralidade carbônica. [1]

De acordo com o Atlas de Bioenergia do Equador utilizando a base de dados ESPAC, em 2012 teve uma produtividade de 559 319 toneladas/ano, onde 372 576 t/ano corresponde a resíduos de campo (folhas, pseudocaule), a partir dos quais foi obtido um Poder Calorífico Inferior (PCI) de 4.180 TJ/kg. No entanto, de acordo com o INEN em 2022, o

Equador registrou 133.145 h de área plantada, dando uma colheita de 114.526 h, obtendo uma produção de 857.561,89 toneladas. Estima-se que de uma bananeira pesando cerca de 100 kg, obtém-se 88%, o que representa o total de resíduos e o cacho 12%, dando uma relação entre os resíduos da cultura e o cacho é de 2:1. Os resíduos lignocelulósicos gerados são as partes das culturas de espécies vegetais descartadas no período de colheita, que não são utilizadas para consumo, por isso no setor agrícola estimam-se 1,44 MMt de biomassa anual, no entanto, no setor florestal são produzidos 0,22 MMt/ano. [2] [3] [4] [5][6]

Nosso país tem uma grande demanda para a exportação de bananas verdes, que vem do Género *Musa* da família *Musáceas*, das espécies *paradisiaca L*. É uma planta

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

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

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

⁴ Investigador Independente; nahirperez11@hotmail.com; Guayaquil - Equador.

⁵ Investigador Independente; darlavaca22@outlook.es; Guayaquil – Equador.

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

herbácea de grande porte, que é composta por um rizoma, um pseudocaule, folhas, flores e frutos (cachos). [7] Aproximadamente para obter uma tonelada de cachos verdes, foram produzidos 150 kg de ráquis, 480 kg de folhas e 3 toneladas de pseudocaule, por isso estes resíduos são utilizados como fertilizante e ração animal. [8]

O pseudocaule que ocorre em grandes quantidades de biomassa residual. É um caule formado por vagens largas, seu tamanho variou de 3,5 a 6 m e pesa cerca de 50 kg. Esta estrutura é composta por compostos lignocelulósicos tais como: celulose, lignina, hemicelulose e outros compostos químicos (K, Na, Ca, Mn, P). Devido às suas propriedades, pode ser utilizado como biomassa para geração de energia, através da produção de biocombustíveis e assim contribuir para a redução das emissões de gases que poluem o meio ambiente. Atualmente, o Equador tem se empenhado na adoção de energia renovável como parte regular de seu fornecimento de energia, com o uso de biomassa representando 1,99% da produção de eletricidade. [9]

Este artigo de pesquisa discute o uso da biomassa de *Musa paradisiaca* para a produção de biocombustíveis sólidos sob a forma de granulados e briquetes, reduzir os poluentes produzidos pelos combustíveis fósseis, escolhendo esta alternativa de substituição para reduzir também a erosão do solo, a desertificação, a degradação florestal e das culturas, uma vez que proporcionam uma combustão limpa. Serão utilizados os padrões de qualidade estabelecidos nas normas Enplus e NTC 2060, respectivamente. Além disso, a ASTM 3172-89 foi empregada para análises de biomassa proximal e biocombustível sólido. Por conseguinte, [10] O objetivo do estudo é determinar a eficiência do poder calorífico de biocombustíveis sólidos à base do pseudocaule da banana (*Musa paradisiaca*).

1.1. Pseudocaule de banana

O pseudocaule pesa cerca de 50 quilogramas e o seu comprimento varia entre os 3,5 e os 7,5 metros, sendo a sua principal função suportar as folhas que emergem na parte superior e no aglomerado. Estas folhas, de tom verde-escuro e extensão considerável, medem cerca de 2 a 4 metros de comprimento por 1,5 metros de largura. Sua estrutura se assemelha a um tronco de árvore, é herbácea na natureza e geralmente tem uma aparência robusta e espessa devido ao acúmulo de fibras vegetais. Ao contrário das árvores, os plátanos não têm um tronco de madeira maciça, em vez disso, o pseudocaule é composto por folhas dispostas em camadas concêntricas, que se sobreponem. O pseudocaule também tem a função de armazenar nutrientes e água para o crescimento da planta. [11] [12]

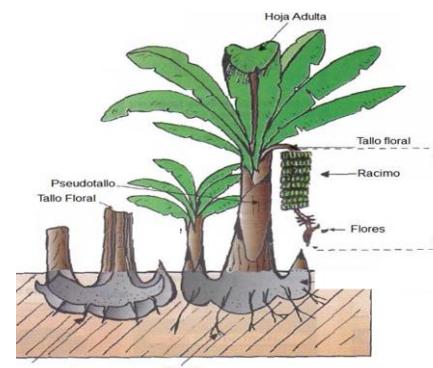


Gráfico 1 Bananeira. Fonte: [13].

O cultivo de banana no Equador é de 128.861 hectares plantados, distribuídos em 21 províncias, como mostra a Figura 2, indica que a produção de banana a nível nacional foi de 763.455 toneladas.

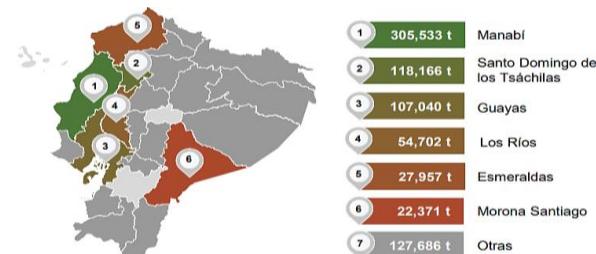


Gráfico 2 Distribuição da produção. Fonte: [14]

Em contrapartida, em 2022 foi registrado em 133.145 hectares plantados, como se pode ver na Figura 3, obtém-se o terceiro lugar em área plantada, alcançando uma produção de 857.561,89 toneladas e um rendimento de 7,49 toneladas/hectares, que é o quarto lugar em culturas permanentes no Equador. [2][15].

