



UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO



FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA E INDUSTRIAS ALIMENTARIAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA

TESIS

Análisis proximal y determinación del poder calorífico de la biomasa
lignocelulósica de residuos agroindustriales generados en la región
Lambayeque y en la región Cajamarca.

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO (A) QUÍMICA (A)**

Bachiller: Carlos de la Cruz Carlos Segundo

Bachiller: Cerna Guerrero Anita Liset

ASESORA

Dra. Barturen Quispe Ada Patricia

ORCID 0000-0003-4566-1868

**Lambayeque
Perú - 2025**



UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO



FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA E INDUSTRIAS ALIMENTARIAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA

TESIS

Análisis proximal y determinación del poder calorífico de la biomasa
lignocelulósica de residuos agroindustriales generados en la región
Lambayeque y en la región Cajamarca.

APROBADO POR EL SIGUIENTE JURADO:

Dr. Ronald Alfonso Gutiérrez moreno

Dra. Isabel Nevado Rojas

PRESIDENTE

M. Sc. Manuel Antonio Díaz Paredez

VOCAL

SECRETARIA

Dra. Ada Patricia Barturen Quispe

ASESORA



ACTA DE SUSTENTACIÓN - 2025



Siendo las 11:30 am del jueves 2 de octubre del 2025, se reunieron en la sala de sustentación de la Facultad de Ingeniería Química e Industrias Alimentarias los miembros del jurado evaluador de la Tesis Titulada: **Análisis proximal y determinación del poder calorífico de la biomasa lignocelulósica de residuos agroindustriales generados en la Región Lambayeque y en la Región Cajamarca;** designados con Res. N°035-2023-D-FIQIA-VIRTUAL de fecha 01 febrero del 2023 y aprobada con Res. N°189-2023-D-FIQIA-VIRTUAL de fecha 31 de julio del 2023, con la finalidad de Evaluar y Calificar la sustentación de la tesis antes mencionada, conformados por los siguientes docentes:

- **Presidente:** Dr. Ronald Alfonso Gutiérrez Moreno
- **Secretario:** Dra. Ysabel Nevado Rojas
- **Vocal:** M.Sc. Manuel Antonio Díaz Paredes

La tesis fue asesorada por la Dra. Ada Patricia Barturen Quispe, nombrada con Res. N°002-2023-D-FIQIA-VIRTUAL de fecha 03 de enero del 2023. El acto de sustentación es autorizado con Res. N°447-2025-D-FIQIA de fecha 29 de setiembre del 2025.

La Tesis fue presentada y sustentada por los Bachilleres: **CERNA GUERRERO ANITA LISET y CARLOS SEGUNDO CARLOS DE LA CRUZ; de la Escuela Profesional Química** y tuvo una duración de 9.0 minutos.

Después de la sustentación, y absueltas las preguntas y observaciones de los miembros del jurado; se procedió a la calificación respectiva, otorgándole el calificativo de 16 (Dieciseis.....) en la escala vigesimal, mención Bueno.....

Por lo que quedan APTO (A) (s) para obtener el Título Profesional de **INGENIERO (A) QUIMICO (A)** de acuerdo con la Ley Universitaria 30220 y la normatividad vigente de la Facultad de Ingeniería Química e Industrias Alimentarias y la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo.

Siendo las 13:00pi se dio por concluido el presente acto académico, dándose conformidad al presente acto, con la firma de los miembros del jurado.

Firmas

.....
Presidente
Dr. RONALD ALFONSO GUTIERREZ MORENO

.....
Vocal
M.Sc. MANUEL ANTONIO DIAZ PAREDES

.....
Secretaria
Dra. YSABEL NEVADO ROJAS

.....
Asesora
Dra. ADA PATRICIA BARTUREN QUISPE

CONSTANCIA DE VERIFICACION DE ORIGINALIDAD

Yo ADA PATRICIA BARTUREN QUISPE..... usuario revisor de Tesis ☒
Trabajo de Suficiencia Profesional ☐ y/o Trabajo Académico ☐

Titulado: **Análisis proximal y determinación del poder calorífico de la biomasa lignocelulósica de residuos agroindustriales generados en la región Lambayeque y en la región Cajamarca;** cuyos autor (es) son: **CARLOS DE LA CRUZ CARLOS SEGUNDO**; con DNI N°73514257 y **CERNA GUERRERO ANITA LISET**; con DNI N° 74624773; declaro que la evaluación realizada por el Programa informático, ha arrojado un porcentaje de similitud **9%**, verificables en el Resumen del Reporte automatizado de similitudes que se acompaña.

El suscrito (a) analizó reporte y concluyó que cada una de las coincidencias detectadas dentro del porcentaje de similitud permitido no constituyen plagio y que el documento cumple con la integridad científica y con las normas para el uso de citas y referencias establecidas en los protocolos respectivos,

Se cumple con adjuntar el Recibo Digital a efectos de la trazabilidad respectiva del proceso.

Lambayeque, 27 de JUNIO del 2025



Firma (Asesor)

Nombres y Apellidos ADA PATRICIA BARTUREN QUISPE

DNI N°16721885

Defina la modalidad con (X)

Adjunta:

Resumen de Reporte automatizado de similitudes

Recibo digital

TESIS Análisis proximal y determinación del poder calorífico de la biomasa lignocelulósica de residuos agroindustriales generados en la Región Lambayeque y en la Región Cajamarca.



INFORME DE ORIGINALIDAD

Dra. Ada P. Barturen Quispe
Asesora
16721885

9%

INDICE DE SIMILITUD

9%

FUENTES DE INTERNET

3%

PUBLICACIONES

2%

TRABAJOS DEL
ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	repositorio.unprg.edu.pe Fuente de Internet	1%
2	hdl.handle.net Fuente de Internet	1%
3	repositorio.unal.edu.co Fuente de Internet	1%
4	dspace.esPOCH.edu.ec Fuente de Internet	<1%
5	repositorio.unac.edu.pe Fuente de Internet	<1%
6	scielo.sld.cu Fuente de Internet	<1%
7	Submitted to Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo Trabajo del estudiante	<1%

Barturen

Dra. Ada P. Barturen Quispe
Asesora
16721885

8	repositorio.ual.es Fuente de Internet	<1 %
9	dspace.ups.edu.ec Fuente de Internet	<1 %
10	es.scribd.com Fuente de Internet	<1 %
11	revistas.itm.edu.co Fuente de Internet	<1 %
12	repository.uamerica.edu.co Fuente de Internet	<1 %
13	Submitted to Universidad Politecnica Salesiana del Ecuador Trabajo del estudiante	<1 %
14	agris.fao.org Fuente de Internet	<1 %
15	repositorio.ucv.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
16	ingenius.ups.edu.ec Fuente de Internet	<1 %
17	repositorio.upse.edu.ec Fuente de Internet	<1 %
18	repositorio.ikiam.edu.ec Fuente de Internet	<1 %

repository.usta.edu.co

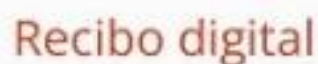
19	Fuente de Internet		Dra. Ada P. Barturen Quispe Asesora 16721885	<1 %
20	revistas.unimilitar.edu.co	Fuente de Internet		<1 %
21	revia.areandina.edu.co	Fuente de Internet		<1 %
22	www.dspace.uce.edu.ec	Fuente de Internet		<1 %
23	Submitted to The University of Manchester	Trabajo del estudiante		<1 %
24	Submitted to Universidad Nacional de Colombia	Trabajo del estudiante		<1 %
25	Submitted to Systems Link	Trabajo del estudiante		<1 %
26	repositorio.esпам.edu.ec	Fuente de Internet		<1 %
27	digibuo.uniovi.es	Fuente de Internet		<1 %
28	Submitted to Corporación Universitaria Minuto de Dios, UNIMINUTO	Trabajo del estudiante		<1 %
29	www.cyted.org	Fuente de Internet		<1 %

30	repositorioinstitucional.ufpso.edu.co Fuente de Internet	<1 %
31	repository.unad.edu.co Fuente de Internet	<1 %
32	bvelazquez.blogs.upv.es Fuente de Internet	<1 %
33	repositorio.uea.edu.ec Fuente de Internet	<1 %
34	red.uao.edu.co Fuente de Internet	<1 %
35	repositorio.usm.cl Fuente de Internet	<1 %
36	dspace.utb.edu.ec Fuente de Internet	<1 %
37	renati.sunedu.gob.pe Fuente de Internet	<1 %
38	www.593dp.com Fuente de Internet	<1 %
39	Submitted to Universidad Católica de Santa María Trabajo del estudiante	<1 %
40	qdoc.tips Fuente de Internet	<1 %

repositorio.unach.edu.pe



Dra. Ada P. Barturen Quispe
Asesora
16721885



31/11

La primera página de tus entregas se muestra abajo.

Autor de la entrega:	Ada Patricia Barturen Quispe
Título del ejercicio:	Ana cerna y carlos
Título de la entrega:	TESIS Análisis proximal y determinación del poder calorífico d...
Nombre del archivo:	TESIS_BIOMASA_INFORME_FINAL_1__finalfinal.docx
Tamaño del archivo:	13.91M
Total páginas:	113
Total de palabras:	23,460
Total de caracteres:	134,159
Fecha de entrega:	05-abr.-2025 07:36p. m. (UTC-0500)
Identificador de la entrega:	2572297321



DEDICATORIA

Agradecer en primer lugar a Dios, a mi madre y hermanos que me brindaron su apoyo en este camino académico recorrido y a mi padre en el cielo, mi madre quien estuvo presente en cada momento de este proyecto dándome esa motivación y fortaleza para culminar este logro tan importante de mi vida.

Carlos S Carlos de la cruz

A dios por la fortaleza, la salud y a las personas que siempre han estado ahí para mí, a mis padres quienes se han dedicado a la tarea más vital, a mis cinco hermanos por ser parte de mi formación profesional por su apoyo incondicional y su motivación constante en cada etapa de este proyecto les estoy eternamente agradecida por enseñarme la perseverancia inclusive en los momentos más difíciles de mi vida.

Anita Liset Cerna Guerrero

AGRADECIMIENTO.

Al finalizar este trabajo tan tedioso y lleno de obstáculos agradecemos a Dios, a nuestros padres y a los asesores por ser nuestra guía, por la paciencia, por compartir su experiencia y a todas las personas que han sido parte del desarrollo de este proyecto con su conocimiento y apoyo en todo momento.

Y de una manera muy especial a la ingeniera Ada Patricia Barturen Quispe por la dedicación y por todo el apoyo brindado durante el desarrollo del presente proyecto.

INDICE.

I.	INTRODUCCIÓN.....	3
1.1.	Formulación del problema de investigación.....	5
1.2.	Objetivos generales y específicos	5
1.2.1.	Objetivo general.....	5
1.2.2.	Objetivos específicos.....	5
II.	DISEÑO TEÓRICO.....	6
2.2.1.	biomasa.....	9
2.2.2.	biomasa lignocelulósica.....	10
2.2.3.	Características de la biomasa de interés.....	11
2.2.3.1.	Cáscara de café.....	11
2.2.3.2.	Bagazo de caña	12
2.2.3.3.	Pajilla de arroz	14
2.3.	Características energéticas de la biomasa.....	16
2.3.1.	Análisis Proximal.....	16
2.3.2.	Contenido de humedad.....	16
2.3.3.	Porcentaje de ceniza.....	17
2.3.4.	Poder calorífico	17
2.3.5.	Definición y operacionalización de variables.....	20
III.	DISEÑO METODOLOGICO	21
3.1.	Diseño de contrastación de hipótesis	21
3.1.1.	Selección y pesado.....	22
3.1.2.	Secado.....	22
3.1.3.	molienda.....	22
3.1.4.	tamizado	23
3.1.5.	porcentaje de Humedad mediante la norma ASTM D3.173.....	23
3.1.6.	Determinación de porcentaje de material volátil. Mediante la norma ASTM D-3.175.....	24
3.1.7.	Determinación de porcentaje de ceniza. Mediante la norma ASTM D-3.174 E ASTM D1102-84 (MUFLA-550OC/750°C).....	24
3.1.8.	Determinación de carbón fijo.....	25
3.1.9.	Determinación de análisis elemental	25
3.1.10.	Determinación del poder calorífico superior (HHV).....	26
3.1.11.	Determinación del factor de emisión de gases	26
3.1.12.	Determinación del índice de combustión.....	27

3.2.	Variables.....	28
3.3.	Población y muestra.....	28
3.3.1.	Población	28
3.3.2.	Muestra.....	28
3.3.3.	Lugar de muestreo y obtención de muestra.....	29
3.4.	Técnicas, instrumentos, equipos y materiales.....	33
3.4.1	instrumentos	33
3.4.2.	Materiales	34
3.4.3.	Reactivos	34
IV.	RESULTADOS	36
4.1.	Determinación de humedad en las muestras trabajadas.	36
4.1.1.	Determinación de humedad en el bagazo de caña en base seca.....	36
4.1.2.	Determinación de humedad de la cascarilla de café en base seca	36
4.1.3.	Determinación de humedad de la cascarilla de arroz en base seca.....	37
4.1.4.	Cuadro resumen del porcentaje de humedad de la biomasa lignocelulósica.....	37
4.2.	Determinación de materia volátil en las muestras trabajadas.	37
4.2.1.	Determinación de materia volátil en el bagazo de caña en base seca.....	37
4.2.2.	Determinación de materia volátil en la cascarilla de café en base seca.....	38
4.2.3.	Determinación de materia volátil en la cascarilla de arroz en base seca	38
4.2.4.	Cuadro resumen de material volátil de la biomasa lignocelulósico base seca	39
4.3.	Determinación de ceniza en las muestras trabajadas.....	39
4.3.1.	Determinación de ceniza en el bagazo de caña en base seca	39
4.3.2.	Determinación de ceniza en la cascarilla de café en base seca	39
4.3.3.	Determinación de ceniza en la cascarilla de arroz en base seca.....	40
4.3.4.	Cuadro resumen de ceniza de la biomasa lignocelulósico base seca.....	40
4.4.	Determinación de carbono fijo de la biomasa lignocelulósico	40
4.5.	Determinación análisis elemental	41
4.5.1.	de cascarilla de arroz.....	41
4.5.2.	Determinación análisis elemental de cascarilla de café.....	41
4.5.3.	Determinación análisis elemental del bagazo de caña.....	42
4.5.4.	Cuadro resumen del análisis elemental de biomasa lignocelulósico en estudio ...	42
4.6.	Poder calorífico superior	45
4.7.	Emisión de gases.....	48
4.8.	Índices de combustión.....	49
V.	DISCUSION	52

VI.	CONCLUSIONES.....	59
VII.	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	62
VIII.	ANEXO.....	75

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 principales fuentes generadoras de biomasa lignocelulósica	10
Figura 2 Capas en una fruta de café	12
Figura 3 Vía de degradación lignocelulósica y sus enzimas.	14
Figura 4 Diagrama de bloques el proceso de medición de Potencial Calorífico de la biomasa lignocelulósica.....	22
Figura 5 Ubicación de la planta molinera tropical provincia de Lambayeque, región Lambayeque, 2023 (https://www.google.com/maps/search/molinera+tropical/@-6.7198433,-79.9172742,13.75z).	29
Figura 6 Ubicación de Posquih distrito Sambernardino provincia San Pablo departamento Cajamarca, 2023(https://www.google.com/maps/place/San+Bernardino+06445/@-7.1687188,-78.8381429,3328m).....	30
Figura 7 Bagazo de Caña Ubicación de Posquih distrito Sambernardino provincia San Pablo departamento Cajamarca 2024.....	31
Figura 8 Ubicación del distrito de Colasay provincia de Jaén departamento Cajamarca, 2023(https://www.google.com/maps/place/Colasay/@-5.9796573,-79.0773703,2806m)	32
Figura 9 Valor encontrado de humedad, material volátil, ceniza, carbón fijo, carbón, hidrogeno, nitrógeno, oxígeno y azufre	46
Figura 10 valor calorífico experimental y previsto de la biomasa utilizando modelos matemáticos.	47

RESUMEN

La biomasa es una fuente de energía renovable y sostenible, por lo que es un enfoque prometedor para abordar las consecuencias medio ambientales. En la agroindustria existen diversos recursos que pueden generar combustibles, productos químicos, energía, electricidad y subproductos. En esta investigación se determinó el poder calorífico mediante el análisis proximal y la composición elemental de la biomasa lignocelulósica de residuos agroindustriales generados en la Región Lambayeque y en la Región Cajamarca. La muestra estuvo conformada por residuos de bagazo de caña, cascarillas de arroz y cascarillas de café. La metodología consistió en obtener los valores del análisis proximal (% de humedad, materia volátil, cenizas y carbón fijo) de los tres residuos agroindustriales, así como también los valores de su composición elemental (% de carbono, hidrógeno, nitrógeno, oxígeno y azufre). El poder calorífico experimental del bagazo de caña, cascarilla de café, cascarilla de arroz, 17.81, 18.51, y 15.4 MJ/KG. Por otro lado, se utilizaron 38 modelos matemáticos para encontrar el poder calorífico estimado lo cual para bagazo de caña, cascarilla de café, cascarilla de arroz, el valor más cercano se obtuvo con el M-10 y los valores fueron 18.09; 18.55 y 15.07 MJ/KG teniendo en cuenta estos valores un nuevo modelo matemático que nos de los valores más próximo al experimental, Se concluyó que el residuo industrial con mayor poder calorífico es la cascarilla de café y la cascarilla de arroz fue la que presentó el menor poder calorífico, el poder calorífico también se puede determinar mediante modelo matemáticos.

Palabras claves: Biomasa, Valores , Poder calorífico y residuos

ABTRACT

Biomass is a renewable and sustainable energy source, which makes it a promising approach to address environmental consequences. In the agro-industry there are various resources that can generate fuels, chemicals, energy, electricity and by-products. In this research, the calorific value was determined through proximate analysis and the elemental composition of the lignocellulosic biomass of agro-industrial waste generated in the Lambayeque Region and the Cajamarca Region. The sample consisted of sugarcane bagasse, rice husks and coffee husks. The methodology consisted of obtaining the values of the proximate analysis (% of humidity, volatile matter, ash and fixed carbon) of the three agro-industrial wastes, as well as the values of their elemental composition (% of carbon, hydrogen, nitrogen, oxygen and sulfur). The experimental calorific value of cane bagasse, coffee husk, rice husk, 17.81, 18.51, and 15.4 MJ/KG. On the other hand, 38 mathematical models were used to find the estimated calorific value which for cane bagasse, rice husk coffee, rice husk, the closest value was obtained with the M-10 and the values were 18.09; 18.55 and 15.07 MJ/KG, taking into account these values a new mathematical model that gives us the values closest to the experimental one. It was concluded that the industrial waste with the highest calorific value was coffee husks and that rice husks were the one that presented the lowest calorific value, where the calorific value can also be determined by mathematical models.

Keywords: Biomass, Values, Calorific value and waste

I. INTRODUCCIÓN

La biomasa residual son productos biológicos, desechados por el sector agroindustrial que pueden ser aprovechados o transformados para obtener otros productos con valor económico, comercial o social, a su vez, la biomasa puede clasificarse en comestible, no comestible, y residual.(Corredor & Pérez, 2018). Los subproductos más utilizados como biomasa como fuente principal tenemos residuos de la caña y residuos provenientes del arroz (OCDE-FAO Perspectivas Agrícolas 2023-2032A, s. f.) los residuos rurales y urbanos también contribuyen en la producción de lignocelulosa. de las frutas, verduras, la cachaza, la carbonilla, residuos, la cáscara del plátano, cáscara de café, la zoca de café, asimismo los residuos de material verde como las cáscaras, hojas, tallos (de-Lucas et al., 2012) estos contienen cantidades importantes de celulosa, hemicelulosa, lignina, siendo sustratos importantes en la agricultura (R et al., 2017; Rosas-Calleja, 2016; Fuentes et al., 2023).

La biomasa lignocelulósica residual es un recurso renovable, se genera en grandes cantidades en la naturaleza, es aprovechado en diferentes productos químicos y combustible(Mujtaba et al., 2023), Se considera una fuente de energía convertible, además reduce el impacto de emisiones de CO₂. Este producto biológico está compuesto por 10 -55 % de celulosa, 11 - 65 % hemicelulosa y de 3.5-40 % lignina (Rezahasani et al., 2024) el análisis elemental en base seca está formado de 30% a 40% de oxígeno, 30% a 60% de carbono, de 5% a 6% de hidrogeno y un mínimo contenido de cenizas..(Afanasjeva et al., 2017).

En el 2013, La Organización para la Agricultura y la Alimentación (FAO), informó que a nivel mundial se generan 250 millones de toneladas de desechos agroindustriales por año, siendo la materia prima renovable más abundante la biomasa lignocelulósica, con una producción mundial anual de alrededor de 182 mil millones de toneladas, de las cuales solo se utiliza alrededor de 8 mil millones de toneladas (Abo et al., 2019; Lopes & Ligabue-Braun, 2021; N. Singh et al., 2022), los principales residuos son la cascarilla de arroz, bagazo de caña y cascarilla de café, siendo este los producto más importante con un 90,5 % de residuos (R et al., 2017). El bagazo es uno de los más abundantes obteniéndose 221 millones de toneladas métricas/año. La cascarilla de arroz constituye el 20% del peso del arroz (Gonzalez et al., 2017; Pattanaik et al., 2019; Koul et al., 2022).

Perú es el principal productor de residuos orgánicos, la cantidad que se genera cada año se estima en 10 millones de toneladas métricas, siendo la caña de azúcar, el principal generador de bagazo con una cantidad de 3,103,932T y el arroz proporciona 395,323T de cascarilla (Marcelo-Aldana & Alamo Viera, 2016) asimismo las diferentes regiones tienen 429,709 ha de café, las cuales tienen una producción anual de 237 mil toneladas, el 60% conformado por cerezo y el 40% residuo, sin embargo, solo el 20% es compostado o convertido en fertilizante (Gestión, 2018). En Lambayeque, estos residuos son una de las fuentes primordiales para la obtención de biomasa, (Gerencia Regional de Agricultura Lambayeque, 2019).

Estos subproductos son aprovechados en la conversión para la producción biocombustibles. A partir del bagazo de caña de azúcar se puede obtener carbón activado, biogás y bioetanol (Lombardi et al., 2015; Muñoz Solares, 2017; Vats et al., 2019; Guo et al., 2020; Hernández-Olivares et al., 2020). La cascarilla de café es valorada por su alto poder calorífico de 16MJ/Kg (Elizabeth, Carvajal & Luisa Fernanda Marulanda, 2021). La cáscara de arroz es considerada una fibra con facilidad de absorber agua. Además, la ceniza de cáscara de arroz se ha aplicado como aditivo en muchos materiales y aplicaciones, como ladrillos refractarios, fabricación de aislamiento y materiales para retardantes de llama (B. Singh, 2018; AboDaham et al., 2022). En la sierra del Perú es común ver desechos sin ningún uso energético. Son pocas las familias que utilizan estos desperdicios como fuente de calor para generar energía ya sea para cocinar o bio abono como la cáscara de café (Hamza et al., 2023)

Por las razones expuestas, la presente investigación se enfoca en la selección y caracterización fisicoquímica de la biomasa residual agroindustrial de la región Lambayeque y Cajamarca. La cáscara de café, bagazo y cascarilla de arroz las cuales son considerados como residuos industriales, ya que comúnmente son separados y abandonados en el suelo por su inadecuada disposición, formando pilas de varias toneladas, llegando a descomponerse, además en gran parte son quemados generando contaminación en el ambiente. Sin embargo, las aplicaciones tecnológicas pueden transformar la biomasa en energía. Este proyecto pretende caracterizar y determinar subproductos de tres materiales orgánicos agroindustriales más aprovechables en la región Lambayeque.

El presente estudio proporcionará una base de datos para cada subproducto, en donde se señalará los siguientes parámetros: Determinación del poder calorífico mediante el análisis proximal; contenido de volátiles, cenizas, humedad inicial, extraíbles con el propósito de determinar sus características energéticas para la generación de energía limpia.

1.1. Formulación del problema de investigación

¿Es posible determinar el poder calorífico mediante el análisis proximal y la composición elemental de la biomasa lignocelulósica de los residuos agroindustriales de cáscara de café, pajilla de arroz y bagazo de caña en su conversión a biocombustible?

Hipótesis

Ha: Sí es posible determinar el poder calorífico mediante el análisis proximal y la composición elemental de la biomasa lignocelulósica de los residuos agroindustriales de cáscara de café, pajilla de arroz y bagazo de caña en su conversión a biocombustible.

Ho: No es posible determinar el poder calorífico mediante el análisis proximal y la composición elemental de la biomasa lignocelulósica de los residuos agroindustriales de cáscara de café, pajilla de arroz y bagazo de caña en su conversión a biocombustible.