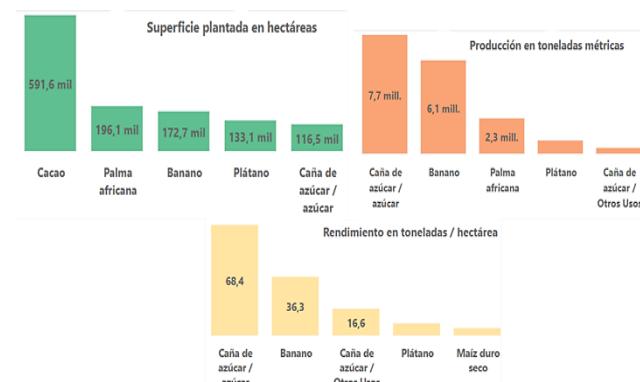


Gráfico 3 Área plantada de banana no Equador 2022. Fonte: [2]

1.2. Biocombustíveis

São combustíveis que são fabricados com biomassa, o que permite reduzir as emissões de gases com efeito de estufa, apenas se os seus processos forem sustentáveis, ou seja, emitirem uma pequena pegada de carbono. Na geração de energia por combustão, a biomassa utilizada deve ter baixas

porcentagens de lignina, a fim de produzir menores quantidades de resíduos carbonáceos, caso contrário a degradação térmica produzirá grandes quantidades deles. Estes biocombustíveis são classificados de acordo com a sua geração: [1]

- Os biocombustíveis de primeira geração utilizam biomassa proveniente de culturas agrícolas alimentares.
- A segunda geração utiliza biomassa lignocelulósica proveniente de resíduos florestais, agrícolas e urbanos.
- Na terceira geração, a sua biomassa provém de espécies não comestíveis.
- Finalmente, a quarta geração é feita a partir de microrganismos geneticamente modificados. [16]

Os biocombustíveis também são divididos de acordo com seu status em: Líquidos (Bioetanol, biodiesel, bioóleos), Sólidos (Pellets, chips, briquetes, carvão) e Gasosos (biogás, biometano, biohidrogênio). [17]

Esta investigação centra-se nos biocombustíveis sólidos (pellets e briquetes) que pertencem à segunda geração, o que permite uma pegada de carbono zero, pois a sua matéria-prima são resíduos lignocelulósicos, que é uma fonte biológica não totalmente explorada, o que seria uma grande alternativa de biomassa para a produção de biocombustíveis. [18]

1.3. Biocombustíveis sólidos

Os biocombustíveis sólidos são formas de combustível produzidas a partir de matéria orgânica de origem vegetal ou animal que podem ser utilizadas em diferentes aplicações para a produção de energia. Eles são adquiridos através de métodos físicos, como compressão, lascagem ou esmagamento. Especificamente, na geração de energia elétrica e térmica, são utilizados biocombustíveis sólidos produzidos a partir de restos de biomassa de operações florestais ou agroindustriais. A relevância dos biocombustíveis sólidos reside na sua grande capacidade de satisfazer as necessidades energéticas relacionadas com o aumento da população. A utilização de biocombustíveis sólidos permitirá substituir os combustíveis fósseis na produção de eletricidade e calor, reduzindo simultaneamente as desvantagens causadas pelos combustíveis tradicionais. Dentro da gama de biocombustíveis sólidos estão chips, briquetes e pellets, que são formas compactas com alta capacidade térmica. [19] [16] [20]

Os principais componentes utilizados na produção de biocombustíveis sólidos são derivados de materiais lignocelulósicos, que provêm da agricultura ou da silvicultura, pelo que os resíduos do agronegócio têm múltiplas utilizações potenciais, incluindo a criação de fertilizantes orgânicos ou o fabrico de biocombustíveis. [16]

Placa 1 Tipos de Biocombustíveis Sólidos.

Tipos	Fonte/fonte	Utilização
Estilhaço	Resíduos agrícolas e florestais. Culturas lenhosas. Desperdício agroalimentar.	Fornos de padaria, cerâmica, em pequenas indústrias, residências e aquecimento.
Carvão vegetal	Madeira e resíduos vegetais.	Doméstico.
Pellet & Briquete	Indústria da Madeira. Exemplo: Teca, alfafa, etc.	Combustível: em áreas industriais e de grande porte.

Nota: Informações obtidas de. Fonte: [21][22]



Gráfico 4 Tipos de Biocombustíveis Sólidos. Fonte: [21]

Aqui estão algumas características dos pellets e briquetes.

1.3.1. Granulados

São biocombustíveis cilíndricos, de diferentes tipos de biomassa dos quais dependerá a sua cor (resíduos sólidos vegetais, animais, agroindustriais e urbanos), onde a sua gama de dimensões é: diâmetro de 6-8 mm e 3,15-40 mm de comprimento. Onde a propriedade fundamental é o poder calorífico $\geq 16,5$. Outras propriedades são a sua percentagem de humidade de $\frac{MJ}{Kg} \leq 10\%$. Este valor determina a quantidade de energia que os pellets produzirão quando forem submetidos à combustão, ou seja, se o teor de água for elevado, na combustão será eliminado primeiro e depois será produzido calor, obtendo-se um baixo poder calorífico. Além disso, as cinzas devem ser de 0,7% e uma densidade aparente de $[23] \leq 600 \frac{Kg}{m^3} - 750 \frac{Kg}{m^3}$, estas propriedades estão de acordo com a norma En Plus. [24]



Gráfico 5 Pellets. Nota: Pellets produzidos a partir de cascas de arroz. Fonte: [25]

1.3.2. Briquetes

São blocos sólidos de formas variadas (os mais comumente usados retangulares e redondos), que têm um diâmetro de mais de 5 cm e um comprimento entre. Onde a propriedade fundamental é o poder calorífico de $12.500\text{-}21.000 \frac{MJ}{Kg}$. Outras propriedades são a sua percentagem de humidade de 2,5% e cinzas 30% estas propriedades estão de acordo com o padrão colombiano.[26]