1.2. Objetivos generales y específicos

1.2.1. Objetivo general

Determinar el poder calorífico mediante el análisis proximal y la composición elemental de la biomasa lignocelulósica de residuos agroindustriales generados en la Región Lambayeque y en la Región Cajamarca

1.2.2. Objetivos específicos

- Determinar el análisis proximal, (% humedad, materia volátil, cenizas y carbón fijo) de residuos agroindustriales bagazo de caña, cascarilla de arroz y cascarilla de café.
- Determinar la composición elemental, (% carbono, hidrogeno, nitrógeno, oxígeno y azufre) de los residuos agroindustriales bagazo de caña, cascarilla de arroz y cascarilla de café.
- Determinar el poder calorífico de la biomasa de los residuos agroindustriales bagazo, cascarilla de arroz y cascarilla de café mediante diferentes modelos matemáticos.
- Determinar el factor de emisiones gaseosas, (carbón, monóxido de carbono, metano, dióxido de carbono, NOx y dióxido de azufre) de los residuos agroindustriales bagazo, cascarilla de arroz y cascarilla de café.

- Determinar los índices de combustión, (relación de combustión, índice de combustibilidad, índice de inflamabilidad) de los residuos agroindustriales bagazo, cascarilla de arroz y cascarilla de café.

-

II. DISEÑO TEÓRICO

2.1. Antecedentes del problema

(Park et al., 2021) Determinaron la relación el poder calorífico y la relación atómica de hidrógeno a carbono de café gastados mediante carbonización hidrotermal. Las muestras fueron tratadas a diferentes temperaturas, como 170, 200, 220 y 250 °C, se denominaron SCG (temperatura, tiempo). El contenido de humedad del café fue <50%, material volátil 83,3 %, C fija 1,5 %, ceniza 15,3 %. SCG (170,1): materia volátil 80,9 %, C fija 17,9 %, ceniza 1,2 %, SCG (200,1): materia volátil 79,1 %, C fija 19,7 %, ceniza 1,2 %, SGC (220,1): materia volátil 75,2 %, C fija 23,8 %, ceniza 1,0 %, SCG (250,1): 62,8 %, C fija 36,2 %, ceniza 1,0 %; y se obtuvo un HHV 33.66 MJ/KG, no obstante, se demostró que a 250°C se redujo la relación atómica H/C, el biocarbón producido de los residuos de café se sometió a la carbonización hidrotermal (HTC) a 200°C siendo este la temperatura óptima para conversión.

(Hamza et al., 2023) determinaron el análisis proximal y el mayor valor calorífico (HHV) de diez muestras de biomasa comunes en Nigeria. La biomasa que consideraron fue cáscara de arroz, paja de arroz, mazorca de maíz, astillas de madera, cáscara de maní, dátil del desierto, cáscara de coco, palmiste, paja de mijo y bagazo de caña de azúcar. Se emplearon ocho correlaciones lineales y cinco no lineales con buen desempeño de la literatura para predecir el HHV de la biomasa a partir de datos de análisis próximos. El desempeño de los modelos se probó utilizando indicadores estadísticos. Los resultados del análisis aproximado mostraron variación debido a los cambios en la composición y propiedades de los diferentes materiales de biomasa. El carbono fijo varió del 13,73% al 22,45%, la materia volátil estuvo en el rango del 69,53% al 22,45%. 84,15%, y el contenido de cenizas estuvo en el rango de 2,12% a 17,28%. La cáscara de maní y la cáscara de coco contienen 22,45 y 22,34% de carbono fijo, mayor que todas las demás muestras. Las astillas de madera mostraron un buen HHV debido al alto contenido de volátiles y al bajo contenido de cenizas. La paja y la cáscara de arroz tienen un contenido de cenizas de 17,28 y 16,58. Se concluyó que para el modelo matemáticos lineales, M1 con error absoluto promedio (AAE), error de sesgo promedio

(ABE) y error cuadrático promedio (RSME) de 3,8389%, 2,5002% y 0,8780 MJ/kg; y M7 con AAE, ABE y RSME de 3,8918%, 2,2301% y 0,8701 MJ/kg son mejores que otros modelos lineales. Considerando los modelos no lineales, M9, M12 y modelo M13.

(Mukherjee et al., 2021) En su estudio determinan la degradación térmica y la cinética de pirolisis de residuos de café agotados y cascara de café para ello analizan las propiedades físico químicas y elementales como ceniza, humedad, volatilidad y carbono fijo tomando en cuenta las normas ASTM. Las muestras se evaluaron en una temperatura 25 a 800 °C respetando una rampa de 5 a 20 °C/min en tres etapas de descomposición: 230, 560 y 800°C, en su análisis elemental evaluaron carbono, hidrógeno, azufre, nitrógeno y oxígeno. Los resultados obtenidos de los residuos de café fueron: Humedad 47.1%; 2,7%. Cenizas 0,9%; 1,7%. Carbono Fijo 11,6%; 17,9%. Volatilidad 40,4%; 77,7%. C 50%; 48,5%. H 6,7%; 5,9%. S 0,9%; 2,8%. N 2,5%; 0,6%. O 39,9% 42,2%. con dichos resultados obtuvieron el poder calorífico superior experimental de residuo de café agotados que es de 22,3Mj/Kg y de 20,4 Mj/Kg para la cascara de café. Los autores llegaron a concluir que el TGA de los residuos de café agotados y cascara de café muestran degradación en tres periodos distintos de pérdida de peso, la primera de humedad y componentes volátiles seguidamente de la pérdida de Holocelulosas y finalmente a la degradación de lignina y la generación de carbón, en los parámetros cinéticos se obtuvo una energía de activación promedio de 101,6Kj/mol para residuos de café agotados y 106,2Kj/mol para cascara de café, también concluyen que ambas muestras son aptas para la producción de combustibles y químicos verdes además que esta biomasa cuenta con un elevado poder calorífico.

(Nam et al., 2020) El objetivo de esta investigación es exponer un banco de datos completo e íntegro de las características físicas, elementales y lignocelulósicas de diez residuos de biomasa entre ellos la cascara de arroz, paja de arroz y bagazo de caña ya que estos se localizan de forma numerosa en Vietnam y otros estados. Los autores recolectaron los residuos en distintas fábricas de la ciudad de Vietnam, luego identificaron el porcentaje de humedad haciendo uso de las normas ASTM, seguidamente estas muestras fueron lavadas con agua destilada para descartar sedimentos o residuos y se deshumedecieron en un horno a 105°C por 24 horas, posteriormente fueron molidas y tamizadas hasta obtener piezas menores de 0,5 mm de diámetro, para los índices de material volátil y ceniza también se tomó en cuenta las ASTM D 3175-07 y 3174-04, para carbono fijo hicieron uso de una formula, el poder calorífico superior fue estimado mediante el empleo de un calorímetro y la presencia

de C,H,N,O,S mediante un analizador elemental obteniendo así los siguientes resultados: cascara de arroz; humedad 9,53%, volatilidad 66,17%, carbono fijo 17,62%, ceniza 16,21%, C 48,89%, H 6,22%, N 0,09%, O 44,72%, S 0,08%, poder calorífico superior 13,68Mj/Kg. Paja de arroz: humedad 10,01%, volatilidad 71,02%, carbono fijo 15,47%, ceniza 13,51%, C 47,56%, H 6,55%, N 0,01%, O 45,72%, S 0,16%, poder calorífico superior 14,27Mj/Kg. Bagazo de caña: humedad 10,21%, volatilidad 74,98%, carbono fijo 17,11%, ceniza 7,91%, C 49,3%, H 6,55%, N 0,02%, O 43,88%, S 0,25%, poder calorífico superior 15,76Mj/Kg. Ellos concluyen que los resultados destacan la variación de la biomasa en la naturaleza y que las características obtenidas ayudarían para la selección de equipos de transformación de energía y del mismo modo ver la calidad del producto y que los residuos con mayor porcentaje de ceniza son poco beneficiosos para los procesos de conversión termoquímica.

(Setter et al., 2020) en su investigación estudiaron las cinéticas de la biomasa, asimismo determinaron el efecto de la temperatura de pirólisis sobre las propiedades de la cascarrilla de café. La biomasa se analizó en TGA, bajo N₂ con 30 ml/mn, y se calentaron hasta una temperatura de 1173 K a velocidades de 5, 10, 15 y 20 K/mn. Las briquetas de cascarrilla de café fueron producidas por densificación, luego fueron sometidas a temperaturas de 623 K, 673 K y 723 K, teniendo una velocidad de calefacción de 0.5k/min. Donde la TGA mostró que la pirolisis de la cascarrilla de café ocurrió a temperaturas entre 400 K y 700 K. La cascarrilla de café como materia prima para la obtención de productos por pirólisis es muy interesante. Se concluyó que TG/DTG mostraron que la velocidad de calentamiento es mayor a altas temperaturas y tiende a perder la masa de la materia. por otro lado, las bajas tasas de calentamiento conducen a una mejor transferencia de calor dentro y entre las partículas y permiten una mejor visualización de la dinámica de degradación de las cascarrillas de café.

(El-Sayed, 2019) estudió la cinética de degradación térmica de la cáscara de arroz. La humedad inicial del producto fue 18 %, utilizaron 4.026 5.709 mg de muestra en tamices de 38-200 um y 200-1000 um respectivamente temperaturas de 10, 15 y 20 °C bajo N₂. Para determinar los parámetros cinéticos de la pirolisis aplicaron el factor de frecuencia (A), energía de activación, constante de los gases (E) y orden de reacción (n). En el análisis de las propiedades fisicoquímicas donde se obtuvo un elevado de material volátil y bajos contenidos de humedad y cenizas. La TG/DTG a diferentes tamaños y velocidades de calentamiento indicó una degradación térmica de los lignocelulósicos. Los valores E y A dieron valores bajos, asimismo a medida que aumenta el tamaño de las partículas, los valores de la energía

de activación (E) y el factor de frecuencia (A) aumentan. Concluyeron que los tamaños más grandes (200–1000 μm) tienen una temperatura de ignición más baja, energía de activación más alta y tiempos de ignición más bajos en comparación con los tamaños de 38–200 μm .

(Manals-Cutiño et al., 2019). En su investigación tienen como finalidad estudiar la composición física y química de la cascarilla de café de distintos diámetros, para ello se cercioraron que la biomasa este por debajo del 10% de humedad para luego proceder a la selección de las muestras, ellos emplearon el método de cuarteo manual de cono y anillo seguidamente las colocaron en un tamiz por 20 minutos. Esta separación permite calcular el diámetro promedio (D_p) de las partículas y de la misma manera seleccionarlás por orden desde 0,59Dpmm a 3,36Dpmm. Sus resultados oscilan entre 9,86% a 12,33% de humedad, 67% a 79%, de material volátil, 2% a 8% de ceniza, 17% a 23% de carbono fijo. Concluyendo que al menor la granulometría de la partícula el material volátil disminuye y por otro lado la concentración de ceniza es inversamente al material volátil mientras que la humedad y el carbón fijo no presentan una definición definida entre el tamaño de la partícula, también afirman que el análisis granulométrico tiene alto grado de acumulación en los rangos de 0.59 mm a 3.36 mm, de tal manera que el diámetro de todas las partículas influye mucho en las propiedades.

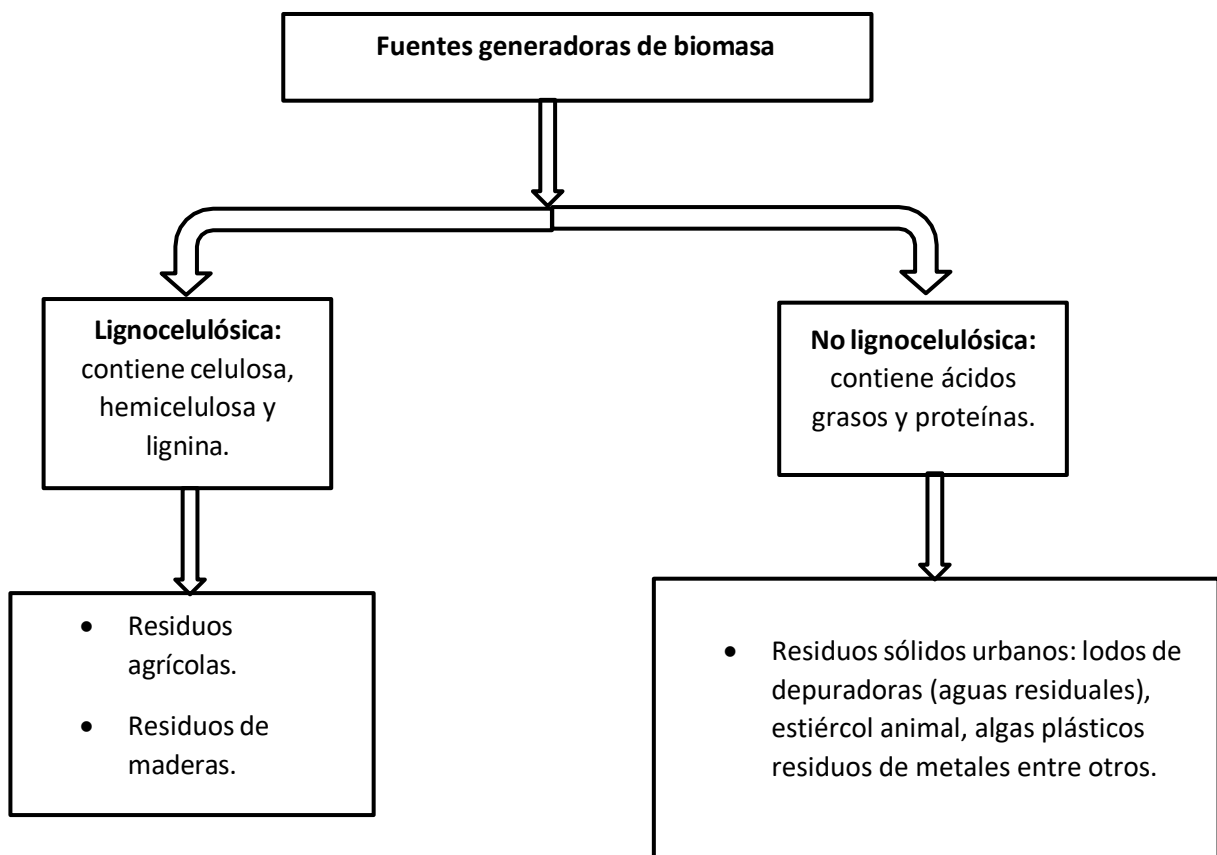
2.2. Base teórica

2.2.1. biomasa

La biomasa es materia orgánica renovable y es originada de organismos vivos ya sea de forma natural o residual, la biomasa está formada por una parte orgánica, inorgánica y agua, se puede fraccionar en dos clases esenciales: biomasa lignocelulósica y biomasa no lignocelulósica (Lu et al., 2021)

Figura 1

Principales fuentes generadoras de biomasa lignocelulósica.



Nota. Elaboración propia de autores 2024.

2.2.2. biomasa lignocelulósica.

La biomasa lignocelulósica es considerada una materia prima sostenible más abundante sobre la tierra, donde la lignocelulósica es principal componente de la pared celular de la planta. (Burgos-Arcos et al., 2022), este juega un papel importante por su gran disponibilidad que encuentra en la corteza terrestre, son generados estos subproductos de las diferentes agroindustrias y forestales (Jara Huacacolqui et al., 2022). En la lignocelulósica se puede encontrar, celulosa, hemicelulosa y lignina que pueden tener un valor aproximado entre 40 60%; 30 40% y 10 25%, y son principalmente provenientes de residuos agrícolas (Mo et al., 2018; Parra Reyes & Pérez, 2022)

2.2.3. Características de la biomasa de inrés

2.2.3.1. Cáscara de café

El café es un producto del cafeto, pertenece a la familia de las *Rubiaceae* y al género *Coffea*, siendo las especies relevantes Arábica y la Robusta. Estas plantas crecen en temperatura de 20° a 25° C y una humedad atmosférica específica, sin embargo, son sensibles a los vientos y temperaturas bajas. La primera cosecha del cafeto se produce alrededor de los 2 años, asimismo estos árboles pueden crecer hasta 12 metros de altura y pueden llegar a vivir 50 años. Sus frutos son redondos, suaves, ligeramente agrio, de color marrón oscuro, con una corteza lisa y un olor agradable y sublime (ministerio de agricultura, s. f.; Torres-Valenzuela et al., 2019). Cabe destacar que el fruto se caracteriza por tener cáscara; pulpa; mucílago; pergamino; piel plateada; y frijoles. En el procesamiento seco los desechos generados son las cascarillas (pulpa seca, pergamino, cáscara y el mucílago). En cuanto al procesamiento húmedo, existen dos desechos, la pulpa húmeda (incluida la piel exterior) y el pergamino seco (incluyendo una parte del mucílago) (Cangussu et al., 2021).

La cascarilla de café es un subproducto, está compuesto de la piel seca, la pulpa y el pergamino. Sus características fisicoquímicas son los lípidos (0,5–3 %), proteínas (7–17 %), contenido de carbohidratos (16–85%), celulosa (14,7–46,1 %), hemicelulosa (10,2–29,7 %) y lignina (10,1–34,2 %), N (1,48 %) (Cangussu et al., 2021). Además tiene poder calorífico de 4162,31.K.cal.Kg - 1, no obstante puede alcanzar hasta 4319,98 K. cal.Kg-1 y el alto contenido de materia volátil hace que la cascarilla de café sea adecuada para aplicaciones de combustión y gasificación a gran escala (Aguas & Villarreal, 2016).

Figura 2

Capas en una fruta de café.

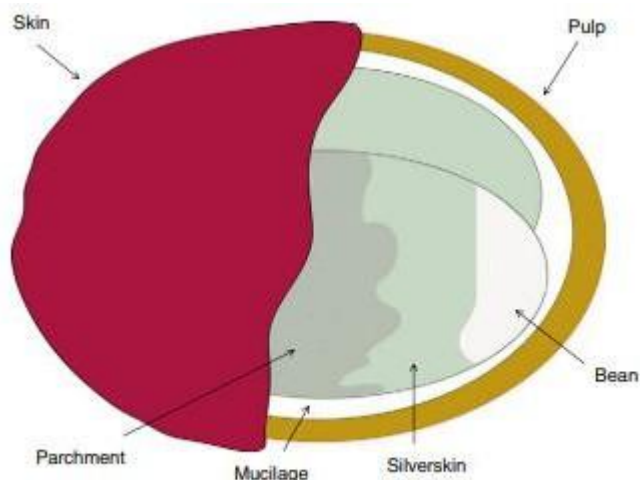


Fig. 1. Layers in a coffee fruit.

Nota. Estructura del grano de café rescatado de *Functional properties of coffee and coffee by-products* 2012(Esquivel & Jiménez, 2012)

Según (Mutuku, 2019), La humedad de la cascarilla de café es alrededor de 8,8 %, mientras que la cenizas presentó un valor de 3,9 %, asimismo el porcentaje de materia volátil es de 78,4 %. La biomasa lignocelulósica es un material vegetal más abundante, sirve como fuente de energía, se ha incrementado significativamente en las últimas décadas. Las propiedades que informan sobre un combustible son los valores caloríficos, la composición de las cenizas, la próxima (determinación de la humedad, las cenizas, el contenido de carbono volátil y fijo) y el análisis final (composición de C, H, N, S y O) (Braza & Crnkovic, 2014).

2.2.3.2. Bagazo de caña

La caña de azúcar de la familia “*Gramínea*”, perteneciente al género “*Saccharum*”; son importantes e indispensables en la producción de azúcar así como para el bioetanol, teniendo como subproducto a una gran abundancia de bagazo, este posee un gran potencial en los biocombustibles (Peng et al., 2021). Además, es un residuo sólido que contiene (32-45 %) celulosa, (20-32 %) hemicelulosa, (17-32 %) lignina, (1-9 %) ceniza. No obstante, la presencia de celulosa y hemicelulosa del bagazo, es utilizado como biomasa durante generación de biocombustibles, electricidad, enzima, como otras materias primas de valor

agregado, asimismo, es utilizado para eliminar metales tóxicos y pesados como Pb, Zn, Cd y otros (Alokika et al., 2021).

El bagazo es un residuo del proceso de fabricación del azúcar a partir de la caña, este recurso es uno de los más prometedores ya que forma parte de la energía renovable. La conversión termoquímica de biomasa son técnicas factibles para recuperar el poder energético de este producto (Adeniyi et al., 2019), el proceso termoquímico del pirólisis rápido realiza la conversión de combustible sólido a producto líquido, mientras que, el proceso de gasificación comprende fenómenos de todas las rutas de conversión termoquímica en el proceso del pirólisis (Brandão et al., 2018)

Tabla 1

Análisis próximo y último del bagazo de caña de azúcar (2019)

Análisis proximal	%
Humedad	5.92
Carbón fijo	10.91
Material volátil	81.55
Ceniza	1.62
Análisis último/elemental (wt % libre de miostura)	
Carbón	45.50
Hidrogeno	5.63
Azufre	ND
Oxigeno	48.07
Nitrógeno	0.80
ND no detectado	

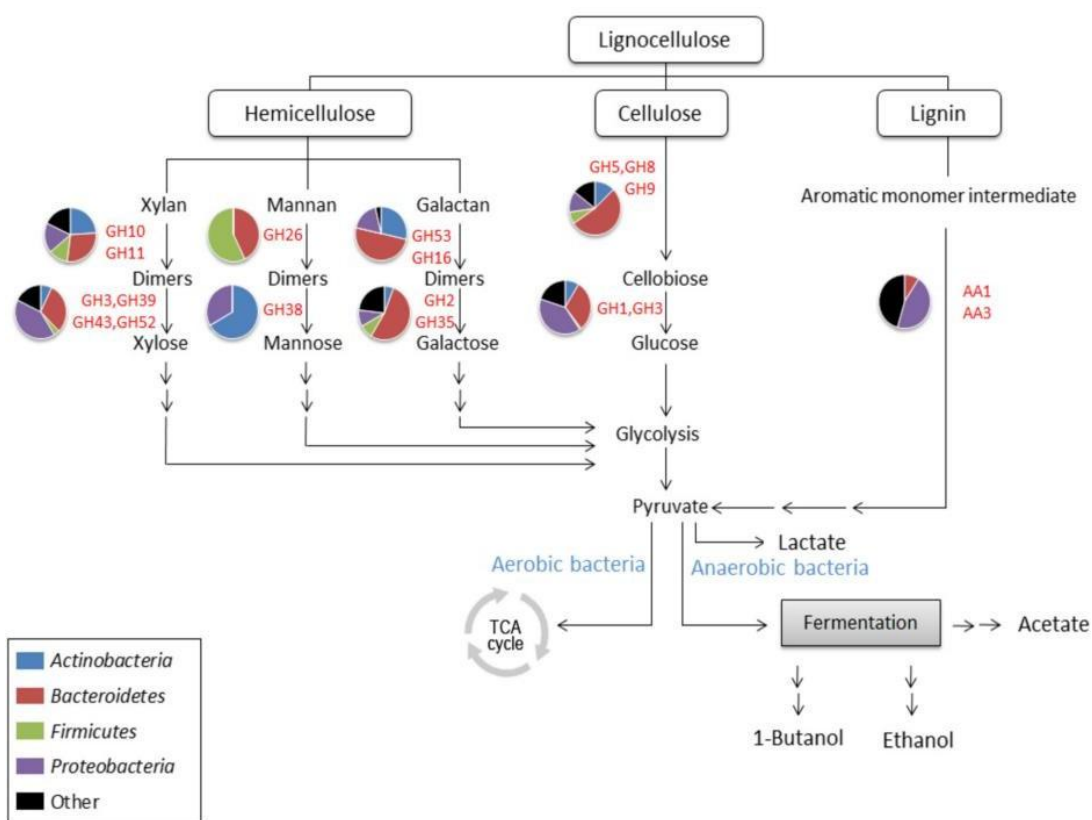
Nota. Datos tomados de Modelación de procesos integrados para la recuperación del contenido energético del bagazo de caña de azúcar Adeniyi, A (2019).

La biomasa lignocelulósica en los últimos años viene siendo más investigada por que este tipo de biomasa es recurso renovable se puede convertir en producto de valor agregado. Su estructura consiste principalmente en polímeros de carbohidratos como hemicelulosa, celulosa, lignina. La descomposición de la lignocelulósica es debido a su

alto contenido de material celulósico a alta temperatura y bajo contenido de nitrógeno. así mismo la comunidad microbiana que se puede encontrar en el bagazo es capaz de producir varios tipos de enzimas suficientes para la desintegrar la celulosa, hemicelulosa, en diferentes monosacáridos que son fuentes de energía esencial en actividades aeróbicas. El sistema de la degradación de la lignocelulósica, por su alta composición de carbohidratos requiere de una amplia cantidad de enzimas en acción para desintegrarse y dando como resultado otros subproductos de gran utilidad (Mhuantong et al., 2015).

Figura 3

Vía de degradación lignocelulósica y sus enzimas.



Nota. La figura muestra el Proceso simplificado de degradación de biomasa y enzimas involucradas 2015. Fuente: Mhuantong W (2015).