Gráfico 6 Briquetes. Nota: Briquetes de diferentes materiais e formas.
Fonte: [27]

1.4. Biomassa

É um tipo de energia renovável que é obtida a partir de matéria orgânica, como resíduos agrícolas, florestais, alimentos, estrume, entre outros. Esta matéria orgânica pode ser utilizada como combustível para a produção de calor, eletricidade e biocombustíveis (Tepale Gómez, 2020). Além disso, a biomassa é uma fonte de energia renovável, uma vez que provém de organismos biológicos que podem ser cultivados e regenerados num período de tempo relativamente curto. Isto torna-a uma opção sustentável para a produção de energia, ao contrário dos recursos fósseis que são limitados e não podem ser regenerados. [20] [28]

Outro benefício da biomassa é que o seu processamento e utilização não requerem tecnologias complexas. Pode ser usado diretamente na forma de lenha, pellets ou briquetes, ou pode ser convertido em diferentes formas de energia, como eletricidade, calor ou biogás através de processos de combustão, gaseificação ou fermentação.[6]

A utilização da biomassa como recurso energético apresenta várias vantagens em comparação com o petróleo, o carvão e o gás:[6]

- Melhoria da situação socioeconómica das zonas rurais: A utilização de resíduos agrícolas para gerar energia a partir da biomassa pode gerar emprego e rendimento nas zonas rurais, impulsionando o desenvolvimento económico dessas zonas.[6]
- Redução das emissões poluentes: Ao utilizar biomassa em vez de combustíveis fósseis, reduzem-se as emissões de poluentes como enxofre, partículas, monóxido de carbono (CO), metano (CH₄) e óxidos de

azoto (NO_x), o que tem um impacto positivo na qualidade do ar e na saúde pública.[6]

- Ciclo neutro em CO₂: A biomassa tem a vantagem de ser um recurso renovável e a sua combustão não contribui significativamente para o efeito de estufa, uma vez que o dióxido de carbono (CO₂) libertado durante a queima é o mesmo que foi absorvido pelas plantas durante o seu crescimento. Isto ajuda a reduzir as emissões de gases com efeito de estufa e a atenuar as alterações climáticas. [29]
- Potencial da América Latina e Caribe: Essas regiões possuem uma grande quantidade de recursos naturais e agrícolas, o que as posiciona como potenciais produtoras de biomassa. O desenvolvimento da bioeconomia nestas áreas pode impulsionar o seu desenvolvimento socioeconómico, bem como promover a segurança energética e reduzir a dependência dos combustíveis fósseis.[6]

Em resumo, a utilização da biomassa como recurso energético apresenta várias vantagens, tanto socioeconómicas como ambientais, o que a torna uma alternativa interessante e sustentável face aos combustíveis fósseis tradicionais. [6]

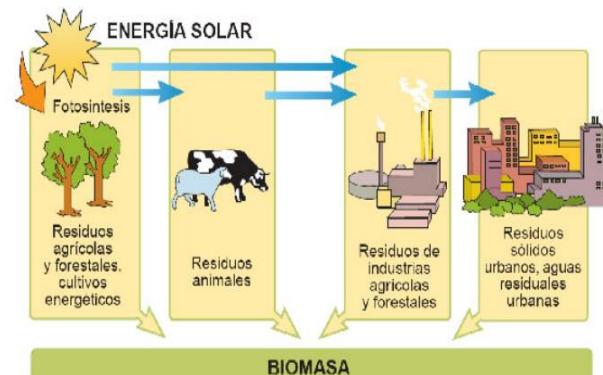


Gráfico 7 Biomassa. Fonte: [21].

1.5. Características

1.5.1. Teor de humidade

Para o teste, seguiu-se o procedimento da norma ASTM D-3173, na qual foi utilizada a fórmula:

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

Em que:

A: gramas da amostra inicial em g.

B: gramas da amostra final, em g.

1.5.2. Conteúdo de cinzas

O teor de cinzas de uma massa é determinado de acordo com a quantidade de minerais que contém, utilizando para isso a seguinte fórmula.[30]

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

m_1 : Massa e tampa vazias do cadrinho.

m_2 : Massa do cadiño e tampa +1 g de amostra.
 m_3 : Massa e tampa do cadiño + amostra de mufla aquecida.

1.5.3. Densidade

Para este teste, os biocombustíveis foram pesados e seu volume determinado foi obtido, sendo então aplicada a seguinte equação:

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

d = densidade

m = massa

v = volume

1.5.4. Poder calorífico

É a quantidade de energia que pode ser obtida pela queima de uma substância. Refere-se à capacidade de uma substância produzir calor através da realização de uma reação química de combustão completa [31]. O poder calorífico é medido em unidades de energia por unidades de massa, como joules ou calorias.

1.5.5. Material volátil:

Este teste da percentagem de material volátil foi trabalhado de acordo com a norma, utilizando a seguinte equação:[32]

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

m_1 : Massa e tampa vazias do cadiño.

m_2 : Massa do cadiño e tampa +1 g de amostra.

m_3 : Massa e tampa do cadiño + amostra

1.5.6. Carbono fixo

É a subtração de 100 e o resultado da soma da percentagem de humidade, cinzas e material volátil [33].

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

H: Percentagem de humidade.

C: Percentagem de cinzas.

MV: Percentagem de material volátil.

2. Materiais e métodos.

Área de Estudo

A área de estudo inclui o lote 9 da urbanização Canaán I do Cantão de Cumandá (Chimborazo-Ecuador).

2.1. Metodologia

A metodologia do estudo está dividida em 3 secções: (1) Obtenção e condicionamento de biomassa (matéria-prima), (2) produção de pellets e briquetes e (3) Métodos de caracterização física, análise proximal e estrutural e respetiva anova.

2.2. Obtenção e acondicionamento de biomassa

A escolha desta biomassa baseia-se na sua abundante disponibilidade como resíduo agrícola no Equador e no seu elevado teor de componentes lignocelulósicos, adequados para a produção de biocombustíveis sólidos. Esta etapa inicial também inclui uma análise das condições de crescimento das plantas para garantir a uniformidade nas

amostras, incluindo dados sobre a idade da planta, condições do solo e tempo de colheita.

Amostras de pseudocaule de banana das espécies dominicana e barragañete foram coletadas aleatoriamente após a colheita, depois foram cortadas em forma retangular (2cmx5cm) e as peças foram expostas ao sol por 8 dias, para reduzir o teor de umidade. As amostras foram então secas em forno a uma temperatura de 60°C por 12 horas em latas de alumínio. Em seguida, foi introduzido em um moinho de martelo, a fim de reduzir seu tamanho, e então colocado em uma máquina vibratória por 5 minutos, até que as partículas diminuíssem para uma malha de 0,8 mm, 0,63 mm e 0,315 mm. Para finalizar com o condicionamento da biomassa, a umidade foi removida a 100°C por 6 h.

2.2.1. Composição química da biomassa

Análise proximal, realizada de acordo com a norma ASTM D3172-89 para determinar os teores de celulose, hemicelulose e lignina. A composição média obtida foi de 31,27% celulose, 15,07% hemicelulose e 23,9% lignina, o que apresenta alto teor energético adequado para uso em biocombustíveis.

2.3. Produção de pellets e briquetes

Nesta etapa, a biomassa foi homogeneizada com o aglutinante de acordo com as composições selecionadas, onde foram utilizadas as seguintes quantidades de aglutinante de biomassa.

Placa 2 Composições de Biocombustíveis Sólidos.

Composição	Quantidade de Biomassa (g)	Quantidade de aglutinante (g)	Quantidade de resíduo (g)	Quantidade de Biocombustíveis
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
Briquetes 50-50	205	205	8	6 Briquetes
Briquetes 55-45	270,6	221,4	6	6 Briquetes
Briquetes 60-40	246	164	11	6 Briquetes

Nota: Informações obtidas de [22]

Com as quantidades utilizadas em cada composição, obteve-se uma massa compacta por meio da máquina de pellets e briquetagem. Para finalizar com a secagem no ambiente por 72 horas dos pellets e briquetes produzidos.

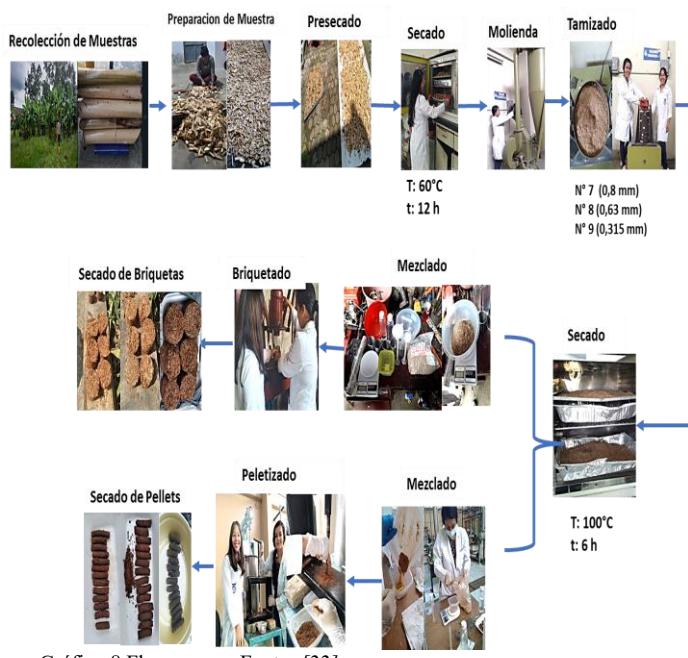


Gráfico 8 Fluxograma. Fonte: [22]

2.4. Métodos de caracterização física, análise proximal, análise estrutural e anova.

O poder calorífico foi avaliado utilizando uma bomba calorimétrica sob o padrão ASTM D5865. Esta análise incluiu a medição do teor energético em MJ/kg das amostras produzidas em diferentes composições. Além disso, a análise estatística ANOVA e o teste post-hoc de Tukey foram usados para determinar a significância das diferenças entre as composições de pellets e briquetes

2.4.1. Caracterização física

Esta caracterização foi baseada nos procedimentos da norma ASTM S3172-89 para o teor de umidade para biomassa terrestre. Por outro lado, para os biocombustíveis sólidos, foi aplicado o mesmo padrão de teor húmido e a sua densidade foi encontrada.

Análises preliminares são essenciais para compreender a composição do pseudocaule. Você pode incluir uma análise da quantidade de celulose, hemicelulose e lignina, que são elementos-chave no poder calorífico da biomassa.

Com base em estudos anteriores, o pseudocaule da banana tem altos valores de celulose (entre 30-60%) e lignina, indicando sua adequação como biocombustível sólido

2.4.2. Análise proximal

A caracterização da biomassa terrestre foi realizada utilizando a norma ASTM D3172-89, que descreve os métodos para determinação do teor de cinzas, material volátil e carbono fixo. Para o estudo do poder calorífico, o padrão ASTM D240 foi aplicado pelo laboratório LAQUINS ESPOL.

2.4.3. Análise estrutural

As amostras foram enviadas para o laboratório LAQUINS ESPOL, para caracterização de lignina, celulose e hemicelulose. Estas análises foram realizadas de acordo com os TAPPI T 203 e 222.