2.2.3.3. Pajilla de arroz

La casca de arroz es un subproducto que se obtiene después del proceso de pilado de los granos del arroz que son trasladados de campo a los molidos donde sufre este proceso, esto se encuentra en la parte exterior del grano de arroz maduro compuesta por

tejido vegetal lignocelulósico, puesto que tiene una naturaleza fuerte, leñosa lo cual le proporciona una naturaleza más resistente a factores ambientales, cubriéndole de la

Naturaleza que le puede proporcionar cualquier tipo de daño en su desarrollo, no es apta para el consumo humano debido a su alto contenido de sílice, en algunas ocasiones suele usarse como alimento de animales, y por otro lado al ser quemado este material proporciona un porcentaje de ceniza lo cual está compuesto principalmente por sílice dándole una aplicación en la fabricación de cementos, etc. La conductividad térmica residuos de cascarilla de arroz es baja. (et al., 2013)

Tabla 2

Análisis de la cascarilla de arroz en 3 países

Parámetros	Canadá				California		Colombia		
	V1	V2	V3	V4	Vi	Vt	Y1	Y2	Y3
C	37,60	42,10	38,70	42,60	38,83	38,24	42,5	39,1	33,4
H	5,42	4,98	4,70	5,10	4,75	5,20	6,0	5,2	4,3
O	36,56	33,66	31,37	33,44	35,47	36,26	36,2	37,2	38,5
N	0,38	0,40	0,50	0,51	0,52	0,87	0,21	0,27	0,38
S	0,03	0,02	0,01	0,02	0,05	0,18	0,49	0,43	0,32
Cl	0,01	0,04	0,12	0,13	0,12	0,58	-----	-----	----
Ceniza	20,00	18,80	24,60	18,20	20,26	18,67	14,6	17,8	23,1
Total	100	100	100	100	100	100			
Poder calórico (Mj/kg)	14,22	13,24	13,40	14,12			-----	-----	-----

Nota. Datos tomados de Vargas et al. Caracterización del subproducto cascarillas de arroz en búsqueda de posibles aplicaciones como materia prima en procesos. Vargas et al (2013).

2.3. Características energéticas de la biomasa.

En todo el mundo la biomasa es la fuente principal de energía renovable más grande utilizada.

Tabla 3

Resultado de análisis elemental de algunos residuos industriales 2018

Biomasa	Humedad (%)	Volátiles (%)	Ceniza (%)	C (%)	H (%)	O (%)	N(%)
Almendras	6.5	93	1.7	62.5	8.8	26.6	2.1
Afrecho	10.5	81	3.5	59.6	5.5	42.5	2.4
Cascarilla de café	10.1	82	1.2	50.3	5.3	43.8	< 1
Bagazo de caña	16.07	79.6	4.34	58.1	6.05	41.6	0.83
Paja de arroz	13.61	76.8	9.54	50.9	6.04	41.6	0.83
aja de legumbre	9.8	73.7	1.62	43.3	5.62	50.3	0.61
Tallo de tabaco	8.54	65.5	9.97	39.6	4.85	52.3	3.18
Aserrín de pino	5.01	77.7	0.34	50.3	6.72	42.7	0.16
Semilla de albaricoque	8.52	75.1	16.94	44.4	5.74	49.4	0.37
Bagazo de uva	6.2	68.4	4.7	46.6	6.25	45.5	1.67

Nota. La tabla muestra resultados de la caracterización de biomasa (Manals-Cutiño et al., 2018)

2.3.1. Análisis Proximal

Es considerado como un método de análisis general, el cual permite analizar (humedad, materia volátil, porcentaje de ceniza y carbón fijo), antes de realizar estos analices se debe realizar un pre tratamiento a la muestra (Baray-Guerrero, 2020)

2.3.2. Contenido de humedad

La humedad representa un parámetro de importante variable en la biomasa, ya que es una clave para caracterizar el comportamiento de absorción de agua de la biomasa, donde el poder calorífico de estos subproductos es dependiente del porcentaje de la humedad, para determinar se toma en cuenta la base seca. Siendo CH_x la humedad en base humedad y CH_u la humedad en base seca, por lo tanto cuando más bajo sea el contenido mejor será el valor calorífico de esa biomasa y el proceso de combustión (Arroyo-Vinueza & Reina-Guzmán, 2016)

$$CH_x = (Ph - Po)/Po$$

$$CH_x = (Ph - Po)/Ph$$

2.3.3. Porcentaje de ceniza

Indica el porcentaje de materia solida no combustible por kilogramo de materia orgánica, el residuo de la agro industrias que puede generar energía eléctrica el cual implica la quema de estos residuos a altas temperaturas, uno de los más utilizados en este proceso es el bagazo de la caña, quedando como residuo la ceniza y su composición química es el SiO_2 , por ende tiene un gran potencial, por ende permite ser utilizado como un aditivo en morteros y también está involucrado en la elaboración del Clinker (Berenguer et al., 2018) donde muestra que el contenido de material solido no combustible de estos residuos su porcentaje en comparación a la materia seca menor posible. (Baray-Guerrero, 2020)

2.3.4. Poder calorífico

Es el potencial energético de la biomasa que tiene la capacidad de generar energía. El poder calorífico de la biomasa indica la energía total liberada durante el proceso de combustión, este es el contenido de energía por unidad de masa del combustible (Sagastume Gutiérrez et al., 2020), Además, (Roy & Ray, 2020) menciona que el HHV a partir de la composición aproximada de la biomasa es de gran interés ya que puede ahorrar pruebas de laboratorio costosas y que consumen mucho tiempo. Asimismo, el contenido calorífico de la biomasa a menudo se determina experimentalmente y se reporta como poder calorífico bruto o poder calorífico superior (HHV), de las diferentes biomazas que reporto en su estudio llego a la conclusión que la composición máxima del HHV (19.148MJ/kg) teniendo en cuenta que (Krishnan et al., 2018) en su estudio de treinta y cinco biomas diferentes reportados predijo que el HHV se encuentran entre 17 y 20 MJ/Kg con una desviación estándar que cambia de 0.74 a 1.48 MJ/kg

Se puede utilizar parámetros para los cálculos y simulaciones numéricas del proceso térmico de la biomasa para evaluar el contenido energético y la calidad de los combustibles. El poder calorífico superior PCS, viene a ser el valor máximo liberado de energía y el poder calorífico inferior PCI representa la cantidad liberada en forma de calor después de producir la combustión completa de la biomasa (Arroyo-Vinueza & Reina-Guzmán, 2016; Ardila et al., 2024)

$$PCI = (PCS - 600(u - 6h))/(1 + u)$$

El poder calorífico superior HHV de la biomasa se mide experimentalmente en el equipo de calorímetro de bomba, y por otro lado también se puede determinar el HHV mediante ecuaciones lineales y no lineales, estas ecuaciones se pueden encontrar variables dependiente e independiente para las variables independientes se toma como dato los cálculos de análisis gravimétrico y elemental (Krishnan et al., 2018).

Modelos matemáticos para calcular el poder calorífico de la biomasa lignocelulósica

Según (Vargas-Moreno et al., 2012), menciona diversos modelos matemáticos para calcular el poder calorífico. En su estudio se seleccionó modelos lineales que emplean información de análisis proximal, que incluye FC, VM Y Ash (ceniza) estos modelos están basados en el análisis elemental al ser utilizados con carbón, alcanzando una importancia significativa.

Tabla 4

Ecuaciones de modelo matemáticos para el cálculo del poder calorífico

Ecuación	Modelo matemático	Referencia
HHV = 0.1905[VM] + 0.2521[FC]	M-1	(Yin, 2011)
HHV= -19.81966 + (0.36458xMV) + (0.50963xCF) + (0.19723xASH)	M-2	
HHV= 27.78887- (0.10382xVM) – (0.30807xASH)	M-3	(Krishnan et al., 2018)
HHV = 1.901 + 0.29634*C + 0.751064*H - 0.046232*O + 0.46429*N + 8.67449*S	M-4	
HHV=6.39872 + (0.27418 x C) + (0.55370 x H) – (0.091826 x O)	M-5	

$HHV = -19.81996 + 0.36458 * VM + 0.50963 * FC + 0.19723 * ASH$	M-6	(Roy & Ray, 2020)
$HHV = 0.349 \times C + 1.01 \times H - 0.174 \times N + 0.886 \times S - 0.081 \times O$	M-7	(Shi et al., 2016; Dashti et al., 2021)
	M-8	
$HHV = 10.982 + 0.1136 * MV - 0.2848 * ASH$		(Rodríguez-Romero et al., 2022)
$HHV = (0.3536 * FC) + (0.1559 * VM) - (0.0078 * ASH)$	M-9	
$HHV = -3.0368 + 0.2218 * VM + 0.2601 * FC$	M-10	(Hamza et al., 2023)
	M-11	
$HHV = -17.507 + 0.3985 * MV + 0.2875 * CF$		(Parikh et al., 2005; Hamza et al., 2023)
$HHV = 19.050 + 0.124 * FC - 0.021 * VM - 0.167 * A - 0.001 * [FC]^2 + 0.000018 * [VM]^2$	M-12	(Hossain & Roy, 2019; Hamza et al., 2023)
$HHV = 15.2 + 0.192 * FC$	M-13	
$HHV = 14.2 + 0.38 * FC - 0.00721 * (FC)^2$	M-14	
$HHV = 14.2 + 0.38 * FC - 0.00758 * (FC)^2 + 0.0417 * ASH$	M-15	
$HHV = 13 + 0.392 * FC - 0.00735 * (FC)^2 - 0.0231 * ASH + 0.0149 * VM$	M-16	
$HHV = 13.8 + 0.402 * FC - 0.00833 * (FC)^2 + 0.742 * (ASH)^{-1} + 0.0003 * (VM * ASH)$	M-17	
$HHV = 356 - 3.2 * FC - 3.41 * (VM + ASH)$	M-18	(Erol et al., 2010)
$HHV = 18.2 + 0.137 * FC - 0.00031 * (VM)^2 - 0.0071 * (ASH)^2$	M-19	
$HHV = 0.3391 * C + 1.444 * H - 0.1279 * O + 0.1047 * S$	M-20	(Huang & Lo, 2020)
$HHV = 0.301 * C + 0.525 * H + 0.064 * O - 0.763$	M-21	
$HHV = 0.3137 * C + 0.7009 * H + 0.0318 * O - 1.3675$	M-22	
$HHV = 0.2949 * C + 0.8250 * H$	M-23	
$HHV = 0.341 * C + 1.323 * H - 0.1194 * O - 0.1194 * N + 0.0685 * S - 0.0153 * ASH$	M-24	
$HHV = 0.3491 * C + 1.1783 * H - 0.1034 * O - 0.0151 * N + 0.1005 * S - 0.0211 * ASH$	M-25	

HHV = 0.3516*C + 1.16225*H -0.1109*O + 0.0628*N + 0.10465*S	M-26	
HHV = 0.3443*C + 1.192*H - 0.113*O - 0.024*N +0.093*S		
	M-27	
HHV = 19.914 - 0.2324*ASH	M-28	
HHV = 0.3536* FC + 0.1559*VM - 0.0078*ASH	M-29	
HHV = 0.3259*C +3.4597	M-30	
HHV = -1.3675 + 0.3137*C + 0.7009*H + 0.03180	M-31	
HHV = 0.00355*C^2 - 0.232*C - 2.23*H + 0.0512*C*H + 0.131*N + 20.6	M-32	(Oliveira et al., 2023)
HHV = 0.3543*FC + 0.1708*VM	M-33	
HHV = 35.43 - 0.1835*VM -0.3543*ASH	M-34	
HHV = -10.8141 + 0.3133*(VM + FC)	M-35	
HHV = -0.763+ 0.301*C + 0.525*H + 0.064*O	M-36	
HHV = 0.4373*C - 1.6701	M-37	
HHV = 0.2949*C + 0.825*H	M-38	

Nota. Fuente los autores 2024

C: carbono (% en peso en base seca); **H:** hidrógeno (% en peso en base seca); **N:** nitrógeno (% en peso en base seca); **S:** azufre (% en peso en base seca); **O:** oxígeno (% en peso en base seca); **FC:** carbono fijo (% en peso en base seca); **VM:** materia volátil (% en peso base seca); **ASH:** Ceniza (% en peso base seca).

2.3.5. Definición y operacionalización de variables

El proyecto de investigación plantea determinar el poder calorífico superior a partir del análisis proximal de los residuos agroindustriales de la región Lambayeque y Cajamarca, en el cual examinaremos las siguientes variables:

Tabla 5*Descripción de variables utilizadas en el bioproceso*

Variable	Definición	Dimensión	Indicador	Índice	Técnicas/Instrumento de recolección de datos
Variable independiente (observada): Análisis proximal de la biomasa	Análisis fisicoquímicos como cenizas, materia volátil, carbono fijo	Análisis proximal	Cenizas, materia volátil, carbono fijo Carbono orgánico	%	Mufla, estufa, malla
Variable Dependiente: Poder calorífico superior de la biomasa.	Ecuación matemática que se alimenta de los valores obtenidos del análisis proximal.	Determinación del Poder Calorífico Superior.	Ecuación matemática	Kcal/Kg	Cálculo mediante software Polymat..

Nota. Elaborado por los autores.

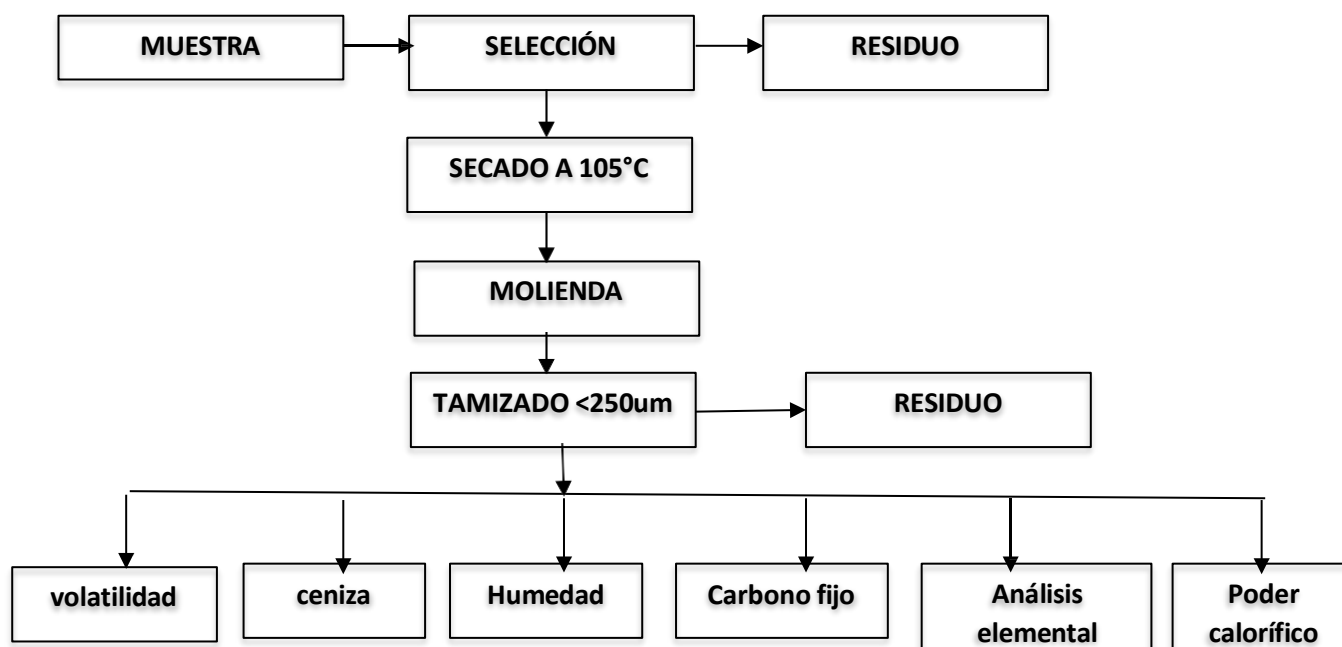
III. DISEÑO METODOLOGICO

3.1. Diseño de contrastación de hipótesis

El diseño a utilizar es al azar, esta investigación fue comprobada mediante el siguiente procedimiento: se recolectó muestras de residuos agroindustriales de las plantas procesadoras de la región Lambayeque y Cajamarca, los residuos pasaron por un proceso de trituración y tamizado. se extrajo una muestra representativa de cada uno que se analizó en laboratorios de investigación de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo; se evaluaron el poder calorífico superior, volatilidad, ceniza, humedad.

Figura 4

Diagrama de bloques el proceso de medición de Potencial Calorífico de la biomasa lignocelulósica.



Nota. Elaborado por los Autores, 2024.

3.1.1. Selección y pesado

Una vez adquiridas las muestras y ya en laboratorio se procedió a la selección, tratando de que no contenga residuos extra, luego se procedió a pesar 5kg de muestra bruta con la cual se procedió a trabajar.

3.1.2. Secado

Se procedió a secar la muestra en la estufa. Se dejó por 24 H a una temperatura de 105°C para reducir la mayor cantidad posible de humedad y así facilitar la molienda.

3.1.3. molienda

La muestra fue sometida a una trituración en molino de mano. Por la condición de la materia y siendo así lo más factible. Obteniendo una granulometría de malla # (20-200). Se realizó de 3 a 5 pasadas en el molino para aprovechar la mayor parte de la biomasa, como resultado se obtuvo el mayor peso de malla #60 la cantidad requerida para nuestro análisis con

el cual se trabajó; se realizó en estas condiciones las tres biomásas cascarilla de café, cascarilla de arroz y el bagazo de caña.

3.1.4. tamizado

En esta etapa de tamizado se usó el equipo de tamiz analítico de laboratorio que fue fabricado bajo la norma de ISO 3310/1, ISO 3310/2, ASTM E11 y ASTM E323, después de realizar el tamizado se tomó la muestra de la malla # 60. Obteniendo un peso de 512gm de cascarilla de arroz, 480gm de cascarilla de café y 450gm de bagazo de caña.

3.1.5. porcentaje de Humedad mediante la norma ASTM D3.173

Durante este método, para determinar la temperatura de las muestras se usó la estufa con una temperatura de 110°C (Hasta verificar la masa constante). También se verificó la eficiencia del equipo. Para este cálculo se realizó en base seca para todas las muestras.

- Procedimiento detallado

- Primer lugar se procedió a eliminar impurezas de la superficie de los crisoles y la humedad. permanecer con sus tapas en la estufa a 110°C por 1 hora. Después se colocó el crisol en el desecador por 30 minutos, hasta alcanzar la temperatura ambiente, luego se procedió a pesar.

- Se adicionó al crisol (condicionados) la muestra de biomasa hasta el nivel de $\frac{3}{4}$ del crisol y luego se procedió a pesar, en seguida se puso en la estufa los crisoles tapados con la muestra por 2 horas a 110°C.

- Posteriormente se procedió a colocar el crisol tapado (con la muestra) en el desecador por 30 minutos.

- Y por último se procedió a pesar el crisol y colocar nuevamente en la estufa, hasta alcanzar una masa constante y Después se determinó la masa final.

- Procedimiento resumido.

Se dejó el crisol tapado (conteniendo la muestra) en la estufa a (104 a 110)°C, hasta alcanzar la masa constante. Después del secado, se dejó las muestras en el desecador, hasta que alcance la temperatura ambiente. Finalmente se usó la Ecuación 1.

Base Seca: $U_s = ((M_u - M_s) / M_s) \times 100$ (kg agua/kg material seco) Ec (1)

Base Humedad: $U_u = ((M_u - M_s) / M_u) \times 100$ (kg agua/kg material en las condiciones de operación)

Donde: M_u =masa inicial (g); M_s = masa seca o final

3.1.6. Determinación de porcentaje de material volátil. Mediante la norma ASTM D-3.175

El p% de material volátil se determinó acondicionando la muestra hasta 850°C en la mufla durante 6 minutos (verificar rampa/verificar masa). Bajo esta norma (ASTM D3.175), la fracción liberada de la muestra (en forma de gases) ocurre cuando es llevada a altas temperaturas. Por lo tanto, con las muestras (libre de humedad), es posible determinar el p% de volátiles.

Procedimiento:

El crisol con la muestra permaneció en el desecador hasta su uso en la mufla.

- la mufla fue condicionado hasta 850°C.
- El crisol tapado fue colocado (con la muestra) en la mufla por 6 min.
- Después finalizado el tiempo requerido, se retiró los crisoles y colocados tapados al aire libre hasta que alcance los 200°C.
- Luego, fueron colocados el crisol tapado en el desecador por 1 hora. - Después de enfriar el crisol, este fue pesado para determinar la masa final.
- El % de volátiles se determinó por la Ecuación 2:

$$\% \text{ Volátiles} = (m_1 - m_2) / m_1 \times 100 \dots \dots \dots \text{Ec (2)}$$

Donde: m_1 = masa de muestra inicial (g); m_2 = masa carbono + cenizas (final) al retirar de la mufla (g).

3.1.7. Determinación de porcentaje de ceniza. Mediante la norma ASTM D-3.174 E ASTM D1102-84 (MUFLA-550OC/750°C).

La fracción de cenizas se define como el residuo inorgánico que permanece después de la quema o consumo de la materia orgánica. El p% de cenizas se determinó condicionando la muestra hasta 750°C durante 2 horas (ASTM D-3.174).

Procedimiento:

- El crisol destapado (con la muestra sin humedad o en base seca) fueron colocados en la mufla fría. - Posteriormente, la mufla se condiciono hasta alcanzar los 750°C de forma lenta. -

Mantener la mufla en esa condición por 12 horas. Se Considero las siguientes recomendaciones, para a rampa de calentamiento (ver tabla 4):

Tabla 6

Rampa de Calentamiento-Determinación de cenizas

Temperatura (°C)	Tiempo de calentamiento (min)	Rampa de calentamiento (°C/min)
0 a 500 °C	60	Aprox 8
500 a 750 °C	60	Aprox 4

Nota. Elaborado por los autores, 2014

- Posteriormente se dejó en la mufla hasta que alcance una temperatura de 150°C

- Después, fueron colocados el crisol retirado de la mufla en el desecador. Se Verifico si la muestra alcanzó la temperatura ambiente. Para luego Finalmente determinar el p% de cenizas usando la ecuación 3

$$\text{P\% Cenizas} = (\text{mf/mis}) \times 100\% \dots\dots\dots \text{Ec (3)}$$

Donde: mf = masa final de cenizas (después de retirado de la mufla, g); mis= masa muestra inicial en base seca o libre de humedad, g

3.1.8. Determinación de carbón fijo

El Carbono fijo es la fracción restante después de la liberación de las sustancias volátiles y de la quema o consumo de la materia orgánica de la biomasa. Se determinado por la Ecuación 4:

$$\text{P\% Carbono Fijo} = ((m_2 - \text{mf}/\text{mis})) \times 100 \dots\dots\dots \text{Ec (4)}$$

Donde: m₂= masa carbono + cenizas (masa final del P% de volátiles) g; mf = masa de cenizas (masa retirada de la mufla del p% de cenizas) g; mis = masa inicial seca, g

3.1.9. Determinación de análisis elemental

Para la determinación del análisis elemental (CHONS), primeramente, se realizó la trituración en molino de mano de las muestras a trabajar, para obtener la granulometría requerida de tamaño de partícula #100 se realizó más de cuatro pasadas, en seguida se a condicione la muestra en bolsas ermiticas.

Para obtener los resultados del CHONS se envió 20gramos de cada muestra al “Laboratorio de Energías Renovable” de la Universidad Nacional Agraria la Molina. Para este análisis el laboratorio trabajo bajo la norma ASTM D5373, para el análisis realizaron con la muestra en base seca (la muestra fue secada en estufa a 105° C durante 24 horas.

realizaron el análisis por triplicado de cada muestra, obtuvieron los resultados aproximados y determinaron la desviación estándar (medida de la dispersión de los valores respecto a la media) de la muestra.

3.1.10. Determinación del poder calorífico superior (HHV)

Para determinar el HHV se determinó mediante fórmulas matemáticas, para estas fórmulas se usó los datos del análisis gravimétrico y análisis elemental, y por otro lado se solicitó a la Universidad Nacional Agraria la Molina el análisis HHV para poder hacer una comparación con los resultados de los modelos matemáticos.

El poder calorífico superior (PCS) —también conocido como higher heating value (HHV) o “valor calorífico bruto”— es la cantidad total de energía liberada cuando un combustible se quema completamente y todos los productos de combustión se enfrían hasta una temperatura de referencia (por ejemplo, 25 °C), de modo que el vapor de agua formado se condensa y el calor latente de condensación es recuperado. En otras palabras: en el PCS se incluye el calor liberado al condensar el vapor de agua que se genera durante la combustión.

Desde el punto de vista termodinámico, es equivalente a la entalpía estándar de combustión con los productos retornando a la temperatura de referencia y la condensación del agua.

El poder calorífico inferior (PCI) —también llamado lower heating value (LHV) o “valor calorífico neto”— es la cantidad de energía que efectivamente puede considerarse utilizable en muchas condiciones prácticas, al no considerar el calor latente de vaporización del agua formada. Es decir, asume que el vapor de agua resultante no se condensa y permanece en fase vapor al final del proceso.