2.4.4. Anova

É o procedimento estatístico usado para avaliar hipóteses conhecidas como ANOVA e é usado para contrastar duas ou mais médias associadas a um fator comum. Este método é aplicado ao conjunto de dados, que gera variações, onde é submetido a diferentes condições onde se verifica se é semelhante ou desigual. Tem hipóteses Nulas e Alternativas, que para rejeitar a hipótese nula não devem satisfazer a condição de que um dos meios seja diferente dos demais. E, por outro lado, para que a hipótese alternativa seja rejeitada, todos os meios devem ser iguais. [34]

2.4.5. Método de Tukey

O método de Tukey complementa as informações obtidas a partir da ANOVA, permitindo a comparação das médias amostrais obtidas a partir de um ensaio experimental. O valor de $T\alpha$ é calculado a partir da seguinte equação (Cajal, 2022):

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

$T\alpha$ = número HSD (diferença honestamente significativa)
 $q\alpha$ = quantis da distribuição de Tukey (tabela com significância relativa de 0,05% igual a 95% de confiabilidade)

n = número de repetições do estudo

CME = Mean Square Error Fator representa o erro padrão de cada média

O teste de tukey afirma que quando a variação entre duas médias é superior ao valor de $T\alpha$, é considerado desigual, no entanto, se a diferença for menor, é considerado estatisticamente idêntico. [35]

3. Análise e Interpretação dos Resultados.

A caracterização física, análise proximal e estrutural da biomassa do pseudocaule da banana moída é apresentada na Tabela 3.

Tabela 3 Resultados da Caracterização da Biomassa

Parâmetro	Unidade	Resultado	Método de Análise
*Poder calorífico	MJ/Kg	14,44	ASTM D240
Humidade	%	4,24	ASTM D3172-89
Cinzas	%	6,76	ASTM D3172-89
Material volátil	%	80,65	ASTM D3172-89
Carbono Fixo	%	8,34	ASTM D3172-89
*Lignina	%	23,9	TAPPI T 222
*Hemicelulosa	%	12,9	TAPPI T 203
*Celulose	%	13,7	TAPPI T 203

Observação: As análises foram realizadas no Laboratório da nossa Faculdade. *Resultado retirado do relatório do Laboratório Laquins Espol. Fonte: [36].



Os resultados da análise proximal da biomassa do pseudocaule da banana, correspondendo a 4,240%, 6,761%, 80,659% e 8,3406% para os percentuais de umidade, cinzas, material volátil e carbono fixo, respectivamente, bem como 14,447 MJ/Kg de poder calorífico, que de acordo com a norma En plus e a norma colombiana NTC 2060 é um valor próximo ao limite permitido de teor energético para a produção de biocombustíveis sólidos.

Por outro lado, os resultados da análise proximal realizada na biomassa indicaram que foi obtida 23,9% de lignina, representando o maior componente do pseudocaule da banana, seguida de hemicelulose e celulose com frações mais baixas com os percentuais de 12,9% e 13,7%, respectivamente. Estes valores permitiram obter combinações homogéneas na fase de mistura.

Tabela 4 Comparação dos parâmetros dos resultados do Pellet com a Norma Espanhola.

Parâmetro	Unidade	50%-50% ¹	55%-45% ²	60%-40% ³	ENplus
*Poder calorífico	$\frac{MJ}{Kg}$	22,566	22,657	20,835	Atende
Humidade	%	5,190	6,888	6,403	Atende
Cinzas	%	3,641	3,425	4,248	Não compatível
Material volátil	%	87,001	86,301	86,181	-
Carbono Fixo	%	2,685	3,385	3,167	-
Densidade	$\frac{Kg}{m^3}$	750	650	273	Curvas ^{1 e 2}

Observação: As análises foram realizadas no Laboratório da nossa Faculdade. *Resultado retirado do relatório do Laboratório Laquins Espol.

Fonte: [36] e Autores.

A Tabela 4 especifica os resultados da análise proximal das pastilhas. Dado que o teor de umidade nos biocombustíveis é um fator importante, uma vez que, à medida que diminui o poder calorífico aumenta, pode deduzir-se que tal não se reflete nos pellets obtidos, uma vez que, à medida que o teor de umidade aumenta 5,19%, o mesmo acontece com o seu poder calorífico de acordo com as composições 50-50 e 55-45, o que significa que o calor libertado na combustão, que é utilizado para evaporar a água, não influencia negativamente o poder calorífico. Tendo em conta que a composição 55-45 tem 22.566 MJ/kg de PC, considera-se que os pellets cumprem os parâmetros de qualidade do biocombustível sólido ideal para a produção de energia, de acordo com a norma ENplus.

De acordo com a norma espanhola, o valor da densidade de pellets deve ser maior ou igual a 600, portanto, as composições 50-50 e 55-45 obedecem a essa condição, uma vez que consistem em uma densidade de 750 e 650, no entanto, $\frac{Kg}{m^3}$ $\frac{Kg}{m^3}$ $\frac{Kg}{m^3}$ com os dados obtidos a partir do teor de cinzas de pellets, nenhuma composição atende a esse parâmetro. No entanto, a composição 60-40 tem uma maior percentagem de cinzas, o que pode estar relacionado com o facto de a biomassa conter um elevado teor de compostos

inorgânicos. O teor de cinzas é inversamente proporcional ao poder calorífico.

Tabela 5 Comparação dos parâmetros dos resultados do Briquette com o Padrão NTC.

Parâmetro	Unidad e	50%-50%	55%-45%	60%-40%	Padrão NTC
*Poder calorífico	$\frac{MJ}{Kg}$	22,680	19,907	19,416	Atende
Humedad e	%	5,005	4,357	4,132	Não compatível
Cinzas	%	2,736	3,613	4,512	Atende
Material volátil	%	85,576	87,425	87,4227	Não compatível
Carbono Fixo	%	6,682	4,603	3,882	Atende
Densidad e	$\frac{Kg}{m^3}$	569,4	592,9	376,7	-

Fonte: [36][22]

Como pode ser visto na tabela 5, os resultados obtidos a partir dos testes fisico-químicos: o teor de umidade está ligado ao teor de energia, neste caso visualiza-se que quanto menor o teor de umidade menor o valor calorífico é obtido, portanto, na composição 60-40 obteve-se o maior teor de umidade e o mesmo maior teor energético. por conseguinte, considera-se que esta característica não afeta o poder calorífico deste tipo de biocombustível, o que inclui que a composição 50-50 com 22.680 $\frac{MJ}{Kg}$ tem um teor energético mais elevado em relação às proporções de 55-45 e 60-40 com 19.907 $\frac{MJ}{Kg}$ e 19.416, respectivamente, até certo ponto, embora as percentagens de teor de umidade não estejam dentro dos limites admissíveis da norma NTC 2060, o seu PC, se for, bem como o conteúdo das cinzas. $\frac{MJ}{Kg}$

A análise proximal de cada briquete indicou que a composição de 55-45 tem uma maior densidade de 592,9 $\frac{Kg}{m^3}$, seguida da relação 50-50 com 569,40 e 60-40 com um menor valor de 376,7. $\frac{Kg}{m^3}$ $\frac{Kg}{m^3}$

4. Discussão

4.1. Comparação do poder calorífico entre granulados e briquetes

Tabela 6 Biocombustível sólido ideal.