3.1.11. Determinación del factor de emisión de gases

La combustión de carbón para la generación de electricidad es una práctica muy común en todo el mundo, pero también se considera una de las fuentes más importantes en la emisión de los gases y partículas respirables. Para determinar el factor de emisión de carbón, monóxido de carbono (CO), metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂), óxidos de nitrógeno (NO_x) y

dióxido de azufre (SO₂) se tomó en cuenta el análisis elemental con la ayuda de las siguientes ecuaciones (Zhang et al., 2015; Maj, 2018)

- Factor de emisión de carbón (Ec).

$$Ec = 0.88 * C \dots \dots \dots (5)$$

- Factor de emisión de CO (kg/kg).

$$CO = 0.06 * \frac{28}{12} * Ec \dots \dots \dots (6)$$

- Factor de emisión de CH₄ (kg/kg).

$$CH_4 = 0.005 * \frac{16}{12} * Ec \dots \dots \dots (7)$$

- Factor de emisión de CO₂ (kg/kg).

$$CO_2 = \frac{44}{12} * (Ec - \frac{12}{28} * CO - \frac{12}{16} CH_4 - 0.009 * \frac{26.4}{31.4}) \dots \dots \dots (8)$$

- Factor de emisión de NO_x (kg/kg).

$$NO_x = 0.122 * \frac{46}{14} * Ec * \frac{C}{N} \dots \dots \dots (9)$$

- Factor de emisión de SO₂ (kg/kg).

$$SO_2 = 0.02 * S * (1 - \gamma) \dots \dots \dots (10)$$

3.1.12. Determinación del índice de combustión

Para determinar el índice de combustión nos apoyamos en el análisis proximal termogravimétrico con la ayuda de las siguientes ecuaciones 11, 12 (Conag et al., 2017) y 13 índice de inflamabilidad (Adeleke et al., 2020; Gajera et al., 2023)

- Relación de combustión (RC).

$$RC = \frac{CF}{MV} \dots \dots \dots (11)$$

- Índice de combustibilidad (IC)KCal/KG.

$$IC = \frac{PCS}{RC} * (115 - ASH) * \frac{1}{105} \dots \dots \dots (12)$$

- Índice de inflamabilidad (Ii) Kcal/kg

$$Ii = \frac{PCS \left(\frac{Kcal}{kg} \right) - 81 * CF}{MV + Humedad} \dots \dots \dots (13)$$

3.2. Variables

Tabla 7

Clasificación del diseño.

VARIABLES	Niveles de Estudio
Variables Independientes (variable observada)	
Análisis proximal	Materia Volátil
	Cenizas
	Carbono fijo
	Carbono orgánico
Variables dependientes	
Poder calorífico superior (KJ/kg)	—

Nota. Se procesarán un total de 15 muestras. Elaborado por los Autores, 2024.

3.3. Población y muestra

3.3.1. Población

La población estuvo conformada por tres residuos de biomasas: cascarilla de arroz (IR43-NIR) obtenida del molino tropical S.A.C. (provincia de Chiclayo), bagazo de caña criolla (*Saccharum officinarum*) proveniente del caserío de Posquih (provincia San Pablo- Cajamarca) y la cascarilla de café (Catimoro y caturra) adquirida del distrito de Colasay (provincia de Jaén- Cajamarca).

3.3.2. Muestra

La muestra consistió en obtener 5kg de cada residuo de biomasa provenientes de diferentes lugares de la región Lambayeque y Cajamarca

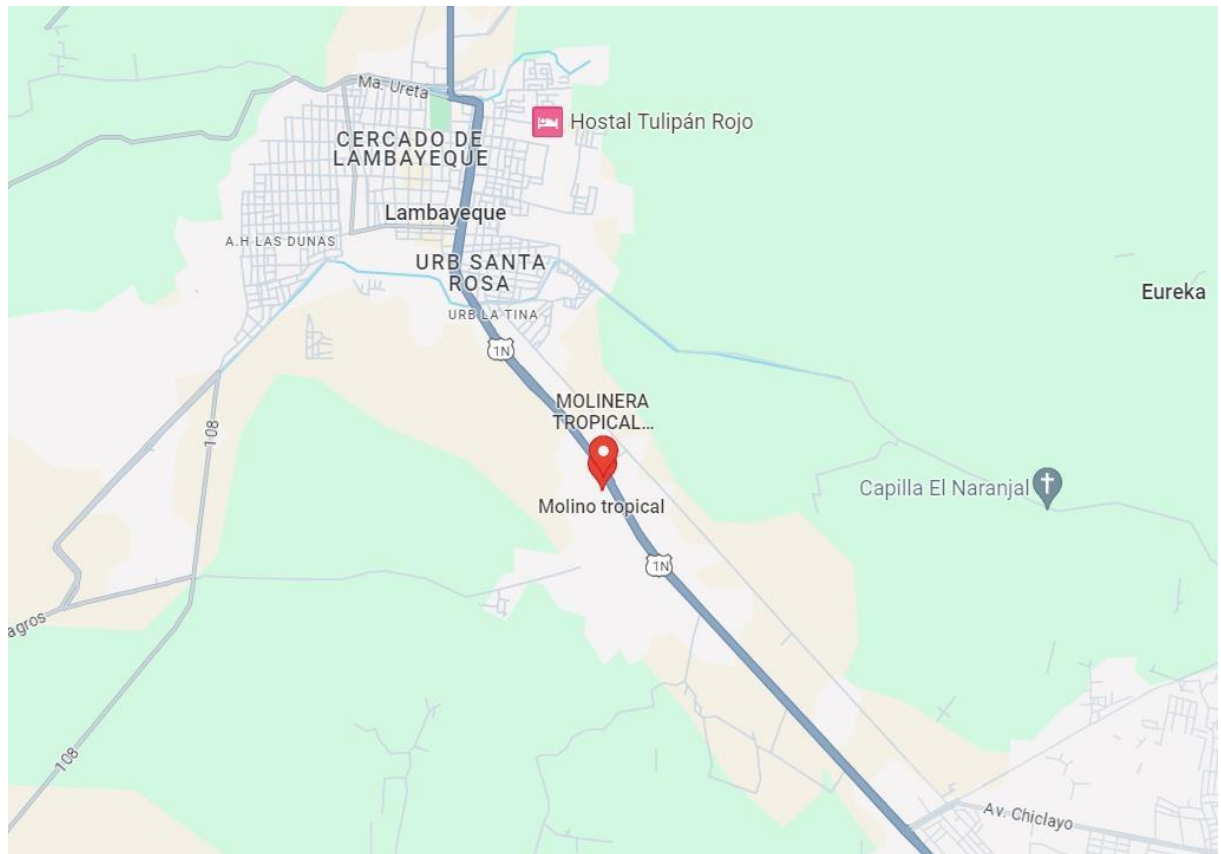
3.3.3. Lugar de muestreo y obtención de muestra

cascarilla de arroz

La cascarilla de arroz de la variedad (IR43-NIR) que se cultiva en nuestra región de Lambayeque fue facilitada por la industria molinera tropical S.A.C. Esta se encuentra ubicada en la carretera panamericana norte km 778.5 Lambayeque con una altitud de (-6.7198433S), una longitud (79.9172742,13.75z) y con un nivel de 19m.s.n.m (figura 4) luego fue trasladada a laboratorio de investigación de la facultad de ingeniería química e industrias alimentarias de la universidad nacional pedro Ruiz gallo. en donde se acondiciono la materia prima para su proceso.

Figura 5

Ubicación de la planta molinera tropical provincia de Lambayeque, región Lambayeque, 2023 (<https://www.google.com/maps/search/molineratropical/@-6.7198433,-79.9172742,13.75z>).



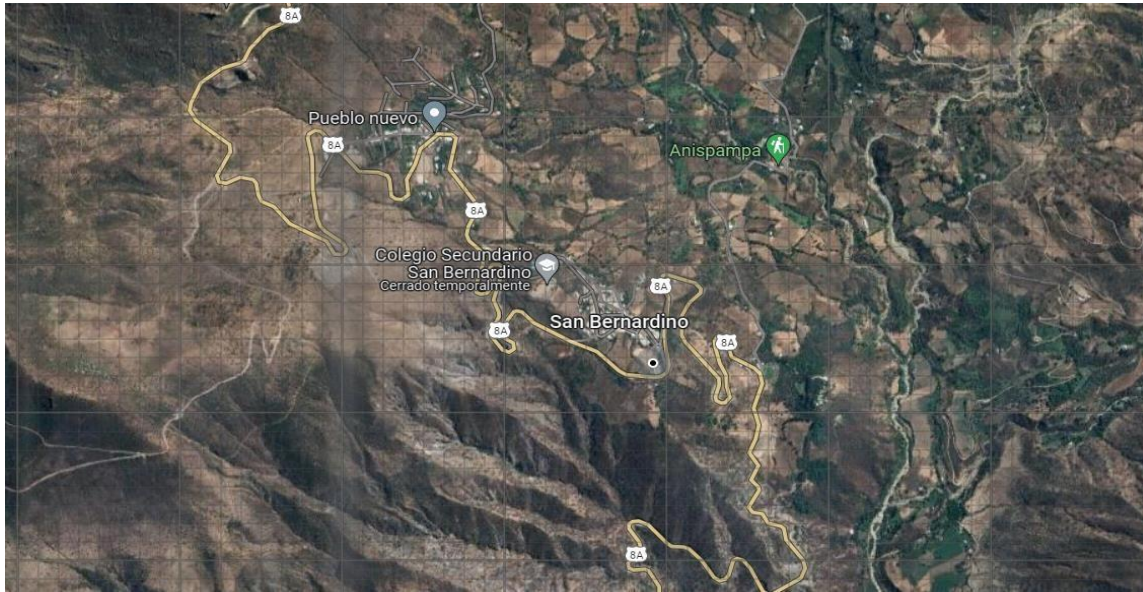
Nota. Elaborado por los autores 2024

Bagazo de caña.

El bagazo de la caña fue recolectado del distrito Sambernardino Que se encuentra ubicado a una latitud de -7.1687188S, longitud de 78.8381429,3328m " con un nivel de 1358 m.s.n.m (figura 5) Perteneciente a la variedad **caña criolla** (*Saccharum offinarum*), la muestra fue enviada por medio de encomienda a la provincia de Chiclayo departamento de Lambayeque, después de recoger la muestra se trasladó a las instalaciones del Laboratorio de Investigación de la facultad de ingeniería química e industrias alimentarias de la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo. en donde se acondiciono para su proceso.

Figura 6

Ubicación de Posquih distrito Sambernardino provincia San Pablo departamento Cajamarca, 2023(<https://www.google.com/maps/place/San+Bernardino+06445/@-7.1687188,-78.8381429,3328m>).



Nota. Elaborado por los autores 2024

Figura 7

Bagazo de Caña Ubicación de Posquih distrito Sambernardino provincia San Pablo departamento Cajamarca 2024



Nota. Elaborado por los autores 2024.

Cascarilla de café.

La cascarilla de café. fue facilitada por la empresa Aroma de Bomboca, que se encuentra ubicado (-5.9796573,-79.0773703,2806m) en el distrito de Colasay provincia de Jaén departamento Cajamarca (figura 6) Perteneciente a la variedad CATIMORO Y CATURRA. Se solicito 5kg de muestra bruta. La cual fue enviada en la agencia ángel divino a la ciudad de Chiclayo. Luego de recoger la muestra. se trasladó a las instalaciones del Laboratorio de Investigación de la facultad de ingeniería química e industrias alimentarias de la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo. en donde fue acondicionado para su proceso.

Figura 8

Ubicación del distrito de Colasay provincia de Jaén departamento Cajamarca, 2023(<https://www.google.com/maps/place/Colasay/@-5.9796573,-79.0773703,2806m> Nota. Elaborado por los autores 2024



3.4. Técnicas, instrumentos, equipos y materiales

Considerando los requerimientos necesarios en un bioproceso se tomarán en cuenta lo siguiente:

3.4.1 instrumentos

- Higrómetro
- Analizador termogravimétrico
- Especto fotómetro soluble

4.3.2 Equipos

- Estufa
- Mufla
- Balanza analítica
- Crisoles con tapa
- Embudo bushin
- Pipeta
- Matraces
- Desecadora
- Tamizadora
- Molino
- Pinza

3.4.2. Materiales

- Residuos orgánicos Agroindustriales
- Bagazo de caña
- Cascara de café
- Cascarilla de arroz
- Bolsas ermiticas

3.4.3. Reactivos

- hidróxido de sodio (NaOH)
- Ácido sulfúrico (H₂SO₄)
- Permanganato de potasio (KMnO₄)

Tabla 8*Caracterización de biomasa*

Análisis	Métodos
Granulometría – 60 mesh (molino cuchillos-willey)	
Elemental	
Carbono	ASTM.D6866
Hidrogeno	ASTM D5373/met.A (Thermo, mod Flash 2000)- 950°C (20ml/min)
Nitrógeno	ASTM E778-87
Azufre	ASTM D4239 (Leco-1350°C)
Proximal-Inmediata-termogravimétrico, otros	
Humedad	ASTM E1756 e ASTM E871; ASTM D3.173
Material Volátil	ASTM D7582; ASTM D-3.175 (Ate 850°C)
Cenizas	ASTM D7582; ASTM D1102; ASTM D-3.174 (MUFLA-550°C/750°C)
%carbono fijo	ASTMD3.173
Contenido Energético	
Poder Calórico Superior (PCS) / poder calorífico inferior.	ASTM D5865 (Bomba Calorimétrica) Parr-6400
	Mufla -
Conversión termoquímica-montagem reactor-carbonización.	Mufla -

Nota. Elaborado por los autores 2024

IV. RESULTADOS

4.1. Determinación de humedad en las muestras trabajadas.

4.1.1. Determinación de humedad en el bagazo de caña en base seca.

En el análisis se determinó el porcentaje humedad del bagazo de caña, se realizaron 3 repeticiones obteniendo los siguientes resultados.

Tabla 9

Porcentaje de humedad en bagazo

N°	Masa inicial (MI)	Masa final (MF)	Us%	PM
1	5.0102	4.7714	5.00482	
2	5.0102	4.7713	5.00702	5.00775
3	5.0102	4.7711	5.01142	

Nota. Elaborado por los autores 2024

En la Tabla 9 podemos observar el resultado promedio obtenido humedad es de 5.00775%

4.1.2. Determinación de humedad de la cascarilla de café en base seca.

En el análisis se determinó el porcentaje humedad de la cascarilla de café, se realizaron 3 repeticiones obteniendo los siguientes resultados.

Tabla 10

Porcentaje de humedad de cascarilla de café

N°	Masa inicial (Mi)	Masa final (Mf)	Us%	PM
1	5.0034	4.802	4.19409	
2	5.0034	4.8025	4.18324	4.1883
3	5.0034	4.8023	4.18758	

Nota. Elaborado por los autores 2024

En la Tabla 10 podemos observar el resultado promedio humedad de 4.1883%

4.1.3. Determinación de humedad de la cascarilla de arroz en base seca.

En el análisis se determinó el porcentaje humedad de la cascarilla de arroz, se realizaron 3 repeticiones obteniendo los siguientes resultados.

Tabla 11

Porcentaje de humedad de cascarilla de arroz

N°	Masa inicial (Mi)	Masa final (Mf)	Us%	PM
1	5.0053	4.7595	5.16441	4.75950
2	5.0053	4.7594	5.16662	
3	5.0053	4.7596	5.1622	

Nota. Elaborado por los autores 2024

En la Tabla 11 podemos observar el resultado promedio humedad obteniendo de 4.75950%

4.1.4. Cuadro resumen del porcentaje de humedad de la biomasa lignocelulósica.

Tabla 12

Porcentaje promedio de los compuestos lignocelulósicos

Compuesto	Masa inicial (Mi)	Masa final (Mf)	PM-Us%
Cascarilla de café	5.0034	4.8022	4.1883
Cascarilla de arroz	5.0053	4.7595	4.75950
Bagazo de caña	5.0102	4.7712	5.00775

Nota. Elaborado por los autores 2024

4.2. Determinación de materia volátil en las muestras trabajadas.

4.2.1. Determinación de materia volátil en el bagazo de caña en base seca.

En el análisis se determinó el porcentaje de materia volátil del bagazo de caña, se realizaron 3 repeticiones obteniendo los siguientes resultados.

Tabla 13

Porcentaje de volatilidad del bagazo caña

N°	Masa inicial (Mi)	Masa final (Mf)	Mv%	PM
1	2	0.3974	80.130	80.13167
2	2	0.3972	80.140	
3	2	0.3975	80.125	

Nota. Elaborado por los autores 2024

En la Tabla 13 podemos observar el resultado promedio de la materia volátil del bagazo de caña obteniendo de 80.13167%

4.2.2. Determinación de materia volátil en la cascarilla de café en base seca.

En el análisis se determinó el porcentaje de materia volátil de la cascarilla de café, donde se realizaron 3 repeticiones obteniendo los siguientes resultados.

Tabla 14

Porcentaje de la volatilidad cascarilla de café

N°	Masa inicial (Mi)	Masa final (Mf)	Mv%	PM
1	2	0.3997	80.015	
2	2	0.3996	80.020	80.02000
3	2	0.3995	80.025	

Nota. Elaborado por los autores 2024

En la Tabla 14 podemos observar el resultado promedio de la materia volátil del café obteniendo un resultado de 80.02000%

4.2.3. Determinación de materia volátil en la cascarilla de arroz en base seca.

En el análisis se determinó el porcentaje de materia volátil de la cascarilla de arroz, donde se realizaron 3 repeticiones obteniendo los siguientes resultados.

Tabla 15

Porcentaje de volatilidad de cascarilla de arroz

N°	Masa inicial (Mi)	Masa final (mf)	Mv%	PM
1	2	0.6719	66.405	
2	2	0.6712	66.440	66.42667
3	2	0.6713	66.435	

Nota. Elaborado por los autores 2024

En la Tabla 15 podemos observar el resultado promedio de las tres repeticiones de volatilidad de cascarilla de arroz obteniendo un resultado de 66.42667%

4.2.4. Cuadro resumen de material volátil de la biomasa lignocelulósico base seca.

Tabla 16

Porcentaje promedio de volatilidad los compuestos lignocelulósicos

Nº	Masa inicial (Mf)	Masa final (mf)	PM-Mv%
Cascarilla de café	2	0.3996	80.02000
Cascarilla de arroz	2	0.6712	66.42667
Bagazo de caña	2	0.3974	80.13167

Nota. Elaborado por los autores 2024

4.3. Determinación de ceniza en las muestras trabajadas.

4.3.1. Determinación de ceniza en el bagazo de caña en base seca.

En el análisis se determinó el porcentaje de ceniza del bagazo de caña, donde se realizaron 3 repeticiones obteniendo los siguientes resultados.

Tabla 17

Porcentaje de ceniza del bagazo de caña

Nº	Masa final (Mf)	Masa inicial (Mi)	Cs%	PM
1	0.06	3.0024	1.99840	1.97842
2	0.0594	3.0024	1.97842	
3	0.0588	3.0024	1.95843	

Nota. Elaborado por los autores 2024

En la Tabla 17 podemos observar el resultado promedio de las tres repeticiones de ceniza de bagazo obteniendo un resultado de 1.97842%

4.3.2. Determinación de ceniza en la cascarilla de café en base seca.

En el análisis se determinó el porcentaje de ceniza de la cascarilla de café, donde se realizaron 3 repeticiones obteniendo los siguientes resultados.

Tabla 18

Porcentaje de ceniza de cascarilla de café

Nº	Masa final (Mf)	Masa inicial (Mi)	Cs%	PM
1	0.0307	3.006	1.02129	1.03127
2	0.0305	3.006	1.01464	
3	0.0318	3.006	1.05788	

Nota. Elaborado por los autores 2024

En la Tabla 18 podemos observar el resultado promedio de las tres repeticiones de ceniza de cascarilla de café obteniendo un resultado de 1.03127%

4.3.3. Determinación de ceniza en la cascarilla de arroz en base seca.

En el análisis se determinó el porcentaje de ceniza de la cascarilla de arroz, donde se realizaron 3 repeticiones obteniendo los siguientes resultados.

Tabla 19

Porcentaje de ceniza en la cascarilla de arroz

N°	Masa final (Mf)	Masa inicial (Mi)	Cs%	PM
1	0.4643	3.0097	15.42679	
2	0.4638	3.0097	15.41017	15.43122
3	0.4652	3.0097	15.45669	

Nota. Elaborado por los autores 2024

En la Tabla 19 podemos observar el resultado promedio de las tres repeticiones de ceniza de cascarilla de arroz obteniendo un resultado de 15.43122%

4.3.4. Cuadro resumen de ceniza de la biomasa lignocelulósico base seca.

Tabla 20

Porcentaje promedio de ceniza los compuestos lignocelulósicos

N°	Masa inicial (Mf)	Masa final (mf)	PM-Cs%
Cascarilla de café	3.006	0.0310	1.03127
Cascarilla de arroz	3.0097	0.4644	15.43122
Bagazo de caña	3.0024	0.0594	1.97842

Nota. Elaborado por los autores 2024

4.4. Determinación de carbono fijo de la biomasa lignocelulósico

Se determino mediante la siguiente formula: $CF = 100 - (MV + H + ASH)$

Tabla 21*Cálculo del porcentaje de carbono fijo*

BIOMASA	CONTENIDO DE HUMEDAD (H) %	MATERIA VOLATIL(MV) %	CENIZA (ASH) %	CARBON FIJO (CF) %
ARROZ	5.16441	66.405	15.42679	13.00381
ARROZ	5.16662	66.44	15.41017	12.98321
ARROZ	5.16220	66.435	15.45669	12.94611
BAGAZO	5.00482	80.130	1.99840	12.86678
BAGAZO	5.00702	80.140	1.97842	12.87456
BAGAZO	5.01142	80.125	1.95843	12.90514
CAFÉ	4.19409	80.015	1.02129	14.76962
CAFÉ	4.18324	80.02	1.01464	14.78212
CAFÉ	4.18758	80.025	1.05788	14.72954

Nota. Elaborado por los autores 2024**4.5. Determinación análisis elemental****4.5.1. de cascarilla de arroz**

En el análisis se determinó la cantidad de CARBONO, HIDROGENO, NITROGENO, OXIGENO Y ASUFRE, que contiene la cascarilla de arroz

Tabla 22*Porcentaje de Carbono, Hidrogeno, Nitrógeno, Oxígeno y Azufre de la cascarilla de arroz*

N. Laboratorio	Compuesto	C (%)	H (%)	N (%)	O (%)	S (%)
UBE-(01/2024)-0004	ARROZ	44.38	6.52	0.4	48.678	0.022
UBE-(01/2024)-0004	ARROZ	44.66	6.28	0.41	48.628	0.022
UBE-(01/2024)-0004	ARROZ	44.51	6.03	0.41	49.028	0.022

Nota. Elaborado por los autores 2024**4.5.2. Determinación análisis elemental de cascarilla de café**

En el análisis se determinó la cantidad de CARBONO, HIDROGENO, NITROGENO, OXIGENO Y AZUFRE, que contiene la cascarilla de café

Tabla 23

Porcentaje de Carbono, Hidrogeno, Nitrógeno, Oxígeno y Azufre. De la cascarilla de café.

N. Laboratorio	compuesto	C (%)	H (%)	N (%)	O (%)	S (%)
UBE-(01/2024)-0004	CAFÉ	53.89	7.44	1.19	37.457	0.023
UBE-(01/2024)-0004	CAFÉ	54.2	7.38	1.2	37.197	0.023
UBE-(01/2024)-0004	CAFÉ	54.03	7.41	1.2	37.337	0.023

Nota. Elaborado por los autores 2024

4.5.3. Determinación análisis elemental del bagazo de caña

En el análisis se determinó la cantidad de CARBONO, HIDROGENO, NITROGENO, OXIGENO Y AZUFRE, que contiene el bagazo de caña

Tabla 24

Porcentaje de Carbono, Hidrogeno, Nitrógeno, Oxígeno y Azufre. Del bagazo de caña

N. Laboratorio	compuesto	C (%)	H (%)	N (%)	O (%)	S (%)
UBE-(01/2024)-0004	BAGAZO	49.76	7.27	0.3	42.648	0.022
UBE-(01/2024)-0004	BAGAZO	49.8	7.42	0.29	42.468	0.022
UBE-(01/2024)-0004	BAGAZO	49.78	7.33	0.3	42.568	0.022

Nota. Elaborado por los autores 2024

4.5.4. Cuadro resumen del análisis elemental de biomasa lignocelulósico en estudio

Tabla 25

Determinación del promedio del análisis elemental de los residuos lignocelulósicos

N. LABORATORIO	Biomasa	C (%)	H (%)	N (%)	O (%)	S (%)
UBE-(01/2024)-0004	CAFÉ	54.04	7.41	1.197	37.330	0.023
UBE-(01/2024)-0004	BAGAZO	49.78	7.34	0.297	42.561	0.022
UBE-(01/2024)-0004	ARROZ	44.52	6.28	0.407	48.778	0.022

Nota. Elaborado por los autores 2024.

Tabla 26

Resumen de los resultados del análisis proximal, elemental y poder calorífico superior de los diferentes tipos de biomasa.

Biomasa	ANALISIS GRAVIMETRICO				ANALISIS ELEMENTAL					HHV experimental		
	Humedad (%)	Material Volátil (%)	Ceniza (%)	carbón Fijo (%)	Carbono (%)	Hidrogeno (%)	Nitrógeno (%)	Oxigeno (%)	Azufre (%)	MJ/KG	Kcal/kg	
Biomosas procedentes de las regiones del Perú												
Cascarilla De Arroz	5.164	66.405	15.427	13.004	44.38	6.52	0.4	48.678	0.022	15.4	3678.78	
	5.167	66.44	15.410	12.983	44.66	6.28	0.41	48.628	0.022			
	5.162	66.435	15.457	12.946	44.51	6.03	0.41	49.028	0.022			
Bagazo de Caña	5.005	80.13	1.998	12.867	49.76	7.27	0.3	42.648	0.022	17.81	4253.680	
	5.007	80.14	1.978	12.875	49.8	7.42	0.29	42.468	0.022			
	5.011	80.125	1.958	12.905	49.78	7.33	0.3	42.568	0.022			
Cascarilla de Café	4.194	80.015	1.021	14.770	53.89	7.44	1.19	37.457	0.023	18.51	4421.05	
	4.183	80.02	1.015	14.782	54.2	7.38	1.2	37.197	0.023			
	4.188	80.025	1.058	14.730	54.03	7.41	1.2	37.337	0.023			
biomasa reportados en la literatura										Referencia		
cascara de arroz		69.53	15.96	13.89						15.96	3812.709	(Hamza et al., 2023)
paja de arroz		67.44	15.84	15.28						15.84	3784.042	(Hamza et al., 2023)
maíz mazorca		75.1	18.22	20.7						18.22	4352.604	(Hamza et al., 2023)
astilla de madera		79.11	18.65	16.77						18.65	4455.327	(Hamza et al., 2023)
cascara de mani		74.22	17.97	22.45						17.97	4292.881	(Hamza et al., 2023)
cascara de coco		71.86	5.8	22.34						19.73	4713.330	(Hamza et al., 2023)
cascara de almendra		73.87	6.28	19.85						18.52	4424.271	(Hamza et al., 2023)
paja de trigo		77.12	6.87	16.01						15.84	3784.042	(Hamza et al., 2023)
bagazo de caña		84.15	2.12	13.73						17.23	4116.101	(Hamza et al., 2023)
residuos de café agotado (ecr)	47.1	40.4	0.9	11.6	50	6.7	2.5	39.9	0.9	22.3	5327.281	(Mukherjee et al., 2021)
cascarilla de café (ch)	2.7	77.7	1.7	17.9	48.5	5.9	2.8	42.2	0.6	18.3	4371.715	(Mukherjee et al., 2021)
Bambú	44.51	76.61	1.71	21.68	51.11	6.22	0.09	42.52	0.06	15.47	3695.652	(Nam et al., 2020)

Pulpa de yuca	15.13	85.12	1.12	13.76	45.53	7.11	0.03	47.29	0.04	17.51	4182.991	(Nam et al., 2020)
tallo de maíz	66.16	74.31	7.11	18.58	45.05	6.27	0.01	48.56	0.11	15.02	3588.151	(Nam et al., 2020)
mazorca de maíz	10.01	80.01	1.92	18.07	43.61	6.55	0.01	49.74	0.09	16.67	3982.322	(Nam et al., 2020)
Cáscara de arroz	9.53	66.17	16.21	17.62	48.89	6.22	0.09	44.72	0.08	13.68	3268.036	(Nam et al., 2020)
Paja de arroz	10.01	71.02	13.51	15.47	47.56	6.55	0.01	45.72	0.16	14.27	3408.982	(Nam et al., 2020)
Bagazo de caña de azúcar	10.21	74.98	7.91	17.11	49.3	6.55	0.02	43.88	0.25	15.76	3764.931	(Nam et al., 2020)
Astillas de madera de caucho	32.19	80.21	1.91	17.88	51.44	6.32	0.17	41.99	0.08	16.77	4006.211	(Nam et al., 2020)
Fibra de coco	12.29	68.12	3.45	28.43	53.11	6.22	0.01	40.55	0.11	13.91	3322.981	(Nam et al., 2020)
Aserrín	33.91	77.65	3.81	18.54	51.11	6.13	0.19	42.52	0.05	15.93	3805.542	(Nam et al., 2020)
cascarilla de café /623k biochar	4.62	24.09	9.8	66.11	69.96	3.58	3.58	22.58	0.24	26.7	6378.404	(Setter et al., 2020)
cascarilla de café /673k	4.77	19.46	9.82	70.71	72.94	3.32	3.32	20.55	0.11	27	6450.072	(Setter et al., 2020)
cascarilla de café /723k	6.04	17.21	10.46	72.33	74.22	3.06	3.06	20.07	0.14	26.9	6426.183	(Setter et al., 2020)
posos de café		62.8	1	36.2	68.7	6.3	3.2	16.2	0	33.96	8112.757	(Park et al., 2021)
Paja de trigo		65	13.5	23.5	45.5	5.1	1.8	34.1	0	17	4061.156	(Krishnan et al., 2018)
Paja de arroz		72.7	15.5	11.8	35.97	5.28	0.17	43.08	0	14.55	3476.350	(Krishnan et al., 2018)
hoja de caña de azúcar		77.4	7.7	14.9	39.75	5.55	0.17	46.82	0	17.41	4159.102	(Krishnan et al., 2018)
fibra de coco		66.58	3.72	29.7	50.29	5.05	0.45	39.63	0.16	20.05	4789.775	(Krishnan et al., 2018)

Nota. Elaborado por los autores 2024

De las tres biomásas estudiadas el más alto contenido en ceniza fue la cascarilla de arroz el cual tuvo un efecto negativo en el poder calorífico superior. Cabe resaltar que este residuo tiene el menor valor del HHV. El contenido de carbono fijo de la biomasa puede relacionarse fácilmente con el poder calorífico, ya que tiene un efecto positivo en el potencial energético de la biomasa; esto se puede observar en los residuos. El más alto HHV es de 33.96 MJ/kg con poder calorífico de 36.2% de la biomasa donde trabajo con posos de café (Park et al., 2021) mientras que (Setter et al., 2020) trabajo con rango de Temperaturas obteniendo un valor de carbón fijo el más alto de 72.33% y HHV de 26.9 MJ/kg.

4.6. Poder calorífico superior.

Para calcular el poder calorífico del bagazo de caña, cascarilla de arroz y cascarilla de café se trabajó con los datos obtenidos en la tabla 9 hasta la tabla 19.

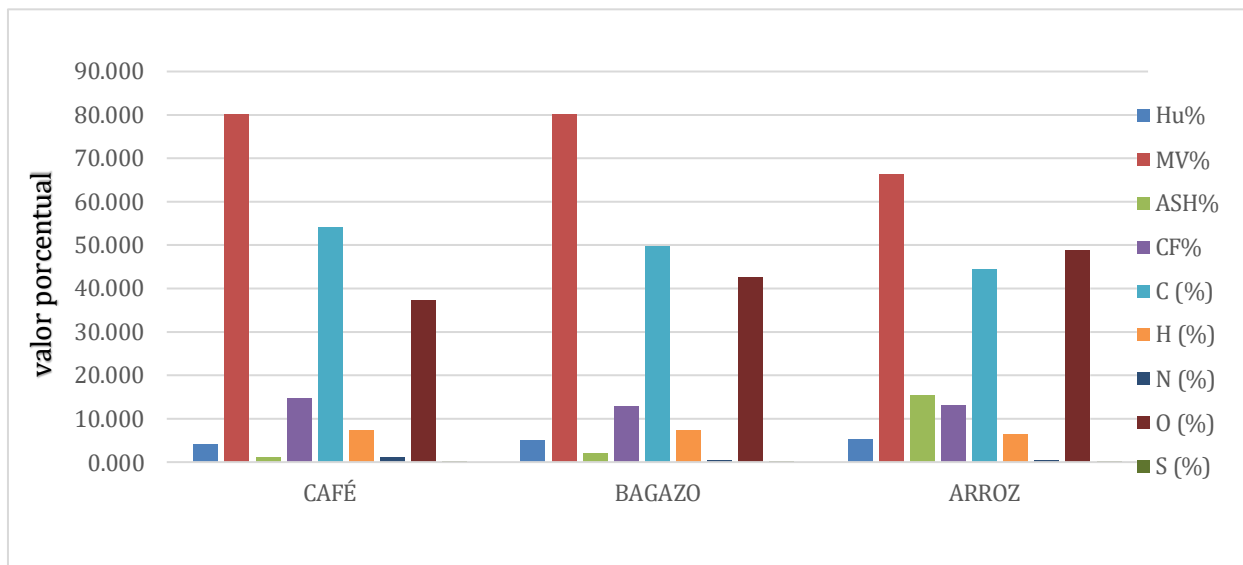
Tabla 27

Determinación del poder calorífico superior usando los datos de análisis proximal mediante modelos matemáticos.

Biomasa	HHV experimental (MJ/KG)	HHV Estimado MJ/kg																																					
		M-1	M-2	M-3	M-4	M-5	M-6	M-7	M-8	M-9	M-10	M-11	M-12	M-13	M-14	M-15	M-16	M-17	M-18	M-19	M-20	M-21	M-22	M-23	M-24	M-25	M-26	M-27	M-28	M-29	M-30	M-31	M-32	M-33	M-34	M-35	M-36	M-37	M-38
biomasas procedentes del Perú																																							
Pajilla De Arroz	15.4	15.93	14.06	16.14	18.08	17.71	14.06	18.08	14.13	14.83	15.07	12.69	16.43	17.70	17.92	18.50	17.49	17.97	18.46	16.92	18.24	19.13	18.67	18.47	17.67	17.81	17.81	17.54	16.33	14.83	17.92	17.16	17.62	15.95	17.78	14.06	19.13	17.74	18.47
		15.93	14.06	16.14	17.99	17.66	14.06	17.94	14.14	14.83	15.08	12.70	16.43	17.69	17.92	18.50	17.48	17.97	18.46	16.92	18.00	19.09	18.59	18.35	17.45	17.63	17.64	17.36	16.33	14.83	18.01	17.08	17.73	15.95	17.78	14.07	19.09	17.86	18.35
		15.92	14.05	16.13	17.73	17.44	14.05	17.60	14.13	14.81	15.07	12.69	16.42	17.69	17.91	18.49	17.48	17.96	18.45	16.91	17.53	18.94	18.38	18.10	17.02	17.24	17.25	16.96	16.32	14.81	17.97	16.85	17.66	15.93	17.76	14.06	18.94	17.79	18.10
Bagazo de Caña	17.810	18.51	16.35	18.85	20.47	20.15	16.35	21.22	19.52	17.03	18.08	18.12	18.35	17.67	17.90	17.92	17.97	18.01	18.72	17.94	21.92	20.76	20.69	20.67	21.43	21.48	21.24	20.97	19.45	17.03	19.68	19.37	20.19	18.24	20.02	18.32	20.76	20.09	20.67
		18.51	16.35	18.86	20.59	20.26	16.35	21.40	19.52	17.03	18.09	18.13	18.35	17.67	17.90	17.92	17.98	18.02	18.72	17.95	22.17	20.84	20.81	20.81	21.66	21.69	21.44	21.19	19.45	17.03	19.69	19.49	20.26	18.25	20.02	18.33	20.84	20.11	20.81
		18.52	16.36	18.87	20.52	20.20	16.36	21.30	19.53	17.04	18.09	18.13	18.36	17.68	17.90	17.92	17.98	18.03	18.73	17.95	22.02	20.79	20.74	20.73	21.53	21.57	21.32	21.06	19.46	17.04	19.68	19.42	20.22	18.26	20.03	18.33	20.79	20.10	20.73
Cascarilla de Café	18.51	18.97	17.08	19.17	22.48	21.85	17.08	23.10	19.78	17.69	18.55	18.63	18.70	18.04	18.24	18.20	18.35	18.67	18.95	18.23	24.23	21.76	21.94	22.03	23.59	23.67	23.52	23.16	19.68	17.69	21.02	20.78	22.50	18.90	20.39	18.88	21.76	21.90	22.03
		18.97	17.09	19.17	22.54	21.93	17.09	23.17	19.78	17.69	18.56	18.63	18.70	18.04	18.24	18.20	18.36	18.68	18.95	18.23	24.28	21.81	21.99	22.07	23.65	23.73	23.59	23.23	19.68	17.69	21.12	20.84	22.63	18.90	20.39	18.89	21.81	22.03	22.07
		18.96	17.07	19.15	22.51	21.89	17.07	23.13	19.77	17.68	18.54	18.62	18.69	18.03	18.23	18.20	18.35	18.64	18.94	18.22	24.25	21.78	21.96	22.05	23.61	23.69	23.55	23.19	19.67	17.68	21.07	20.81	22.56	18.89	20.37	18.87	21.78	21.96	22.05
biomasa reporta do en la literatura																																							
cascara de arroz	15.96	16.75	15.76	15.65			15.76		14.34	15.63	16.00	14.19	16.54	17.87	18.09	18.68	17.69	18.16	17.77	16.80									16.20	15.63	3.46			16.80	17.02	15.32			
paja de arroz	15.84	16.70	15.68	15.91			15.68		14.13	15.79	15.90	13.76	16.73	18.13	18.32	18.90	17.91	18.37	18.18	17.10									16.23	15.79	3.46			16.93	17.44	15.10			
maiz masorca	18.22	19.53	21.70	14.38			21.70		14.32	18.89	19.00	18.37	16.67	19.17	18.98	19.58	18.66	19.00	16.24	16.93									15.68	18.89	3.46			20.16	15.19	19.20			
astilla de madera	18.65	19.30	21.25	13.83			21.25		14.66	18.12	18.87	18.84	16.19	18.42	18.54	19.22	18.25	18.68	15.40	16.09									15.58	18.12	3.46			19.45	14.31	19.23			
cascara de mani	17.97	19.80	22.22	14.55			22.22		14.30	19.37	19.26	18.52	16.87	19.51	19.10	19.66	18.79	19.07	16.46	17.28									15.74	19.37	3.46			20.63	15.44	19.47			
cascara de coco	19.73	19.32	18.91	18.54			18.91		17.49	19.06	18.71	17.55	18.94	19.49	19.09	19.15	19.03	18.88	19.49	19.42									18.57	19.06	3.46			20.19	20.19	18.70			
cascara de almendra	18.52	19.08	18.47	18.19			18.47		17.59	18.49	18.51	17.64	18.62	19.01	18.90	19.02	18.84	18.75	19.00	18.95									18.45	18.49	3.46			19.65	19.65	18.55			
paja de trigo	15.84	18.73	17.81	17.67			17.81		17.79	17.63	18.23	17.83	18.12	18.27	18.44	18.63	18.38	18.37	18.26	18.21									18.32	17.63	3.46			18.84	18.84	18.36			
bagazo de caña	17.23	19.49	18.28	18.40			18.27		19.94	17.96	19.20	19.97	18.57	17.84	18.06	18.08	18.20	18.15	17.93	17.85									19.42	17.96	3.46			19.24	19.24	19.85			
residuos de café agotado (ecr)	22.30	10.62	1.00	23.32	28.87	20.15	1.00	21.35	15.32	10.39	8.94	1.93	19.38	17.43	17.64	17.63	17.14	18.18	26.51	19.28	21.62	20.36	20.28	20.27	20.90	21.26	21.19	20.72	19.70	10.39	19.75	19.05	20.41	11.01	27.70	5.48	20.36	20.19	20.27
cascarilla de café (ch)	18.30	19.31	17.97	19.20	25.26	19.09	17.97	19.51	19.32	18.43	18.85	18.60	19.14	18.64	18.69	18.64	18.78	18.80	19.25	18.76	19.63	19.63	19.32	19.17	18.99	19.50	19.47	18.95	19.52	18.43	19.27	18.01	19.56	19.61	20.57	19.14	19.63	19.54	19.17
Bambú	15.47	20.06	19.50	19.31	20.32	19.95	19.50	20.71	19.20	19.60	19.59	19.26	19.48	19.36	19.05	18.95	19.15	19.07	19.45	19.33	20.88	20.61	20.38	20.20	20.55	20.74	20.50	20.21	19.52	19.60	20.12	19.06	20.43	20.77	20.77	19.98	20.61	20.68	20.20
Pulpa de yuca	17.51	19.68	18.45	18.61	18.91	18.48	18.45	19.27	20.33	18.13	19.42	20.37	18.72	17.84	18.06	18.04	18.24	18.45	17.96	17.83	19.66	19.70	19.40	19.29	19.27	19.36	19.03	18.81	19.65	18.13	18.30	17.93	18.12	19.41	19.41	20.17	19.70	18.24	19.29
tallo de maíz	15.02	18.84	18.14	17.88	18.67	17.76	18.14	18.22	17.40	18.10	18.28	17.45	18.36	18.77	18.77	18.94	18.69	18.66	18.74	18.67	18.13	19.20	18.70	18.46	17.76	17.95	17.75	17.51	18.26	18.10	18.14	17.19	17.83	19.28	19.28	18.29	19.20	18.03	18.46
mazorca de maíz	16.67	19.80	18.94	18.89	18.23	17.42	18.94	17.88	19.52	18.85	19.41	19.57	19.08	18.67	18.71	18.67	18.83	18.78	18.76	18.66	17.89	18.99	18.49	18.26	17.57	17.77	17.44	17.21	19.47	18.85	17.67	16.94	17.25	20.07	20.07	19.91	18.99	17.40	18.26
Cáscara de arroz	13.68	17.05	16.48	15.93	19.73	19.14	16.48	19.78	13.88	16.42	16.22	13.93	16.91	18.58	18.66	19.22	18.24	18.66	18.34	17.39	19.85	20.08	19.75	19.55	19.31	19.44	19.47	19.20	16.15	16.42	19.39	18.36	19.45	17.54	17.54	15.44	20.08	19.71	19.55
Paja de arroz	14.27	17.43	16.62	16.25	20.19	18.87	16.62	19.65	15.20	16.44	16.74	15.24	17.07	18.17	18.35	18.83	18.05	18.37	18.01	17.46	19.75	19.92	19.60	19.43	19.23	19.32	19.28	19.03	16.77	16.44	18.96	18.17	18.94	17.61	17.61	16.28	19.92	19.13	19.43
Bagazo de caña de azúcar	15.76	18.60	17.80	17.57	21.58	19.51	17.80	20.48	17.25	17.68	18.04	17.29	18.08	18.49	18.59	18.81	18.49	18.51	18.45	18.36	20.59	20.32	20.08	19.94	20.13	20.25	20.11	19.85	18.08	17.68	19.53	18.72	19.72	18.87	18.87	18.04	20.32	19.89	19.94
Astillas de madera de caucho																																							

Figura 9

Valor encontrado de humedad, material volátil, ceniza, carbón fijo, carbón, hidrogeno, nitrógeno, oxígeno y azufre

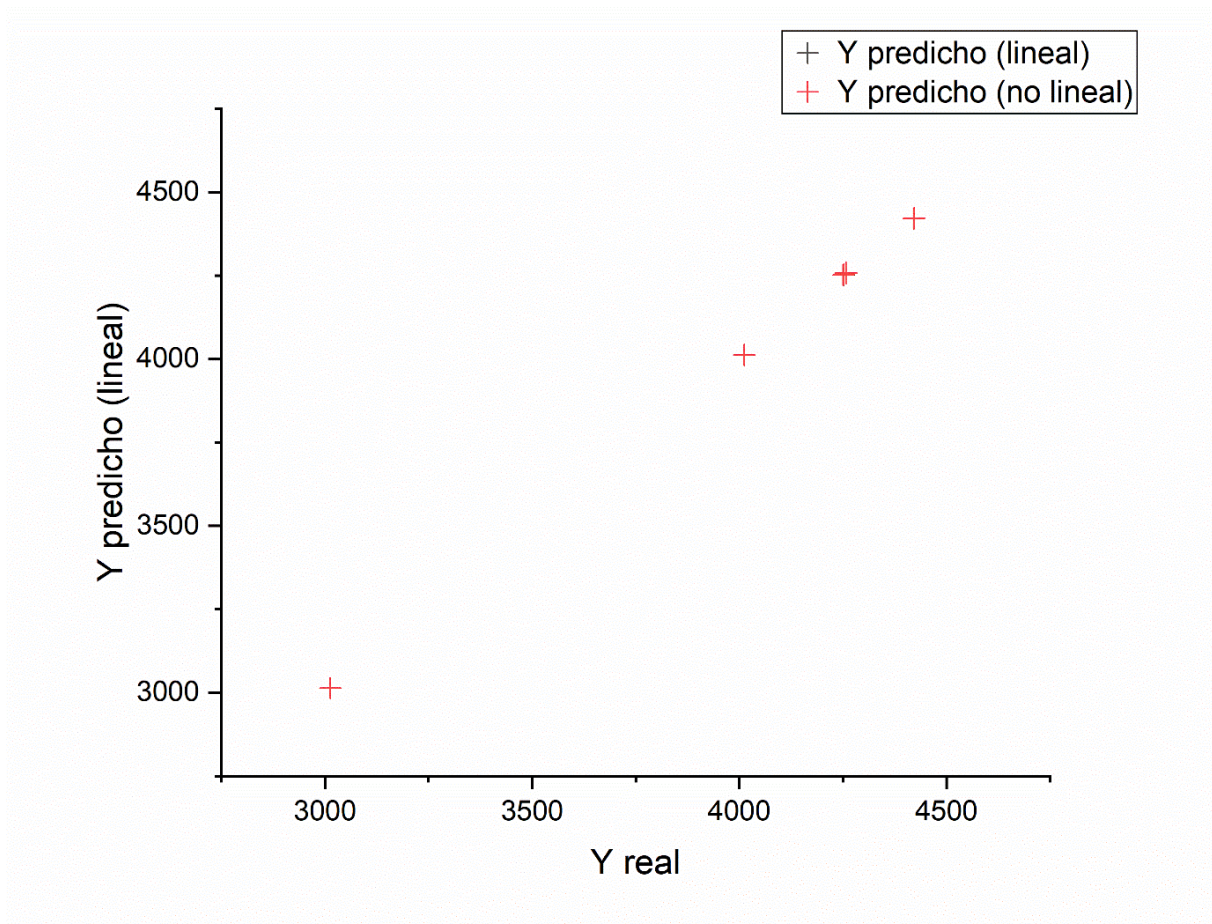


Nota. Elaborado por los autores 2024

De los tres compuestos estudiados el porcentaje de ceniza en el arroz fue el más alto con un resultado de 15.431% y el menor porcentaje se obtuvo del café con 1.031%. con respecto al Nitrógeno y Azufre el arroz tubo la menor cantidad obteniendo el valor de 0.2967% y 0.022%. figura 9

Figura 10

Valor calorífico experimental y previsto de la biomasa utilizando modelos matemáticos.



Nota. Elaborado por los autores 2024

4.7. Emisión de gases

Tabla 28

Factor de emisiones de los gases de la Biomasa

BIOMASA	Factores de emisión de gases KG/KG						Índices de emisión por unidad de energía KG/KCAL					
	Carbón	CO	CO2	CH4	NOX	SO2	Carbón	CO	CO2	CH4	NOX	SO2
Pajilla de arroz	39.0544	5.4676	129.0904	0.2604	0.1411	0.0004	0.010616	0.001486	0.035091	0.000071	0.000038	0.000000
	39.3008	5.5021	129.9051	0.2620	0.1446	0.0004	0.010683	0.001496	0.035312	0.000071	0.000039	0.000000
	39.1688	5.4836	129.4687	0.2611	0.1446	0.0004	0.010647	0.001491	0.035193	0.000071	0.000039	0.000000
promedio	39.1747	5.4845	129.4881	0.2612	0.1435	0.0004	0.0106	0.0015	0.0352	0.0001	0.0000	0.0000
Bagazo de caña	43.7888	6.1304	144.7429	0.2919	0.1058	0.0004	0.010294	0.001441	0.034028	0.000069	0.000025	0.000000
	43.8240	6.1354	144.8593	0.2922	0.1023	0.0004	0.010303	0.001442	0.034055	0.000069	0.000024	0.000000
	43.8064	6.1329	144.8011	0.2920	0.1058	0.0004	0.010298	0.001442	0.034041	0.000069	0.000025	0.000000
promedio	43.8064	6.1329	144.8011	0.2920	0.1047	0.0004	0.0103	0.0014	0.0340	0.0001	0.0000	0.0000
Cascarilla de café	47.4232	6.6392	156.7586	0.3162	0.4198	0.0005	0.010727	0.001502	0.035457	0.000072	0.000095	0.000000
	47.6960	6.6774	157.6605	0.3180	0.4233	0.0005	0.010788	0.001510	0.035661	0.000072	0.000096	0.000000
	47.5464	6.6565	157.1659	0.3170	0.4233	0.0005	0.010755	0.001506	0.035549	0.000072	0.000096	0.000000
promedio	47.5552	6.6577	157.1950	0.3170	0.4221	0.0005	0.0108	0.0015	0.0356	0.0001	0.0001	0.0000

Nota. Elaborado por los autores 2024

En la tabla 28 podemos observar que en las tres biomásas estudiadas se puede observar que para el monóxido de carbono fueron similares mientras que para el dióxido de carbono la tasa de emisión fue registrado del café con un promedio de 157.195 kg/kg y la más baja fue de cascarilla de arroz con un valor promedio de 129.488 kg /kg. y una baja cantidad de emisión de dióxido de azufre.