Parâmetro	Unidade	Pellets 50%-50%	Pellets 55%-45%	Briquete 50%-50%	Briquete 55%-45%
Poder calorífico	$\frac{MJ}{Kg}$	22,566	22,657	22,680	19,907

Fonte: [36]

Nos pellets da composição 55-45, obteve-se um maior poder calorífico (PB), mas nos 50-50 diminuiu, dando 22.657 $\frac{MJ}{Kg}$ e 22.566, respectivamente. Por outro lado, em briquetes deu um alto teor energético na composição de 50-

50 com 22.680, enquanto em 55-45 foi reduzido para 19.907 $\frac{MJ}{Kg}$. Portanto, considera-se que o uso do pseudocaule de banana como biomassa para uso energético deu um resultado ótimo no briquete de composição 50-50, de acordo com o PC.

Deve-se considerar que a configuração de pellets 55-45 não apresenta variação significativa no PB em comparação com a composição de briquetes 50-50, por isso considerou-se que o *Musa paradisiaca* é adequado como matéria-prima para a produção de biocombustíveis sólidos nas proporções acima mencionadas.

Tabela 7 Resultados de variância do poder calorífico dos pellets.

Publicações	Conta	Soma	Média	Variância
Composição 50-50%	3	67,697	22,56566667	1.23333E-05
Composição 55-45%	3	67,972	22,65733333	1.23333E-05
Composição 60-40%	3	62,506	20,83533333	1.23333E-05

Fuente: [22]

Tabela 8 ANOVA.

Origem das variações	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Média dos quadrados	F	Probabilidade	Valor crítico para F
Entre grupos	6,322140222	2	3,161070111	256302,982	1,60E-15	5,14325285
Dentro dos grupos	7,4E-05	6	1,23333E-05			
Total	6,322214222	8				

Fuente: [22]

Decisão

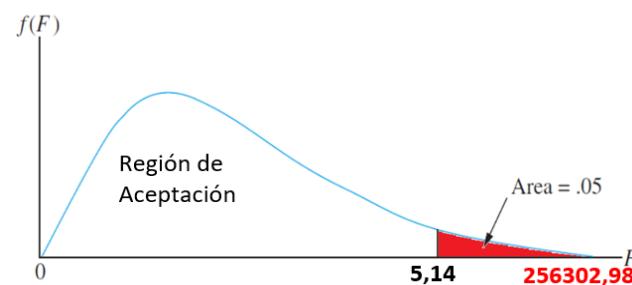


Gráfico 9 Distribuição F. Fonte: [37]

A Figura 9 indica que o valor correspondente a F excede o valor crítico de 5,14 de acordo com a zona de aceitação, e que há uma diferença significativa, a hipótese nula foi rejeitada.

Tabela 9 Experimento Tukey a Pellets de acordo com o seu valor calórico. Composições A (50-50); B(55-45); C(60-40); Diferença da amostra Decisão

$\mu_A - \mu_B$	0,09	Significativo
$\mu_A - \mu_C$	1,73	Significativo
$\mu_B - \mu_C$	1,82	Significativo

Observação: μ = média da amostra em valor absoluto. Fonte: [22]

De acordo com o teste de Tukey, os valores da diferença amostral expressa em valor absoluto são comparados com $T_{\alpha}= 0,009$ de Tukey, mostrando uma diferença significativa em mais de um teste, o que indica que a hipótese nula é rejeitada e a hipótese alternativa é aceita.

Tabela 10 Resultados de variância do poder calorífico do briquete.

Publicações	Conta	Soma	Média	Variância a
Composição 50-50%	3	68,042	22,681	9.33333E-06
Composição 55-45%	3	59,721	19,907	9E-06
Composição 60-40%	3	58,248	19,416	1E-06

Fuente: [22]

Tabela 11 ANOVA.

Origem das variações	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Média dos quadrados	F	Probabilidade	Valor crítico para F
Entre grupos	18,5923562	2	9,2961781	1442510,3	8,99506E-18	5,14325285
Dentro dos grupos	3,86667E-05	6	6,44E-06			
Total	18,5923948	8				

Fuente: [22]

4.2. Decisão

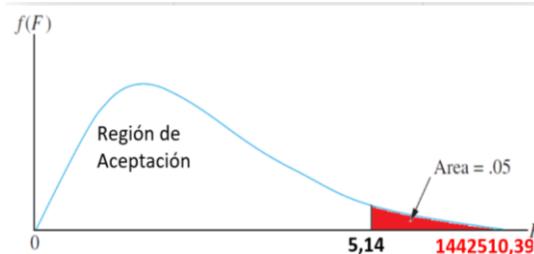


Gráfico 10 Distribuição F. Fonte: [37]

No Gráfico 10, a distribuição dos valores F com uma probabilidade de significância de 0,05 é mostrada. A hipótese nula é rejeitada, uma vez que o valor de F está fora da região de aceitação, indicando uma diferença significativa entre os valores de poder calorífico dos briquetes.



Tabela 12 Experimente os pellets Tukey de acordo com o seu poder calorífico.