4.8. Índices de combustión

Tabla 29

Índice de combustibilidad de la Biomasa

BIOMASA	Determinación de índice de combustión Kcal/kg		
	RC	IC	Ii
	0.1958	17815.0631	36.6843
Pajilla de arroz	0.1954	17855.7083	36.6885
	0.1949	17897.1630	36.7353
promedio	0.1954	17855.9781	36.7027
	0.1606	28509.2261	37.7222
Bagazo de caña	0.1607	28500.5860	37.7094
	0.1611	28432.7508	37.6850
promedio	0.1608	28480.8543	37.7055
	0.1846	25999.3116	38.2941
Cascarilla de café	0.1847	25980.4637	38.2847
	0.1841	26064.9524	38.3311
promedio	0.1845	26014.9092	38.3033

Nota. Elaborado por los autores 2024

En la tabla 29, Relación de Combustión RC, índice de combustible (IC) y índice de inflamabilidad (Ii); se observamos que el mayor índice de combustibilidad tiene el bagazo de caña seguido de la cascarilla de café y cascarilla de arroz. Con respecto al índice de inflamabilidad las tres biomazas son casi semejantes, difieren en una o dos unidades. Se calculo mediante la siguiente fórmula

$$Ii = \frac{PCS \left(\frac{Kcal}{kg} \right) - 81 * CF}{MV + Humedad} \quad RC = \frac{CF}{MV} \quad IC = \frac{PCS}{RC} * (115 - ASH) * \frac{1}{105}$$

Modelamiento matemático

Los datos experimentales obtenidos de análisis proximal y análisis elemental de las tres biomásas estudiadas permitieron obtener dos modelos matemáticos, el primero de ellos es considerando los 9 análisis realizados (proximales y análisis elemental) y en el segundo solo se consideró el análisis proximal

Modelo matemático lineal

$$\text{NHV} = -8851038.8120 + 367785.1130 \cdot [\text{H}] + 317477.0457 \cdot [\text{MV}] + 317443.9480 \cdot [\text{Ash}] + 321191.6940 \cdot [\text{CF}] + -240453.9491 \cdot [\text{C}]$$
$$.+ -244803.9580 \cdot [\text{H}] + -261046.2283 \cdot [\text{N}] + -242196.2867 \cdot [\text{O}] + 43649049.2517 \cdot [\text{S}]$$

Tabla 30

Modelo matemático lineal.

Modelo matemático lineal							
Muestra	Yreal	Y predicho	SSres	Sstot	R^2	Error Absoluto (%)	Desviación estándar
Cascarilla de Arroz	3012.98544	3012.9868	1.9289E-06	443282.3955	1.0000E+00	4.60951E-05	0.0014
	4011.66814	4011.6623	3.4083E-05	110814.5137		0.000145528	-0.0058
	4011.68642	4011.6916	2.6540E-05	110826.6842		0.000128416	0.0052
	3678.78	3678.78023	6.2552E-05	664923.5934		0.00010668	0.0056
Bagazo de Caña	4252.5963	4252.5833	1.6906E-04	1.165176321	9.9999E-01	3.05747E-04	-0.0130
	4250.6173	4250.6208	1.2235E-05	9.354014454		8.22891E-05	-0.0035
	4257.8136	4257.8217	6.5178E-05	17.121940550		0.000189611	0.0081
	4253.67573	4253.67527	2.4647E-04	27.64113133		0.000192549	0.0111
Cascarilla de Café	4421.406	4421.4006	2.9521E-05	0.126736	9.9973E-01	1.22886E-04	-0.0054
	4420.872	4420.8717	8.3985E-08	0.031684		6.55531E-06	-0.0003
	4420.872	4420.8766	2.1610E-05	0.031684		0.000105153	0.0046
	4421.05	4421.0496	5.12150E-05	0.190104		7.81981E-05	0.0051

Nota. Elaborado por los autores 2024

Modelo matemático no lineal

$$\text{NHV} = -3684776.0288 + -99124.6099 \cdot H + -2674.0933 \cdot \text{VM} + 118787.5003 \cdot \text{Ash} + 145445.2000 \cdot \text{FC} + 3227.9289 \cdot H^2 + 335.7151 \cdot \text{VM}^2 + -416.3962 \cdot \text{Ash}^2 + -2904.3951 \cdot \text{FC}^2 + 1618.8611 \cdot (H \cdot \text{VM}) + -4376.6275 \cdot (\text{Ash} \cdot \text{FC})$$

Tabla 31

Modelo matemático no lineal.

Modelo matemático no lineal							
Muestra	Yreal	Y predicho	SSres	SStot	R ²	Error Absoluto (%)	Desviación estandar
Cascarilla de Arroz	3012.98544	3013.0453	3.5790E-03	249341.783500	1.0000E+00	0.00198557	0.0598
	4011.66814	4011.7281	3.5896E-03	249341.783500		0.00149347	0.0599
	3512.32679	3512.3867	7.1686E-03	498683.567		0.00173952	0.0599
Bagazo de Caña	4252.5963	4252.6315	9.0642E-03	1.165176	9.9902E-01	0.002238774	0.0952
	4250.6173	4250.7125	9.0678E-03	9.354014		0.002240268	0.0952
	4257.8136	4257.9088	9.0590E-03	17.121941		0.002235386	0.0952
	4253.67573	4253.7509	2.7191E-02	27.64113133		0.002238142	0.1166
Cascarilla de Café	4421.406	4421.4997	8.7726E-03	0.126736	8.6151E-01	0.00211838	0.0937
	4420.872	4420.9657	8.7727E-03	0.031684		0.002118644	0.0937
	4420.872	4420.9657	8.7814E-03	0.031684		0.002119702	0.0937
	4421.05	4421.1437	2.63267E-02	0.190104		0.002118909	0.1147

Nota. Elaborado por los autores 202

V. DISCUSION

En el presente estudio se realizó un análisis proximal a tres residuos agroindustriales los cuales son el bagazo de caña de azúcar, las cascarillas de arroz y las cascarillas de café, el análisis proximal consiste en determinar el porcentaje de humedad, de materia volátil, de cenizas y del carbón fijo de estos tres tipos de residuos industriales. La humedad de los compuestos lignocelulósicos se determinó usando la norma ASTM D3.173 obteniendo que la humedad promedio del bagazo de caña, cascarillas de arroz y cascarillas de café fue de 5.00775 %, 4.75950 y 4.1883% respectivamente.

Estos datos se asemejan a lo obtenido por Mukherjee et al. (2020) quien obtuvo que la humedad de las cascarillas del café fue 2,7% en materia seca y difieren de Setter et al. (2020) quien en su estudio encontró que las cascarillas de café presentaron 9.06% de humedad, un valor un poco más alto, esta alta humedad de algunas materias primas puede afectar fuertemente los procesos termoquímicos, reduce la temperatura en el sistema, lo que resulta en la conversión incompleta de la materia prima y/o el contenido de la biomasa, la humedad superior al 10 % generalmente no se prefiere en el proceso de conversión termoquímica.

Nuestros datos respecto a la humedad del bagazo de caña de azúcar la cual presenta un porcentaje ligeramente mayor y cascarillas de arroz concuerdan con los de Nam et al. (2020) ya que obtuvo que el bagazo de caña de azúcar presentó una humedad de 10.21% y las cascarillas de arroz 9.53%, así como también concuerdan con los de El-Sayed (2019) quien determinó la humedad de polvo de cascarillas de arroz obteniendo un valor de 6,6 a 7%, este autor realizó el análisis siguiendo las normas ASTM; D3173-87 (2003), la alteración de estos valores es porque el contenido de humedad de la biomasa varía según el tipo, las condiciones de crecimiento y el momento de la cosecha, y en cuanto a la materia prima de biomasa, la humedad depende en gran medida de las condiciones de almacenamiento, Manals-Cutiño (2018) menciona que en el caso de la humedad y el contenido de carbono fijo no existe una tendencia definida, en cambio al disminuir el diámetro de partícula el contenido de materia volátil disminuye y el contenido de cenizas aumenta.

El porcentaje de la materia volátil se determinó mediante la norma ASTM D-3.175, obteniéndose que el porcentaje promedio del bagazo de caña, cascarilla de arroz y cascarilla de

café fue 80.13167 %, 66.42667 % y 80.02000 % respectivamente, estos resultados son similares a los obtenidos por diferentes autores como, Mukherjee et al. (2020) quien obtuvo que la materia volátil de las cascarillas del café fue 77.7% en materia seca, así como también coinciden con los obtenidos por Setter et al. (2020) quien en su estudio encontró que las cascarillas de café presentaron 77.09% de materia volátil y con Park et al. (2021) con la diferencia que este autor trabajó con posos de café gastados y obtuvo que la materia volátil de estos fue 83.3%, este valor fue ligeramente mayor a la de las cascarillas de café, estos desechos lignocelulósicos con un alto contenido de material volátil pueden eventualmente favorecer la producción de biopetróleo y gases.

Los resultados que se obtuvo en el presente estudio sobre la materia volátil del bagazo de caña de azúcar y de las cascarillas de arroz concuerdan con los de Nam et al. (2020) ya que obtuvo que el bagazo de caña de azúcar presentó una materia volátil de 74,98% y las cascarillas de arroz 66,17%, así como también concuerdan con los de El-Sayed (2019) quien determinó la materia volátil de polvo de cascarillas de arroz obteniendo un valor de 63.3–68.12%, este autor realizó el análisis siguiendo las normas ASTM D3175 (2007), estos tres tipos de residuos agroindustriales trabajadas presentan un alto contenido volátil esto podría resultar ventajoso para los procesos termoquímicos, ya que durante la etapa de descomposición, los volátiles se transforman instantáneamente en forma de gas, liberando una cantidad importante de energía química en muy poco tiempo mediante combustión directa o indirecta.

La determinación del porcentaje de cenizas se realizó siguiendo la norma ASTM D-3.174, obteniéndose el porcentaje promedio de cenizas del bagazo de caña, cascarilla de arroz y cascarilla de café fue de 1.97842 %, 15.43122 y 1.03127 % respectivamente, estos datos se asemejan a lo obtenido por Mukherjee et al. (2020) quien obtuvo que las cascarillas del café tenían un porcentaje de cenizas de 1.7% en materia seca, así como también se asemejan a lo obtenido por Setter et al. (2020) quien en su estudio encontró que las cascarillas de café presentaron 3.55% de cenizas, sin embargo difieren de los datos obtenidos por Park et al. (2021) con la diferencia que este autor trabajó con posos de café gastados y obtuvo que el porcentaje de cenizas de estos fue 15.3%, el contenido de cenizas de las cascarillas de café analizadas en este estudio fue relativamente bajo en comparación con otros desechos agrícolas como las cascarillas de arroz, esto hace que la cáscara de café sea favorable para la pirólisis, porque las altas concentraciones de cenizas no son deseables en la conversión termoquímica, ya que

reducen la velocidad de combustión y provocan incrustaciones, corrosión del reactor y formación de escoria.

Nuestros datos respecto al porcentaje de cenizas del bagazo de caña de azúcar difieren con los de Nam et al. (2020) ya que este obtuvo que el bagazo de caña de azúcar presentó un porcentaje de cenizas de 7.91%, sin embargo, concuerdan con los datos que se obtuvo respecto al porcentaje de cenizas de arroz, ya este autor obtuvo que las cascarillas de arroz presentan 16.21% de cenizas, un valor similar al obtenido en este estudio, así como también se asemeja con lo obtenido por El-Sayed (2019) quien determinó que el porcentaje del polvo de cascarillas de arroz presenta de 10.62 – 12.19% de cenizas, este autor realizó el análisis siguiendo las normas ASTM D3174-04 (2004). Las cascarillas de café y el bagazo de caña de azúcar presentan bajo contenido de cenizas a diferencia de las cascarillas de arroz, este bajo porcentaje de cenizas es deseable para procesos de conversión termoquímica ya que de lo contrario el alto contenido de cenizas en las muestras puede causar incrustaciones y problemas de eliminación.

El porcentaje promedio del carbón fijo del bagazo de caña, cascarilla de arroz y cascarilla de café fue de 12.88216 %, 12.99007 y 14.76042 % respectivamente, estos valores concuerdan por los de Mukherjee et al. (2020) quien obtuvo que las cascarillas del café tenían un porcentaje de carbón fijo de 17.9% en materia seca, así como también se asemejan a lo obtenido por Setter et al. (2020) quien en su estudio encontró que las cascarillas de café presentaron 19.36% de carbón fijo, y difiere de Park et al. (2021), este autor trabajó con posos de café gastados y obtuvo que el porcentaje de carbón fijo de estos fue de 1.5%, el porcentaje de carbono fijo está relacionado directamente con el poder calorífico, ya que el carbono es el principal componente energético en los combustibles sólidos, cuanto mayor sea el porcentaje de carbono fijo, mayor será la capacidad de la biomasa para liberar energía térmica al quemarse.

Los resultados respecto al carbón fijo del bagazo de caña de azúcar y cascarillas de arroz concuerdan con los de Nam et al. (2020) ya que este autor obtuvo que el bagazo de caña de azúcar presentó 17.11% de carbón fijo y las cascarillas de arroz 17.62%, así como también concuerdan con los de El-Sayed (2019) quien determinó que el porcentaje de carbón fijo de cascarillas de arroz fue de 14.26 a 17.91%, el carbón fijo es importante debido a que la energía química almacenada en la biomasa se puede representar según la proporción de carbono fijo y materia volátil. A medida que aumenta la proporción de carbono volátil/fijo, aumenta la energía disponible que la biomasa puede liberar.

Como parte de los resultados de la presente investigación se obtuvo la composición elemental de los residuos agroindustriales de bagazo, cascarilla de arroz y cascarilla de café, este análisis consistió en determinar la cantidad de carbono, hidrogeno, nitrógeno, azufre y oxígeno de estos tres tipos de residuos industriales.

El porcentaje de carbono de los tres residuos industriales se obtuvo mediante el método ASTM.D6866, el bagazo de caña presentaba 49.78% de carbono, la cascarilla de arroz 44.52% y la cascarilla de café 54.04 % de carbono. El porcentaje de hidrogeno de los tres residuos industriales se obtuvo mediante el método ASTM D5373, el bagazo de caña presentaba 7.34% de hidrogeno, la cascarilla de arroz 6.28% y la cascarilla de café 7.41%. El porcentaje de nitrógeno de los tres residuos industriales se obtuvieron mediante el método ASTM E778-87, el bagazo de caña presentaba 0.297% de nitrógeno, la cascarilla de arroz 0.407% y la cascarilla de café 1.197%. El porcentaje de oxígeno de los tres residuos industriales se obtuvo mediante el método ASTM D4239, el bagazo de caña presentaba 42.561% de oxígeno, la cascarilla de arroz 48.778% y la cascarilla de café 37.330%. El porcentaje de Azufre de los tres residuos industriales se obtuvo mediante el método ASTM D4239, el bagazo de caña presentaba 0.022% de azufre, la cascarilla de arroz 0.022% y la cascarilla de café 0.023%.

Estos resultados concordaron con los de la mayoría de los autores, coincidieron con los valores que obtuvo Mukherjee et al. (2020) quien obtuvo que las cascarillas del café tenían un porcentaje de 48.5% de carbono, 5,9% de hidrogeno; Setter et al. (2020) encontró que las cascarillas de café presentan 46.41% de carbono, 6.33% de hidrogeno, 2.66% de nitrógeno, 44.51 de oxígeno y 0.09% de azufre; con lo obtenido por Park et al. (2021), quien encontró que los pozos de café gastados presentan 54.2% de carbono, 7.0% de hidrogeno, 33.1% de oxígeno, 2.4% de nitrógeno y 0.0% de azufre; los resultados respecto a la composición del bagazo de caña de azúcar y cascarillas de arroz concuerdan con los de Nam et al. (2020) quien encontró que el bagazo de caña de azúcar presenta 49.3% de carbono, 6.55% de hidrogeno, 43.88% de oxígeno, 0.02 de nitrógeno y 0.25 de azufre, y las cascarillas de arroz presentaron 48.89% de carbono, 6.22% de hidrogeno, 44.72% de oxígeno, 0.09 de nitrógeno y 0.08 de azufre.

Los valores sobre la composición elemental de las cascarillas son similares a los valores obtenidos por de El-Sayed (2019) quien analizó la composición elemental del polvo de cascarillas de arroz y obtuvo que este presenta 38.87% de carbono, 5.92% de hidrogeno, 52.45% de oxígeno, 1.33% de nitrógeno y 0.43 de azufre, la cantidad de carbono, oxígeno e hidrógeno de los tres residuos agroindustriales indica su viabilidad para producir combustibles

y productos químicos ecológicos, además, los bajos contenidos de nitrógeno y azufre indican que habrá una producción relativamente baja de gases tóxicos como el NO. El carbono es el principal componente responsable del contenido energético de la biomasa. En la combustión, el carbono se oxida para formar dióxido de carbono (CO_2) y libera una cantidad significativa de energía. A mayor contenido de carbono, mayor será el poder calorífico de la biomasa.

Por otra parte, el hidrógeno también contribuye al poder calorífico de la biomasa. Durante la combustión, el hidrógeno se combina con oxígeno para formar vapor de agua (H_2O), liberando energía en el proceso. Aunque el hidrógeno tiene un menor impacto que el carbono en comparación con su cantidad en la biomasa, sigue siendo importante para el poder calorífico. Los otros tres elementos químicos tienen un impacto menos directo o más complejo en el poder calorífico, aunque el oxígeno es esencial para la combustión, su presencia en la biomasa generalmente no contribuye al poder calorífico de manera significativa, sin embargo, la presencia de oxígeno en el proceso de combustión es crucial para la oxidación de los otros elementos, el nitrógeno no contribuye al poder calorífico y suele ser inerte durante la combustión. Sin embargo, su presencia puede afectar la combustión y la formación de gases contaminantes como óxidos de nitrógeno (NO_x), pero no tiene un impacto directo en la energía liberada y el azufre puede contribuir a la formación de dióxido de azufre (SO_2) durante la combustión, lo cual no aporta energía. Aunque el azufre no contribuye al poder calorífico, su presencia puede tener efectos ambientales y de corrosión. En altas concentraciones, el azufre también puede afectar negativamente el proceso de combustión y la calidad del aire (Mukherjee et al., 2020; Setter et al., 2020; Park et al., 2021; Nam et al., 2020; El-Sayed, 2019).

Se obtuvo el poder calorífico de la biomasa de los residuos agroindustriales bagazo, cascarilla de arroz y cascarilla de café mediante diferentes modelos matemáticos, se utilizó 38 modelos matemáticos, los modelos matemáticos 22 modelos requieren de los valores de porcentaje de la humedad, de la materia volátil, de cenizas y de carbono fijo para que se pueda obtener el valor del poder calorífico de los residuos agroindustriales, mientras que los modelos 16 requieren de los valores de los porcentajes de carbono, hidrogeno, nitrógeno, azufre y oxígeno de los tres diferentes residuos industriales para calcular el valor del poder calorífico en MJ/KG

En el presente estudio se analizó tres residuos agroindustriales, de los cuales las cascarillas de café presentaron un mayor poder calorífico, seguido del bagazo de caña de azúcar

y de las cascarillas de arroz, esto concuerda con Mukherjee et al. (2020) quien obtuvo que el poder calorífico de la cascarilla del café fue de 4370.88 Kcal/kg, además concuerda en que las cascarillas de café presentaron un mayor poder calorífico en comparación con los valores caloríficos de los desechos agrícolas como la cáscara de arroz (3081.11 Kcal/kg), paja de trigo (3511.03 Kcal/kg), paja de soja (3917.07 Kcal/kg), paja de arroz (3558.8 Kcal/kg), y mazorca de maíz (3821.53 Kcal/kg), los altos valores caloríficos de ambos residuos de café son atribuibles a su menor contenido de cenizas y mayor contenido de materia volátil, la biomasa de manera general que tiene un alto contenido de materia volátil y un bajo contenido de cenizas es generalmente una materia prima prometedora para la producción de biocombustibles.

Los valores del poder calorífico de los tres residuos agroindustriales obtenidos en el presente estudio mediante los modelos matemáticos lineales presentan desviaciones a los obtenidos por la mayoría de autores, como Setter et al. (2020) quien obtuvo que las cascarillas de café presentan un valor calorífico de 4776.92 Kcal/kg; por su parte Nam et al. (2020) obtuvo que el bagazo de caña de azúcar presentaba un poder calorífico superior de 3764.21 Kcal/kg y las cascarillas de arroz un poder calorífico superior de 3267.41 Kcal/kg, sin embargo difirieron de El-Sayed (2019) quien obtuvo que las cascarillas de arroz presentan un poder calorífico de 14395.8 Kcal/kg, un valor mucho menor al que se obtuvo en el estudio. Los resultados del poder calorífico de los tres residuos agroindustriales fueron obtenidos de forma experimental y al mismo tiempo comparados con los modelos matemáticos donde se puede observar que , estos permiten estimar el poder calorífico de una biomasa sin la necesidad de realizar pruebas experimentales exhaustivas cada vez (Hamza et al., 2021), Hamza et al. (2021) determinó que los modelos no lineales no mostraron un rendimiento superior que los modelos lineales de predicción de poder calorífico, los modelos matemáticos usados en esta investigación podrían aplicarse para la predicción de para otras categorías diferentes de biomasa.

La composición elemental de las emisiones de los gases analizados en el presente estudio de los residuos de la biomasa, donde se calcularon mediante fórmula matemática, según (Maj, 2018) en su investigación trabajo con cuatro residuos lignocelulósico paja de trigo, grano de avena, agujas de alerce y vainas de colza; teniendo como resultado para el monóxido de carbono (CO) casi similar para todos en intervalo de 48.33, 50.57)kg/Mg en comparación para el dióxido de carbono CO₂ el más elevado registro aguja de alerce mientras que la más baja

para la vaina de colza con una diferencia de 14.21% en relación del carbón duro. Mientras que (Zhang et al., 2015; Cereceda-Balic et al., 2017) en su estudio demostró que para el CO tiene un intervalo de 1-89 ppm respectivamente y CO₂ está entre 138- 1317 ppm, sin embargo para el CH₄, NO_x Y SO₂ en su estudio reportaron cantidades bajas; teniendo en cuenta estos datos podemos decir que nuestro resultado de CO Y CO₂ tiene similitud. Mientras que el CH₄, NO_x y SO₂ en relación a lo mencionado presentan una baja emisión de gases

Los valores obtenidos de la combustión de relación de combustión (RC), índice de combustión (IC) y índice de inflamabilidad (Ii), de los residuos de la biomasa, presenta una similitud con los autores (Gajera et al., 2023) quien obtuvo para la relación de combustión de 300 °C (0,63) seguido de 250 °C (0,47) y 200 °C (0,24) y para el índice de inflamabilidad 36,38, 43,90 y 50,49 a dichas temperaturas y para el índice de combustión tiene un intervalo de $0.48 \cdot 10^3$, $0.988 \cdot 10^3$ con una temperatura trabajado de 200°C A 300°C y (Adeleke et al., 2020) en su estudio demostró que el índice de inflamabilidad a una temperatura de 300°C y 320°C se tiene un intervalo de 48 y 63 de los residuos de biomasa trabajados. Teniendo en cuenta estos resultados se puede determinar que se tiene un abaja relación de combustible esto se debe a que se tiene un elevado porcentaje de material volátil en las muestras trabajadas.

VI. CONCLUSIONES

El poder calorífico de la biomasa es un factor esencial para diseñar cualquier sistema de bioenergía, por el cual en esta investigación se ha caracterizado tres tipos de biomasa las cuales representan una gama muy amplia de fuentes de energía renovables. Se obtuvo análisis termogravimétrico como humedad, ceniza, material volátil, carbono fijo y el análisis elemental: CHONS, los cuales se han utilizado para predecir los valores caloríficos más altos de las biomásas estudiadas a través de modelos matemáticos lineales y no lineales, además también para estimar los índices de combustión y el factor de emisiones gaseosas, obteniendo valores similares a los encontrados en las referencias tomadas. Es por esta razón que llegamos a concluir que:

Hay una afinidad entre el análisis proximal, y el poder calorífico de las tres biomásas lignocelulósicas en su conversión a biocombustible, siendo la más eficaz la cascarilla de café ya que tiene un bajo contenido de ceniza 1.03% y un alto contenido de material volátil 80.02% seguido del bagazo de caña con 1.99% en ceniza y con 80.13% en material volátil. Con respecto a la cascarilla de arroz obtuvimos 15.43% de ceniza y 66.42% de material volátil, a pesar de que esta última biomasa tiene un porcentaje más elevado en ceniza y un menor porcentaje en volatilidad también es una materia prima prometedora para la producción de biocombustible. Del mismo modo afirmamos que la cascarilla de arroz, bagazo de caña y cascarilla de café presentan una fuente de gases de bajas emisiones al momento de quemar para generar calor, donde las emisiones de los gases, como en carbón obtuvimos 0,0106 Kg/Kcal; 0,0103 Kg/Kcal; 0,0108 Kg/Kcal, en CO 0,0015 Kg/Kcal; 0,0014 Kg/Kcal; 0,0015 Kg/Kcal, en CO₂ 0,0352 Kg/Kcal; 0,0340 Kg/Kcal; 0,0356 Kg/Kcal y relativamente bajas en CH₄ NO_x y SO₂.

El análisis proximal realizado a las biomásas lignocelulósicas de cascara de cafe, cascarilla de arroz y bagazo de caña permitió determinar que estos residuos agroindustriales poseen características físico químicas adecuadas para su aprovechamiento energético. Donde Se observo que el poder calorífico está directamente relacionado con el contenido de carbono fijo y materia volátil, y de forma inversa con el contenido de ceniza y humedad. Donde los residuos agroindustriales de bagazo de caña, cascarilla de café, cascarilla de arroz; tienen potencial bioenergético para uso como combustible, entre estos, se destaca su poder calorífico superior (promedio de 4117.836667kcal/kg) similares a otras biomásas potenciales, este valor

tiene relación con otras características encontradas en los residuos agroindustriales, como la humedad inferior al 10% en peso, valor importante para la conversión termoquímica.

el elevado contenido de volátiles y bajo contenido de cenizas son valores adecuados para potencial producción de biocarbon y biocombustible. por lado encontramos en los residuos agroindustriales es la estimación del índice de inflamabilidad y el factor de emisiones gaseosas. El índice de inflamabilidad varió entre (36.6843 - 38.3311) kcal/kg siendo valores apropiados y similares a encontrados en la literatura, para otros residuos usados en la conversión termoquímica, y también muestra bajo índice de emisiones de NO_x y bajo índice de emisiones de SO₂

Para el poder HHV superior el valor más alto obtenido fue para la cascarilla de café (4421.05) kcal/kg, seguido del bagazo de caña (4253.68) kcal/kg y finalmente la pajilla de arroz (3678.78) kcal/kg estos resultados son similares a otras biomásas potenciales, para la generación de bioenergía. Estos valores tienen relación con otras características de las biomásas encontradas, como la humedad inferior al <10 % p, valor importante para conversión termoquímica. Donde el contenido de cenizas para la pajilla de arroz es 15.426787% y para la cascarilla de café, bagazo de caña es menor al 1.9998% estos contenidos permiten evaluar positivamente la biomasa examinada, para la utilización con fines energéticos y su contribución al desarrollo sostenible, combinando el alto potencial energético de los materiales analizados con unos niveles de emisión reducidos lo que permite concluir que esto es gracias a que presenta un alto contenido volátiles y bajo contenido de carbón fijo, del mismo modo afirmamos que si se puede saber con certeza si una biomasa es apta para biocombustible haciendo uso solo del análisis proximal y por ende utilizando HHV.

las propiedades fisicoquímicas de análisis proximal, producido a partir de los residuos agroindustriales de la región son influenciadas en el proceso de transformación de termoquímica donde los resultados muestran que el contenido promedio de materia volátil, hidrogeno y oxigeno (75.52611; 7.00889; 42.88989)% tienen mayor resultado a diferencia de ceniza, carbón fijo, nitrógeno y azufre (6.14697; 13.54010; 0.63333; 0.02233) % Estos resultados obtenidos confirman que el modelo matemático utilizado permite estimar de manera confiable el poder calorífico de los compuestos analizados. Con estos resultados también se

puede predecir la conversión a biocarbono el cual se puede aprovechar en el sector agrícola mejorando los nutrientes en la tierra

Se determinó el poder calorífico de la biomasa de los residuos agroindustriales bagazo, cascarilla de arroz y cascarilla de café mediante treinta y ocho modelos matemáticos, veinte y dos modelos matemáticos necesitaron los valores del análisis proximal y los otros dieciséis restantes los valores de la composición elemental de los residuos agroindustriales. Tomando como referencia estos modelos se predijo dos modelos matemáticos tanto lineal y no lineal para los residuos lignocelulósicos estudiados en donde el valor del HHV que obtuvimos experimentalmente es de 4421.05 kcal/kg en la cascarilla de café es el residuo que presentó mayor poder calorífico y la cascarilla de arroz fue el que presentó menor poder calorífico 3678.78 kcal/kg teniendo una similitud con los resultados obtenidos con los modelos matemáticos. La modelación matemática del poder calorífico constituye una alternativa viable y eficiente frente a los métodos experimentales, al permitir una estimación rápida, reproducible y de bajo costo. Esto resulta especialmente relevante en el campo de la ingeniería química, donde la caracterización energética de materias primas es fundamental para el diseño, optimización y evaluación de procesos de conversión termoquímica de biomasa.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Abo, B. O., Gao, M., Wang, Y., Wu, C., Ma, H., & Wang, Q. (2019). Lignocellulosic biomass for bioethanol: An overview on pretreatment, hydrolysis and fermentation processes. *Reviews on Environmental Health*, 34(1), 57-68.
<https://doi.org/10.1515/reveh-2018-0054>
- AboDaham, H., Devra, V., Ahmed, F. K., Li, B., & Abd-Elsalam, K. A. (2022). Chapter 29 - Rice wastes for green production and sustainable nanomaterials: An overview. En K. A. Abd-Elsalam, R. Periakaruppan, & S. Rajeshkumar (Eds.), *Agri-Waste and Microbes for Production of Sustainable Nanomaterials* (pp. 707-728). Elsevier.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823575-1.00009-3>
- Adeleke, A. A., Odusote, J. K., Ikubanni, P. P., Lasode, O. A., Malathi, M., & Paswan, D. (2020). The ignitability, fuel ratio and ash fusion temperatures of torrefied woody biomass. *Heliyon*, 6(3), e03582. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03582>
- Adeniyi, A. G., Ighalo, J. O., & Abdulsalam, A. (2019). Modeling of integrated processes for the recovery of the energetic content of sugar cane bagasse. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 13(4), 1057-1067. <https://doi.org/10.1002/bbb.1998>
- Afanasjeva, N., Castillo, L. C., Sinisterra, J. C., & University of Valle. (2017). Lignocellulosic biomass. Part I: Biomass transformation. *Journal of Science with Technological Applications*, 3, 27-43. <https://doi.org/10.34294/j.jsta.17.3.22>
- Aguas, M. C. M., & Villarreal, E. A. S. (2016). Evaluación de la capacidad calorífica de biocombustible sólido a partir de residuos lignocelulósicos de café (*Coffea spp*) frente a leña de Espino (*Vachellia macracantha*) y Eucalipto (*Eucalyptus globulus labill*). *AXIOMA*, 15, Article 15.

- Alokika, Anu, Kumar, A., Kumar, V., & Singh, B. (2021). Cellulosic and hemicellulosic fractions of sugarcane bagasse: Potential, challenges and future perspective. *International Journal of Biological Macromolecules*, 169, 564-582.
<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.12.175>
- Ardila, Y. C., Figueroa, J. E. J., & Maciel, M. R. W. (2024). Mathematical models for predicting the higher heating value and ultimate analysis of biomass. *Industrial Crops and Products*, 208, 117777. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.117777>
- Arroyo-Vinueza, J. S., & Reina-Guzmán, W. S. (2016). Aprovechamiento del recurso biomasa a partir de los desechos de madera para una caldera de vapor. *Ingenius. Revista de Ciencia y Tecnología*, 16, 20-29.
<https://doi.org/10.17163/ings.n16.2016.03>
- Baray-Guerrero, M. del R. (2020). Caracterización de la biomasa lignocelulósica para la producción de biocombustibles. En Á. Marroquín-De Jesús, *Mujeres en la Ciencia Ciencias ambientales, uso de recursos* (1.^a ed., pp. 24-34). ECORFAN.
<https://doi.org/10.35429/H.2020.8.24.34>
- Berenguer, R. A., Nogueira Silva, F. A., Marden Torres, S., Barreto Monteiro, E. C., Helene, P., & Melo Neto, A. A. de. (2018). La influencia de las cenizas de bagazo de caña de azúcar como reemplazo parcial del cemento en la resistencia a la compresión de los morteros. *Revista ALCONPAT*, 8(1), 30-37. <https://doi.org/10.21041/ra.v8i1.187>
- Brandão, F. L., Verissimo, G. L., Leite, M. A. H., Leiroz, A. J. K., & Cruz, M. E. (2018). Computational Study of Sugarcane Bagasse Pyrolysis Modeling in a Bubbling Fluidized Bed Reactor. *Energy & Fuels*, 32(2), 1711-1723.
<https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.7b01603>

- Braza, C. E. M., & Crnkovic, P. M. (2014). Physical – Chemical Characterization of Biomass Samples for Application in Pyrolysis Process. *Chemical Engineering Transactions*, 37, 523-528. <https://doi.org/10.3303/CET1437088>
- Burgos-Arcos, C. L., Sablón-Cossío, N., Burgos-Arcos, C. L., & Sablón-Cossío, N. (2022). Evaluación de las alternativas del empleo de la biomasa lignocelulósica del café en Chimborazo. *Ingeniería Industrial*, 43, 21-36.
- Cangussu, L., Melo, J., Franca, A., & Oliveira, L. (2021). Chemical Characterization of Coffee Husks, a By-Product of Coffea arabica Production. *Foods*, 10, 3125. <https://doi.org/10.3390/foods10123125>
- Cereceda-Balic, F., Toledo, M., Vidal, V., Guerrero, F., Diaz-Robles, L. A., Petit-Breuilh, X., & Lapuerta, M. (2017). Emission factors for PM2.5, CO, CO2, NOx, SO2 and particle size distributions from the combustion of wood species using a new controlled combustion chamber 3CE. *Science of The Total Environment*, 584-585, 901-910. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.136>
- Conag, A. T., Villahermosa, J. E. R., Cabatingan, L. K., & Go, A. W. (2017). Energy densification of sugarcane bagasse through torrefaction under minimized oxidative atmosphere. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 5(6), 5411-5419. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.10.032>
- Corredor, Y. A. V., & Pérez, L. I. P. (2018). Aprovechamiento de residuos agroindustriales en el mejoramiento de la calidad del ambiente. *Revista Facultad de Ciencias Básicas*, 59-72. <https://doi.org/10.18359/rfcb.3108>
- Dashti, A., Noushabadi, A. S., Asadi, J., Raji, M., Chofreh, A. G., Klemeš, J. J., & Mohammadi, A. H. (2021). Review of higher heating value of municipal solid waste

- based on analysis and smart modelling. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 151, 111591. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111591>
- de-Lucas, A., Taranco, C., Rodriguez-Garcia, E., & Paniagua, P. (2012). *Biomasa, biocombustibles y sostenibilidad*.
<http://sostenible.palencia.uva.es/system/files/publicaciones/Biomasa%2C%20Biocombustibles%20y%20Sostenibilidad.pdf>
- Elizabeth, Carvajal & Luisa Fernanda Marulanda. (2021). *Uso de residuos de café como biosorbente para la remoción de metales pesados en aguas residuales | Ingenierías USBMed*. <https://revistas.usb.edu.co/index.php/IngUSBmed/article/view/4477>
- El-Sayed, S. (2019). Thermal decomposition, kinetics and combustion parameters determination for two different sizes of rice husk using TGA. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*, 12(4), 460-469.
<https://doi.org/10.1016/j.eaef.2019.08.002>
- Erol, M., Haykiri-Acma, H., & Küçükbayrak, S. (2010). Calorific value estimation of biomass from their proximate analyses data. *Renewable Energy*, 35(1), 170-173.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.05.008>
- Esquivel, P., & Jiménez, V. M. (2012). Functional properties of coffee and coffee by-products. *Food Research International*, 46(2), 488-495.
<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2011.05.028>
- Fuentes, D. S. O., Nuñez, A. P. V., & Vela-Garcia, N. (2023). Diseño de una ruta de conversión de residuos lignocelulósicos para la producción de butano como sustituto del gas licuado de petróleo. *ACI Avances en Ciencias e Ingenierías*, 15(1), Article 1.
<https://doi.org/10.18272/aci.v15i1.2884>

- Gajera, B., Datta, A., Gakkhar, N., & Sarma, A. K. (2023, diciembre 1). *Torrefied Mustard Straw as a Potential Solid Biofuel: A Study with Physicochemical Characterization and Thermogravimetric and Emission Analysis*. | EBSCOhost.
<https://doi.org/10.1007/s12155-023-10600-y>
- Gerencia Regional de Agricultura Lambayeque. (2019). *GERENCIA REGIONAL DE AGRICULTURA LAMBAYEQUE*.
<https://www.regionlambayeque.gob.pe/web/tema/detalle/19301?pass=NTY2>
- Gestión. (2018). *Cuando la cáscara también vale* | Blogs. Gestión.
<https://gestion.pe/blog/prosperoperu/2018/06/cuando-la-cascara-tambien-vale.html/>
- Gonzalez, L. V. P., Gómez, S. P. M., & Abad, P. A. G. (2017). Aprovechamiento de residuos agroindustriales en Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 8(2), Article 2. <https://doi.org/10.22490/21456453.2040>
- Guo, Y., Tan, C., Sun, J., Li, W., Zhang, J., & Zhao, C. (2020). Porous activated carbons derived from waste sugarcane bagasse for CO₂ adsorption. *Chemical Engineering Journal*, 381, 122736. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.122736>
- Hamza, U., Mohammed, A., Goni, M., & Garba, A. (2023). EVALUATION OF MODELS FOR THE PREDICTION OF HIGHER HEATING VALUE OF BIOMASS BASED ON PROXIMATE ANALYSIS. *Nigerian Journal of Engineering*, 30(2), 24.
<https://doi.org/10.5455/nje.2023.30.02.04>
- Hernández-Olivares, F., Elizabeth Medina-Alvarado, R., Burneo-Valdivieso, X. E., & Rodrigo Zúñiga-Suárez, A. (2020). Short sugarcane bagasse fibers cementitious composites for building construction. *Construction and Building Materials*, 247, 118451. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118451>

- Hossain, SK. S., & Roy, P. K. (2019). Fabrication of sustainable insulation refractory: Utilization of different wastes. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 58(3), 115-125. <https://doi.org/10.1016/j.bsecv.2018.09.002>
- Huang, Y.-F., & Lo, S.-L. (2020). Predicting heating value of lignocellulosic biomass based on elemental analysis. *Energy*, 191, 116501. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116501>
- Jara Huacacolqui, E. L., Leiva Cabrera, F. A., Martín Alva, E. A., Medina Vásquez, K. M. E., Bardales Vásquez, C. B., León Torres, C. A., Jara Huacacolqui, E. L., Leiva Cabrera, F. A., Martín Alva, E. A., Medina Vásquez, K. M. E., Bardales Vásquez, C. B., & León Torres, C. A. (2022). Los principales residuos lignocelulósicos agroindustriales de La Libertad y la producción de biomasa de *Candida utilis* var. Major. *Arnaldoa*, 29(1), 163-176. <https://doi.org/10.22497/arnaldoa.291.29110>
- Koul, B., Yakoob, M., & Shah, M. P. (2022). Agricultural waste management strategies for environmental sustainability. *Environmental Research*, 206, 112285. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.112285>
- Krishnan, R., Hauchhum, L., Gupta, R., & Pattanayak, S. (2018). Prediction of Equations for Higher Heating Values of Biomass Using Proximate and Ultimate Analysis. *2018 2nd International Conference on Power, Energy and Environment: Towards Smart Technology (ICEPE)*, 1-5. <https://doi.org/10.1109/EPETSG.2018.8658984>
- Lombardi, G., Rodríguez-Ramos, P. A., Cárdenas, L. M. Z.-D., Pérez-Ones, O., & Cárdenas, B. M. Z.-D. (2015). Potencialidades del bagazo para la obtención de etanol frente a la generación de electricidad. *Ingeniería. Investigación y Tecnología*, XVI(3), 407-418.

- Lopes, F. C., & Ligabue-Braun, R. (2021). Agro-Industrial Residues: Eco-Friendly and Inexpensive Substrates for Microbial Pigments Production. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fsufs.2021.589414>
- Lu, H., Gong, Y., Areeprasert, C., Ding, L., Guo, Q., Chen, W.-H., & Yu, G. (2021). Integration of Biomass Torrefaction and Gasification based on Biomass Classification: A Review. *Energy Technology*, 9(5), 2001108. <https://doi.org/10.1002/ente.202001108>
- Maj, G. (2018). Emission Factors and Energy Properties of Agro and Forest Biomass in Aspect of Sustainability of Energy Sector. *Energies*, 11(6), 1516. <https://doi.org/10.3390/en11061516>
- Manals-Cutiño, E. M., Salas-Tort, D., & Penedo-Medina, M. (2018). Caracterización de la biomasa vegetal “ cascarilla de café. *Tecnología Química*, 38(1), 169-181.
- Manals-Cutiño, E. M., Salas-Tort, D., & Penedo-Medina, M. (2019). Caracterización de la biomasa vegetal "cascarilla de café". *Chemical Technology*, 39(1), Article 1. <https://doi.org/10.1590/2224-6185.2019.1.%x>
- Marcelo-Aldana, D., & Alamo Viera, M. (2016, noviembre 14). *EVALUACIÓN DEL POTENCIAL ENERGÉTICO DE LOS RESIDUOS DE LA CAÑA DE AZÚCAR EN EL PERÚ*.
- Mhuantong, W., Charoensawan, V., Kanokratana, P., Tangphatsornruang, S., & Champreda, V. (2015). Comparative analysis of sugarcane bagasse metagenome reveals unique and conserved biomass-degrading enzymes among lignocellulolytic microbial communities. *Biotechnology for Biofuels*, 8(1), 16. <https://doi.org/10.1186/s13068-015-0200-8>

- ministerio de agricultura. (s. f.). *Café. Perú: Un campo fértil para sus inversiones y el desarrollo de sus exportaciones—Infocafes*. Recuperado 18 de agosto de 2022, de <http://infocafes.com/portal/biblioteca/cafe-peru-un-campo-fertil-para-sus-inversiones-y-el-desarrollo-de-sus-exportaciones/>
- Mo, J., Yang, Q., Zhang, N., Zhang, W., Zheng, Y., & Zhang, Z. (2018). A review on agro-industrial waste (AIW) derived adsorbents for water and wastewater treatment. *Journal of Environmental Management*, 227, 395-405.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.08.069>
- Mujtaba, M., Fernandes Fraceto, L., Fazeli, M., Mukherjee, S., Savassa, S. M., Araujo de Medeiros, G., do Espírito Santo Pereira, A., Mancini, S. D., Lipponen, J., & Vilaplana, F. (2023). Lignocellulosic biomass from agricultural waste to the circular economy: A review with focus on biofuels, biocomposites and bioplastics. *Journal of Cleaner Production*, 402, 136815. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136815>
- Mukherjee, A., Okolie, J. A., Tyagi, R., Dalai, A. K., & Niu, C. (2021). Pyrolysis kinetics and activation thermodynamic parameters of exhausted coffee residue and coffee husk using thermogravimetric analysis. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 99(8), 1683-1695. <https://doi.org/10.1002/cjce.24037>
- Muñoz Solares, M. (2017). *Potencial de los Residuos Agrícolas de Cosecha de Caña de Azúcar, como un biocombustible*.
https://www.researchgate.net/publication/320087116_Potencial_de_los_Residuos_Agrícolas_de_Cosecha_de_Cana_de_Azucar_como_un_biocombustible
- Mutuku, K. (2019). *Characterization of Physical Properties of Biomass Waste Materials in Kenya for Gasification: Rice Husks and Coffee Husks*. 7(2), 6.

- Nam, N. H., Linh, V. N., Dung, L. D., & Ha, V. T. T. (2020). Physico-chemical characterization of forest and agricultural residues for energy conversion processes. *Vietnam Journal of Chemistry*, 58(6), 735-741.
<https://doi.org/10.1002/vjch.202000054>
- OCDE-FAO Perspectivas Agrícolas 2023-2032A. (s. f.). *OCDE-FAO Perspectivas Agrícolas 2023-2032*. Recuperado 22 de marzo de 2024, de
<https://www.oecd.org/publications/ocde-fao-perspectivas-agricolas-22184376.htm>
- Oliveira, A. C. L. de, Renato, N. dos S., Ribeiro Júnior, R. S., & Ildefonso, L. L. H. (2023). PREDICTING HIGHER HEATING VALUE OF AGRO-INDUSTRIAL WASTE: CLASSIFICATION AND MODELING BASED ON PROXIMATE AND ULTIMATE ANALYSIS. *Engenharia Agrícola*, 43, e20220139.
<https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v43nepe20220139/2023>
- Parikh, J., Channiwala, S. A., & Ghosal, G. K. (2005). A correlation for calculating HHV from proximate analysis of solid fuels. *Fuel*, 84(5), 487-494.
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2004.10.010>
- Park, J. E., Lee, G. B., Jeong, C. J., Kim, H., & Kim, C. G. (2021). Determination of Relationship between Higher Heating Value and Atomic Ratio of Hydrogen to Carbon in Spent Coffee Grounds by Hydrothermal Carbonization. *Energies*, 14(20), Article 20. <https://doi.org/10.3390/en14206551>
- Parra Reyes, J. A., & Pérez, E. H. (2022). Estimación de materiales lignocelulosicos residuales como adsorbentes de cromo y plomo. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 21(1), 18-27.
<https://doi.org/10.18684/rbsaa.v21.n1.2023.1610>

- Pattanaik, L., Pattnaik, F., Saxena, D., & Naik, S. (2019). *Biofuels from agricultural wastes* (pp. 103-142). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815162-4.00005-7>
- Peng, N., Yao, Z., Wang, Z., Huang, J., Khan, M. T., Chen, B., & Zhang, M. (2021). Fungal deterioration of the bagasse storage from the harvested sugarcane. *Biotechnology for Biofuels*, 14(1), 152. <https://doi.org/10.1186/s13068-021-02004-x>
- R, K. C., M, Y. A., M, A. M., V, R. O., & Ch, L. C. (2017). Residuos agroindustriales su impacto, manejo y aprovechamiento. *Revista Colombiana de Ciencia Animal - RECIA*, 9(S1), Article S1. <https://doi.org/10.24188/recia.v9.nS.2017.530>
- Rezahasani, R., Samani, A. K.-, Aghbashlo, M., Amiri, H., & Tabatabaei, M. (2024). *Sugar fermentation: C4 platforms—ScienceDirect*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780323917568000050>
- Rodríguez-Romero, L. A., Gutiérrez-Antonio, C., García-Trejo, J. F., & Feregrino-Pérez, A. A. (2022). Estudio comparativo de modelos matemáticos para predecir el poder calorífico de residuos agrícolas mexicanos. *TecnoLógicas*, 25(53). <https://www.redalyc.org/journal/3442/344270031001/>
- Rosas-Calleja, D. (2016). REVALORIZACIÓN DE ALGUNOS RESIDUOS AGROINDUSTRIALES Y SU POTENCIAL DE APLICACIÓN A SUELOS AGRÍCOLAS. *Agro Productividad*, 9(8), Article 8. <https://revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/796>
- Roy, R., & Ray, S. (2020). Development of a non-linear model for prediction of higher heating value from the proximate composition of lignocellulosic biomass. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*. <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/15567036.2020.1817191>

- Sagastume Gutiérrez, A., Cabello Eras, J. J., Hens, L., & Vandecasteele, C. (2020). The energy potential of agriculture, agroindustrial, livestock, and slaughterhouse biomass wastes through direct combustion and anaerobic digestion. The case of Colombia. *Journal of Cleaner Production*, 269, 122317. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122317>
- Setter, C., Silva, F. T. M., Assis, M. R., Ataíde, C. H., Trugilho, P. F., & Oliveira, T. J. P. (2020). Slow pyrolysis of coffee husk briquettes: Characterization of the solid and liquid fractions. *Fuel*, 261, 116420. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116420>
- Shi, H., Mahinpey, N., Aqsha, A., & Silbermann, R. (2016). Characterization, thermochemical conversion studies, and heating value modeling of municipal solid waste. *Waste Management*, 48, 34-47. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.09.036>
- Singh, B. (2018). 13—Rice husk ash. En R. Siddique & P. Cachim (Eds.), *Waste and Supplementary Cementitious Materials in Concrete* (pp. 417-460). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102156-9.00013-4>
- Singh, N., Singhanian, R. R., Nigam, P. S., Dong, C.-D., Patel, A. K., & Puri, M. (2022). Global status of lignocellulosic biorefinery: Challenges and perspectives. *Bioresource Technology*, 344, 126415. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126415>
- Torres-Valenzuela, L. S., Martínez, K. G., Serna-Jimenez, J. A., & Hernández, M. C. (2019). Secado de Pulpa de Café: Condiciones de Proceso, Modelación Matemática y Efecto sobre Propiedades Fisicoquímicas. *Información tecnológica*, 30(2), 189-200. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642019000200189>
- Vargas-Moreno, J. M., Callejón-Ferre, A. J., Pérez-Alonso, J., & Velázquez-Martí, B. (2012). A review of the mathematical models for predicting the heating value of biomass

- materials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(5), 3065-3083.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.054>
- Vats, N., Khan, A. A., & Ahmad, K. (2019). Observation of biogas production by sugarcane bagasse and food waste in different composition combinations. *Energy*, 185, 1100-1105. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.07.080>
- Yin, C.-Y. (2011). Prediction of higher heating values of biomass from proximate and ultimate analyses. *Fuel*, 90(3), 1128-1132. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2010.11.031>
- Zhang, T., Wooster, M. J., Green, D. C., & Main, B. (2015). New field-based agricultural biomass burning trace gas, PM 2.5 , and black carbon emission ratios and factors measured in situ at crop residue fires in Eastern China. *Atmospheric Environment*, 121, 22-34. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.05.010>
- Berenguer, R., Nogueira, F., Marden, S., Barreto, E., Helene, P., Y Melo, A. (2018) influencia de las cenizas de bagazo de caña de azúcar como reemplazo parcial del cemento en la resistencia a la compresión de los morteros. *Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción (ALCONPAT)* ,8(1), PP. 30-37 <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v8i1.187>
- Braz, C., y Crnkovic, P. (2014). Physical – chemical characterization of biomass samples for application in pyrolysis process. *Chemical Engineering Transactions*, 14, 523-528. <https://www.aidic.it/cet/14/37/088.pdf>
- Cabrera Rodríguez, E., León Fernández, V., Montano Pérez, A. de la C., & Dopico Ramírez, D. (2016). Caracterización de residuos agroindustriales con vistas a su aprovechamiento. *Centro Azúcar*, 43(4), 27-35.
- Manals-Cutiño, E. M., Salas-Tort, D., & Penedo-Medina, M. (s. f.). Caracterización de la biomasa vegetal “cascarilla de café. *Tecnología Química*, 38(1), 169-181.
- Y, J. P. M., G, A. V., & L, B. S. (2007). Análisis comparativo de las características

fisicoquímicas de la cascarilla de arroz. *Scientia Et Technica*, XIII(37), 255-260.