Composições A (50-50); B(55-45); C(60-40)	Diferença da amostra	Decisão
$\mu_A - \mu_B$	2,77	Significativo
$\mu_A - \mu_C$	3,26	Significativo
$\mu_B - \mu_C$	0,49	Significativo

Nota: μ = média da amostra em valor absoluto. Fonte: [22]

Na *Tabela 12*, eles mostram que os valores de diferença amostral dados em valor absoluto são maiores em comparação com o valor de $T_{\alpha}=0,006$, o que indica que todas as composições têm uma diferença significativa aprovando a hipótese alternativa, que especifica que pelo menos um valor deve ser diferente dos demais, ao contrário da hipótese nula que expressa que a diferença dos valores das médias deve ser igual, ou seja, não apresentam diferença significativa, para serem aceites.

5. Conclusões.

Os resíduos da bananeira são uma matéria-prima gerada em grandes quantidades no Equador. Nesta pesquisa, a eficiência dos biocombustíveis sólidos foi determinada a partir da análise do poder calorífico, resultando em pellets e briquetes dentro dos regulamentos para biocombustíveis sólidos, com 22.657 MJ/Kg e 22.680 MJ/Kg, respectivamente. Portanto, é evidente que o biocombustível sólido com maior poder calorífico é o briquete à base de pseudocaule de banana, onde foram alcançados 5% de umidade e um rendimento de produção de 98,04%. Portanto, os resultados mostram que o pseudocaule de banana é viável e uma ótima alternativa de biomassa para a produção de briquetes, pois a partir da biomassa do solo foi atingida 14,44 de $\frac{MJ}{Kg}$ poder calorífico, o que se destaca porque sem a aplicação de uma substância de ligação ela cumpre a Norma NTC 2060 onde estabelece que para ser classificada como briquete seu poder calorífico deve estar entre a faixa de 12,5 - 21 $\frac{MJ}{Kg}$. Além disso, esta pesquisa marca o início de mais estudos sobre os resíduos da bananeira, em que 100% de biomassa é utilizada sem a necessidade de ligantes, onde a quantidade de resíduos desta planta poderia ser reduzida, para a geração de energia de forma renovável e com pegada de carbono zero. que contribui para o cuidado do meio ambiente.

6.- Contribuições do Autor (Taxonomia de Papéis de Colaborador (CReditT))

1. Conceituação: Nahir Alondra Pérez
2. Investigação: Nahir Alondra Pérez
3. Metodologia: Nahir Alondra Pérez
4. Gestão de projetos: Sandra Peña
5. Recursos: Sandra Peña
6. Supervisão: Sandra Peña

7. Validação: Darla Vaca
8. Visualização: Sandra Peña
9. Redação - rascunho original: Nahir Alondra Pérez e Sandra Peña
10. Redação - revisão e edição: Sandra Fajardo
11. Revisão: Eddie Zambrano e Pablo Fajardo

7.- Referências.

- [D. A. Aguilar Romero, «Determination of the energy potential of the residual biomass of banana crops in the Machala Canton, El Oro, Ecuador.», novembro de 2019. [Em linha]. Disponível: <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/18090>.
- [INEN, ESPAC, "Superfície de baixo trabalho agrícola", 2022. [Em 2 linhas]. Disponível:
- [<https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiZTEyY2NiZDItYjIzYi00ZGQ1LTlkNGEtNDE1OGViM2Q1N2VliwidCl6ImYxNThhMmU4LWNhZWtNDQwNi1iMGFiLWY1ZTI1OWJkYTExMiJ9&pageName=ReportSection>.
- [UPM, "A banana, mais desperdício do que produto. Uma fonte de 3 bioenergia?", 17 de maio de 2016. [Em linha]. Disponível: <https://www.upm.es/UPM/SalaPrensa/Noticias?fmt=detail&prefmt=articulo&id=8b69e368289a4510VgnVCM10000009c7648a>.
- [C. Jiménez Coello, «Avaliação de polímeros presentes em 4 pseudocaules de Musa acuminata AAA, Musa sapientum ABB e Musa paradisiaca AAB para a produção de bioplástico.», 2017. [Em linha]. Disponível: https://ecosur.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1017/1586/1/10000058414_documento.pdf.
- [R. A. Sánchez Landí, "Avaliação da contribuição de resíduos de 5 pseudocaule no crescimento e vigor de bananeiras (Musa Aaa)", 2021. [Em linha]. Disponível: <https://cia.uangraria.edu.ec/Archivos/SANCHEZ%20LANDI%20ROS A%20ANGELICA.pdf>.
- [Y. Vargas-García, J. Pazmiño-Sánchez e J. Dávila-Rincón, "Biomass 6 potential in South America for the production of bioplastics. Uma] Revisão", 2022.
- [J. E. Pincay Moran, J. F. Ramírez Salcan, A. F. López Vargas, F. J. Duque-Aldaz, W. Villamagua Castillo e R. Sánchez Casanova,] «Avaliação e Proposta de um Sistema de Gestão Ambiental numa Plantação de Manga», *INQUIIDE*, vol. 7, nº 1, p. 23-34, 2025.
- [L. E. Velázquez Áraque, J. M. Aguilar Sierra e Y. A. Tulcán Álvarez,] «Estudo do potencial energético da casca de arroz equatoriana] peletizada para uso como combustível», *INQUIIDE*, vol. 2, nº 1, p. 44-51, 2022.
- [J. Serrano, W. Mejía, J. Ortiz, A. Sánchez e S. Zalamea,] «Determination of the Potential of Electricity Generation from Biomass in Ecuador», *Journal of the Faculty of Chemical Sciences*, nº 17, 18 de setembro de 2017.
- [S. E. Fajardo Muñoz e V. M. Lituma Mandujano, «Pellet processing 1 using the peel of breadfruit (*Artocarpus Altilis*) to be used as a 0 biofuel.», *INQUIIDE*, vol. 2, nº 2, p. 21-33, 2022.
- [ECORAE; UMDS; OEA; INIAP; GTZ, Compêndio de Recomendações Tecnológicas para as Principais Culturas da Amazônia Equatoriana, Quito, 2001, p. 120.
- [J. Domingues Lima, N. De Souza Bravo, D. Eduardo Rozane, E. Shigueaki Nomura, S. Modenese Gorla da Silva e E. Nardini Gomes,] «Gestão de resíduos de pseudocaule para aumentar o crescimento de mudas de bananeira», 2020.
- [D. E. Carchi Maurat, "Use of Agricultural Waste from Banana Cultivation to Obtain Nanocellulose" (Uso de resíduos agrícolas do cultivo de banana para obtenção de nanocelulose), 2014. [Em linha]. Disponível: <http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/5292/1/tesis.pdf>.



- [INEC, ESPAC, "Boletim Situacional", 2021. [Em linha]. Disponível: 1 http://sipa.agricultura.gob.ec/boletines/situacionales/2021/boletin_situacional_platano_2021.pdf.]
- [INEC, ESPAC, "Ficha de Cultivo (Musa AAA)", 2022. [Em linha]. 1 Disponível: <http://sipa.agricultura.gob.ec/index.php/platano>. 5]
- [I. M. Ríos Badrán, J. Santos Cruz e C. Gutiérrez Antonio, «Solid 1 Biofuels: A solution to global warming», *Ciencia*, vol. 68, nº 4, pp. 1- 6 7, dezembro de 2017.]
- [M. U. Arteaga Peñafiel, M. Briones Córdova y P. Velásquez Pionce, 1 «Extração e aplicação de óleos essenciais de feijoa como conservante 7 na produção de enchidos de massa fina», *INQUIIDE*, vol. 3, nº 12, p. 64-74, 2023.]
- [M. D. Cortés Sánchez, E. Gata Montero, A. Pipió Ternero, Á. 1 Rodríguez Rivas e J. Sánchez Santos, «Biocombustíveis: Tipos e 8 estratégias de produção», *MOLEQLA*, nº 35, pp. 20-25, 16 10 2019.]
- [F. J. Duque-Aldaz, E. R. Haymacaña Moreno, L. A. Zapata Aspiazu y 1 F. Carrasco Choque, «Prediction of moisture content in the caca 9 drying process by simple linear regression.», *INQUIIDE*, vol. 6, nº 2,] pp. 20-20, 2024.
- [S. E. Peña Murillo e E. M. Zambrano Nevárez, *Biofuels Utilization of 2 Biomass*, Primeira ed., Savez, 2021, p. 183. 0]
- [A. I. De Lucas Herguedas, *Biomasa, Biocombustible y Sostenibilidad*, 2 Palencia, 2012, pp. 77-152. 1]
- [N. A. Pérez Ortiz e D. R. Vaca Choez, "Use of the banana 2 pseudostem (Musa paradisiaca) as an alternative for," 09 2023. [Em 2 linha]. Disponível: <http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/70726>.]
- [J. M. Aguilar Sierra e E. A. Tulcám Álvarez, *Artistas, Estudo do 2 potencial energético da casca de arroz equatoriana peletada para uso 3 como combustível*. [Arte]. Universidade de Guayaquil, 2018.]
- [European Pellet Council, "Quality Certification Scheme for Wood 2 Pellets", agosto de 2015. [Em linha]. Disponível: <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 e C. 2 Gutiérrez Antonio, «Solid Iofuels: An Economic and Sustainable 5 Alternative for Electric Power Generation in Mexico», *Digital 1 Ciencia*, vol. 12, nº 2, pp. 61-66, 12 2019.]
- [NTC 2060, "NTC 2060 - Briquetes de Combustível para Uso 2 Doméstico", ICONTEC, 04 de novembro de 1987. [Em linha]. 6 Disponível: <https://tienda.icontec.org/gp-briquetas-combustibles-para-uso-domestico-ntc2060-1987.html>. [Acesso em 19, 12, 2024].]
- [INTEREMPRESAS, «Briquetar para avail.», 24 10 2011. [Em linha]. 2 Disponível: 7 <https://www.interempresas.net/Mantenimiento/Articulos/57083-Briquetar-para-aprovechar.html>.]
- [S. Peña, E. Zambrano, D. Bermeo, F. Reyes, C. Forero, F. Velasco y 2 E. Arango, «Evaluation of Sugarcane Cutting Waste for the 8 Production of Solid Biofuel.», *Migration Letters*, vol. 20, nº S5, pp.] 928-940, 24 08 2023.]
- [S. Peña Murillo e J. López Galán, "Sustainable Development and 2 Learning Opportunity for Biorefineries: An Alternative to Biomass", 9 *Revista de Ciencias Sociales*, vol. 26, pp. 401-411, 2020.]
- [ASTM D-3174, «Standard Test Method for Ash in the Analysis 3 Sample of Coal and Coke from Coal» (Método de ensaio padrão para 0 cinzas na amostra de análise de carvão e coque do carvão), 2012.]
- [L. V. Bermeo Valencia, «Obtaining biochar by dry torrefaction from 3 balsa waste (Ochroma pyramidale)», EPN, Quito, 2018. 1]
- [ASTM D-3175, «Standard Test Method for Volatile Matter in the 3 Analysis Sample of Coal and Coke1», 2018. 2]
- [ASTM D-3172, «Standard Practice For Proximate Analysis of Coal 3 and Coke» (Prática padrão para análise centesimal de carvão e coque), 3 2002.]
- [C. Camacho, «Análise de variância», Universidade de Sevilha, 3 Sevilha, 2020. 4]
- [A. Cajal, "Teste de Tukey", Lifeder, 15 12 2022. [Em linha]. 3 Disponível: <https://www.lifeder.com/prueba-de-tukey/>. [Acesso em 5 15 01 2025].]
- [LAQUINS-ESPOL, "Relatório de Análise", Guayaquil, 2023. 3]
- [E. Camones Ibarra, Direção, *Como realizar a Análise de Variância 3 ANOVA*. [Filme]. 2021. 7]