Vargas, J., Alvarado, P., Vega-Baudrit, J., & Porras, M. (2013). Caracterización del subproducto cascarillas de arroz en búsqueda de posibles aplicaciones como materia prima en procesos. *Revista Científica*, 23(1), 87-102.
<https://doi.org/10.54495/Rev.Cientifica.v23i1.115>

Park, J., Gi, L., Cheol, J., Ho, K., y Choong., K. (2021). Determination of Relationship between Higher Heating Value and Atomic Ratio of Hydrogen to Carbon in Spent Coffee Grounds by Hydrothermal Carbonization. *Energies*, 14(20), 1-10.
<https://doi.org/10.3390/en14206551>

Hamza1U., Mohammed, A., Goni, M., y Garba, A. (2023). Evaluation of Models for the Prediction of higher Heating Value of Biomass Based on Proximate Analysis. *Nigerian Journal of Engineering*, 30(2), 0794 – 4756. <https://www.njeabu.com.ng/fulltext/192-1673907378.pdf?1707864110>

VIII. ANEXO



Figura 9: acondicionamiento de la materia para quitar humedad.



Figura 10: materia prima en la estufa a 110°C por 24 horas para quitar humedad.



Figura 11: molienda de la materia para facilitar la obtención de la granulometría requerida con ayuda de un molino manual.



Figura 12: autor obteniendo la malla 600 con la ayuda de un tamizador, del mismo modo autor haciendo uso de una malla 60 manual con la finalidad de mejorar nuestra muestra.



Figura 13: crisoles en la estufa para quitarles la humedad.

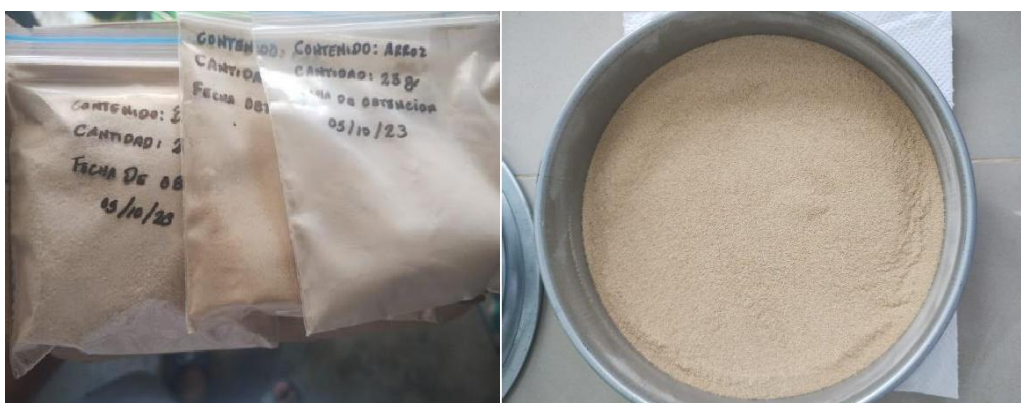


Figura 14: biomasa acondicionada lista para ser utilizada.



Figura 15: crisoles acondicionados en el humificador



Figura 16: peso inicial antes de ser llevadas a la estufa de las tres muestras de biomasa bagazo de caña, cascarilla de arroz y cascarilla de café, para obtener la humedad.



Figura 17: reposo de la biomasa en el humificador, con el propósito de que se establezca el peso a fin de obtener la humedad.



Figura 18: peso inicial de las tres muestras antes de ser llevadas a la mufla para volatilidad, cascarilla de café,



Figura 19: crisoles con la muestra acondicionados en una gradilla, con el fin de facilitar el manejo para ser colocados a la mufla a una temperatura de 850 °C por 6 minutos, después finalizado el tiempo estos son retirados hasta alcanzar una temperatura de 200°C, para luego ser colocados en el humificador hasta estabilizarse.



Figura 20: peso inicial de las tres muestras antes de ser llevadas a la mufla para ceniza, bagazo de caña, cascarilla de café, cascarilla de arroz.



Figura 21: crisoles acondicionados en la mufla hasta alcanzar los 750 °C de forma lenta manteniendo esa condición por 6 horas.

CALCULO MATEMATICO DEL ANALISIS GRAVIMETRICO

HUMEDAD DE LA BIOMASA LIGNOCELULOSICO

BAGAZO.

$$U_S = (M_u - M_s)/M_s * 100$$

$$U_S = (43.4554 - 43.2166)/(43.2166 - 38.4452) * 100$$

$$U_S = 5.004$$

ARROZ.

$$U_S = (M_u - M_s)/M_s * 100$$

$$U_S = (43.2496 - 43.0038)/(43.0038 - 38.2443) * 100$$

$$U_S = 5.1644$$

CAFÉ.

$$U_S = (M_u - M_s)/M_s * 100$$

$$U_S = (44.0975 - 43.8961)/(43.8961 - 39.0941) * 100$$

$$U_S = 4.1940$$

VOLATILIDAD DE LA BIOMASA LIGNOCELULOSICO

BAGAZO.

$$M_V = (M_1 - M_2)/M_1 * 100$$

$$U_S = (2 - 0.3974)/2 * 100$$

$$[[Mv]]_S = 80.13$$

ARROZ.

$$M_V = (M_1 - M_2)/M_1 * 100$$

$$U_S = (2 - 0.6719)/2 * 100$$

$$[[Mv]]_S = 66.405$$

CAFÉ.

$$M_V = (M_1 - M_2)/M_1 * 100$$

$$U_S = (2 - 0.3997)/2 * 100$$

$$[[Mv]]_S = 80.015$$

CENIZA DE LA BIOMASA LIGNOCELULOSICO

BAGAZO.

$$C_S = M_f/M_{is} * 100$$

$$U_S = (38.2476 - 38.1883)/(41.1976 - 38.1883) * 100$$

$$[[ASH]]_S = 1.97$$

ARROZ.

$$C_S = M_f/M_{is} * 100$$

$$U_S = (38.6665 - 38.2022)/(41.2119 - 38.2022) * 100$$

$$[[ASH]]_S = 15.4267$$

CAFÉ.

$$C_S = M_f/M_{is} * 100$$

$$U_S = (37.9869 - 37.9562)/(40.9622 - 37.9562) * 100$$

$$[[ASH]]_S = 1.02129$$

CARBON FIJO DE LA BIOMASA LIGNOCELULOSICO

BAGAZO.

$$\text{carbon fijo} = 100 - \text{humedad} - \text{volatilidad} - \text{ceniza}.$$

$$\text{carbon fijo} = 100 - 5.0048 - 80.13 - 1.9984$$

$$\text{carbon fijo} = 12.8667$$

CAFÉ.

$$\text{carbon fijo} = 100 - \text{humedad} - \text{volatilidad} - \text{ceniza}.$$

$$\text{carbon fijo} = 100 - 4.1940 - 80.015 - 1.0212$$

$$\text{carbon fijo} = 14.7696$$

ARROZ.

$$\text{carbon fijo} = 100 - \text{humedad} - \text{volatilidad} - \text{ceniza}.$$

$$\text{carbon fijo} = 100 - 5.1644 - 66.405 - 15.4267$$

$$\text{carbon fijo} = 13.0038$$

MODELOS MATEMÁTICOS PARA HALLAR EL PODER CALORIFICO.

Para hallar el poder calorífico con la fórmula 1 se usó la siguiente ecuación

Poder calorífico del Arroz

$$HHV = -19.81966 + (0.36458 * MV) + (0.50963 * CF) + (0.19723 * ASH)$$

$$HHV = -19.81966 + (0.36458 * 66.405) + (0.50963 * 13.0038) + (0.19723 * 15.4268)$$

$$HHV = 14.06003 \text{ MJ/KG}$$

$$HHV = 3358.8221 \text{ Kcal/kg}$$

Poder calorífico del bagazo

$$HHV = -19.81966 + (0.36458 * MV) + (0.50963 * CF) + (0.19723 * ASH)$$

$$HHV = -19.81966 + (0.36458 * 80.130) + (0.50963 * 12.8668) + (0.19723 * 1.9984)$$

$$HHV = 16.34558 \text{ MJ/KG}$$

$$HHV = 3904.81995 \text{ Kcal/kg}$$

Poder calorífico del café

$$HHV = -19.81966 + (0.36458 * MV) + (0.50963 * CF) + (0.19723 * ASH)$$

$$HHV = -19.81966 + (0.36458 * 80.015) + (0.50963 * 14.7696) + (0.19723 * 1.0213)$$

$$HHV = 17.08068 \text{ MJ/KG}$$

$$HHV = 4080.43026 \text{ Kcal/kg}$$

Para hallar el poder calorífico con la fórmula 2 se usó la siguiente ecuación

Poder calorífico del Arroz

$$HHV = 0.1905 * (VM) + 0.2521 * (FC)$$

$$HHV = 0.1905 * 66.405 + 0.2521 * 13.0038$$

$$HHV = 15.92841 \text{ MJ/KG}$$

$$HHV = 3805.16288 \text{ Kcal/kg}$$

Poder calorífico del Bagazo

$$HHV = 0.1905 * (VM) + 0.2521 * (FC)$$

$$HHV = 0.1905 * 80.13 + 0.2521 * 12.8668$$

$$HHV = 18.50848 \text{ MJ/KG}$$

$$HHV = 4421.5193 \text{ Kcal/kg}$$

Poder calorífico del café

$$HHV = 0.1905 * (VM) + 0.2521 * (FC)$$

$$HHV = 0.1905 * 80.015 + 0.2521 * 14.7696$$

$$HHV = 18.96628 \text{ MJ/KG}$$

$$HHV = 4530.8838 \text{ Kcal/kg}$$

Para hallar el poder calorífico con la fórmula 3 se usó la siguiente ecuación

Poder calorífico del Arroz

$$HHV = 1.901 + 0.29634 * C + 0.51064 * H - 0.046232 * O + 0.46429 * N + 8.67449 * S$$

$$HHV = 1.901 + 0.29634 * 44.38 + 0.51064 * 6.52 - 0.046232 * 48.678 + 0.46429 * 0.4 + 8.67449 * 0.022$$

$$HHV = 18.07558 \text{ MJ/KG}$$

$$HHV = 4318.10319 \text{ Kcal/kg}$$

Poder calorífico del Bagazo

$$HHV = 1.901 + 0.29634 * C + 0.51064 * H - 0.046232 * O + 0.46429 * N + 8.67449 * S$$

$$HHV = 1.901 + 0.29634 * 49.76 + 0.51064 * 7.27 - 0.046232 * 42.648 + 0.46429 * 0.3 + 8.67449 * 0.022$$

$$HHV = 20.465537 \text{ MJ/KG}$$

$$HHV = 4889.04375 \text{ Kcal/kg}$$

Poder calorífico del Café

$$HHV = 1.901 + 0.29634 * C + 0.51064 * H - 0.046232 * O + 0.46429 * N + 8.67449 * S$$

$$HHV = 1.901 + 0.29634 * 53.89 + 0.51064 * 7.44 - 0.046232 * 37.457 + 0.46429 * 1.19 + 8.67449 * 0.022$$

$$HHV = 22.4790 \text{ MJ/KG}$$

$$HHV = 5370.03944 \text{ Kcal/kg}$$

Para hallar el poder calorífico con la fórmula 4 se usó la siguiente ecuación

Poder calorífico del Arroz

$$HHV = (0.3536 * FC) + (0.1559 * VM) - (0.0078 * ASH)$$

$$HHV = (0.3536 * 13.0038) + (0.1559 * 66.405) - (0.0078 * 15.4268)$$

$$HHV = 14.83036MJ/KG$$

$$HHV = 3542.8466Kcal/kg$$

Poder calorífico del Bagazo

$$HHV = (0.3536 * FC) + (0.1559 * VM) - (0.0078 * ASH)$$

$$HHV = (0.3536 * 12.8668) + (0.1559 * 80.13) - (0.0078 * 1.9984)$$

$$HHV = 17.02637MJ/KG$$

$$HHV = 4067.45635Kcal/kg$$

Poder calorífico del Café

$$HHV = (0.3536 * FC) + (0.1559 * VM) - (0.0078 * ASH)$$

$$HHV = (0.3536 * 14.7696) + (0.1559 * 80.015) - (0.0078 * 1.0213)$$

$$HHV = 17.68891MJ/KG$$

$$HHV = 4225.73131Kcal/kg$$

Para hallar el poder calorífico con la fórmula 4 se usó la siguiente ecuación

Poder calorífico del Arroz

$$HHV = 6.39872 + (0.27418 \times C) + (0.55370 \times H) - (0.091826 \times O)$$

$$HHV = 6.39872 + (0.27418 \times 44.38) + (0.55370 \times 6.52) - (0.091826 \times 48.678)$$

$$HHV = 17.70705MJ/KG$$

$$HHV = 4230.06363Kcal/kg$$

Poder calorífico del bagazo

$$HHV = 6.39872 + (0.27418 \times C) + (0.55370 \times H) - (0.091826 \times O)$$

$$HHV = 6.39872 + (0.27418 \times 49.76) + (0.55370 \times 7.27) - (0.091826 \times 42.648)$$

$$HHV = 20.1511 MJ/KG$$

$$HHV = 4813.93229 Kcal/kg$$

Poder calorífico del Café

$$HHV = 6.39872 + (0.27418 \times C) + (0.55370 \times H) - (0.091826 \times O)$$

$$HHV = 6.39872 + (0.27418 \times 53.89) + (0.55370 \times 7.44) - (0.091826 \times 37.457)$$

$$HHV = 21.85428 MJ/KG$$

$$HHV = 5220.80309 Kcal/kg$$

Para las emisiones de los gases se usaron las siguientes ecuaciones

- Factor de emisión de carbón (Ec).

$$Ec = 0.88 \times C \dots \dots \dots (5)$$

- Factor de emisión de CO (kg/kg).

$$CO = 0.06 \times \frac{28}{12} \times Ec \dots \dots \dots (6)$$

- Factor de emisión de CH₄ (kg/kg).

$$CH_4 = 0.005 \times \frac{16}{12} \times Ec \dots \dots \dots (7)$$

- Factor de emisión de CO₂ (kg/kg).

$$CO_2 = \frac{44}{12} \times (Ec - \frac{12}{28} \times CO - \frac{12}{16} \times CH_4 - 0.009 \times \frac{26.4}{31.4}) \dots \dots \dots (8)$$

- Factor de emisión de NO_x (kg/kg).

$$NO_x = 0.122 \times \frac{46}{14} \times Ec \times \frac{C}{N} \dots \dots \dots (9)$$

- Factor de emisión de SO₂ (kg/kg).

$$SO_2 = 0.02 \times S \times (1 - \gamma) \dots \dots \dots$$

Unidad de conversión de los gases CO Y CO₂

$$CO = 0.556 \text{ PPM mg/l}$$

$$CO_2 = 0.909 \text{ PPM mg/l}$$

Cálculo matemático de las emisiones de los gases

Relación de combustión (RC). $RC = \frac{CF}{MV}$

Para el arroz $RC = 13/66.405$

$$RC = 0.1958$$

Índice de combustibilidad (IC). $IC = \frac{PCS}{RC} * (115 - ASH) * \frac{1}{105}$

$$IC = 3678.78/0.1958 * (115 - 15.426) * 1/105$$

$$IC = 17815.0631 \text{ Kcal/kg}$$

Índice de inflamabilidad (Ii)= $Ii = \frac{PCS(\frac{Kcal}{kg}) - 81 * CF}{MV + Humedad}$

$$LI = (3678.78 - 81 * 13) / (66.405 - 5.164)$$

$$LI = 36.6843 \text{ Kcal/kg}$$

Para todos los compuestos y las repeticiones se realizaron de la misma forma y el mismo modelo matemático

CODIGO OCTAVE DE MODELO LINEAL

Archivo: Octave6.m

```
clear,clc
```

```
% Datos de ejemplo (reemplaza estos valores por tus datos experimentales)
```

```
% La primera columna es el valor de y (NHV), las demás son las 9 variables independientes.
```

```
% Suponiendo que tienes 3 tipos de biomasa en el orden con 3 réplicas por cada tipo:
```

```
% [NHV, Var1, Var2, ..., Var9]
```

```
% Donde las variables independientes pueden incluir: FC (carbono fijo), VM (materia volátil),
```

```
% Ash (cenizas), Humedad, S (azufre), H2 (hidrógeno), N (nitrógeno), y otras 2 variables adicionales.
```

% Matriz de datos experimentales (reemplaza con tus datos)

```

data = [
    % Tipo 1 de biomasa - 3 réplicas
    3012.98544, 5.164, 66.405, 15.427, 13.004, 44.38, 6.52, 0.4, 48.678, 0.022;
    4011.66814, 5.167, 66.44, 15.410, 12.983 44.66 6.28, 0.41, 48.628 0.022;
    4011.68642, 5.162, 66.435, 15.457, 12.946, 44.51, 6.03, 0.41, 49.028, 0.022;
    % Tipo 2 de biomasa - 3 réplicas
    4252.5963, 5.005, 80.13, 1.998, 12.867, 49.76, 7.27, 0.3, 42.648, 0.022;
    4250.6173, 5.007, 80.14, 1.978, 12.875, 49.8, 7.42, 0.29, 42.468, 0.022;
    4257.8136, 5.011, 80.125, 1.958, 12.905, 49.78, 7.33, 0.3, 42.568, 0.022;
    % Tipo 3 de biomasa - 3 réplicas
    4421.406, 4.194, 80.015, 1.021, 14.770, 53.89, 7.44, 1.19, 37.457, 0.023;
    4420.872, 4.183, 80.02, 1.015, 14.782, 54.2, 7.38, 1.2, 37.197, 0.023;
    4420.872 4.188, 80.025, 1.058, 14.730, 54.03, 7.41, 1.2, 37.337, 0.023;
];

% Número de muestras por biomasa (3 réplicas por biomasa)
samples_per_biomass = 3;

% Número de biomosas diferentes
num_biomass_types = 3;

% Separar los valores dependientes (y) e independientes (X)
y = data(:, 1); % Valor calorífico (NHV)
X = data(:, 2:end); % Variables independientes: [Var1, Var2, ..., Var9]

% Añadir una columna de unos a X para el término constante (intercepto)
X = [ones(size(X, 1), 1) X];

% Realizar la regresión múltiple usando la fórmula de mínimos cuadrados
% El vector de coeficientes b contendrá los coeficientes de la ecuación ajustada
b = (X' * X) \ (X' * y);

```

```

% Mostrar los coeficientes obtenidos
disp('Coeficientes de la regresión:');
disp(b);

% Ecuación resultante:
% b(1) -> término constante
% b(2), b(3), ..., b(n+1) -> coeficientes de las variables independientes
disp('La ecuación ajustada es:');
fprintf('NHV = %.4f + %.4f*[Var1] + %.4f*[Var2] + %.4f*[Var3] + %.4f*[Var4] +
        %.4f*[Var5] + %.4f*[Var6] + %.4f*[Var7] + %.4f*[Var8] + %.4f*[Var9]\n', b);

% Calcular valores predichos
y_pred = X * b;

% Comparar valores predichos con los experimentales
disp('Valores predichos vs. experimentales:');
disp([y, y_pred]);

% ---- Calcular coeficientes estadísticos por biomasa ----
for i = 1:num_biomass_types
    % Rango de muestras para este tipo de biomasa
    start_idx = (i - 1) * samples_per_biomass + 1;
    end_idx = i * samples_per_biomass;

    % Datos de la biomasa i
    y_biomass = y(start_idx:end_idx);
    y_pred_biomass = y_pred(start_idx:end_idx);

    % Calcular el coeficiente de regresión lineal (R²)
    SStot = sum((y_biomass - mean(y_biomass)).^2); % Suma total de cuadrados
    SSres = sum((y_biomass - y_pred_biomass).^2); % Suma de cuadrados residuales
    R2 = 1 - (SSres / SStot); % Coeficiente de determinación R²

```

```

% Calcular el promedio del error absoluto (%)
error_absoluto = abs(y_biomass - y_pred_biomass); % Errores absolutos
error_absoluto_pct = (error_absoluto ./ abs(y_biomass)) * 100; % Errores en porcentaje
error_absoluto_promedio = mean(error_absoluto_pct);

% Calcular la desviación estándar de los valores predichos
desviacion_estandar = std(y_biomass - y_pred_biomass);

% Mostrar resultados
fprintf('\n--- Resultados para Biomasa %d ---\n', i);
fprintf('Coeficiente de regresión R²: %.4f\n', R2);
fprintf('Promedio del error absoluto (%): %.4f\n', error_absoluto_promedio);
fprintf('Desviación estándar: %.4f\n', desviacion_estandar);

% ---- Graficar valores experimentales vs predichos para esta biomasa ----
figure;
hold on;
grid on;
plot(y_biomass, y_pred_biomass, 'o', 'MarkerSize', 8, 'MarkerFaceColor', 'b'); % Puntos
    predichos vs experimentales
plot([min(y_biomass), max(y_biomass)], [min(y_biomass), max(y_biomass)], 'r-',
    'LineWidth', 2); % Línea de referencia (y=x)
xlabel('Valores Experimentales (NHV)');
ylabel('Valores Predichos (NHV)');
title(sprintf('Comparación de Valores Experimentales vs Predichos - Biomasa %d', i));
legend('Datos Predichos', 'Referencia (y = x)', 'Location', 'NorthWest');
hold off;
end

```

CODIGO OCTAVE DE MODELO NO LINEAL

Archivo : data.m

```
clear,clc
```

```
% Si no tienes la función 'lsqcurvefit', instala el paquete optim con:
```

```
% pkg install -forge optim
```

```
% pkg load optim
```

```
% Datos experimentales (reemplaza estos valores con tus datos reales)
```

```
% Columnas: [Humedad (H), Materia Volátil (VM), Cenizas (Ash), Carbono Fijo (FC)]
```

```
X = [
```

```
    % Tipo 1 de biomasa (3 réplicas)
```

```
    5.5, 73.54, 2.96, 23.80;
```

```
    9.25, 77.96, 6.89, 15.15;
```

```
    8.50, 74.25, 5.10, 14.20;
```

```
    % Tipo 2 de biomasa (3 réplicas)
```

```
    5.0, 78.16, 1.05, 20.79;
```

```
    12.50, 76.86, 7.14, 16.00;
```

```
    11.75, 75.50, 6.50, 17.25;
```

```
    % Tipo 3 de biomasa (3 réplicas)
```

```
    8.75, 80.13, 5.75, 14.12;
```

```
    10.75, 86.27, 8.13, 5.60;
```

```
    9.50, 85.50, 7.50, 6.00;
```

```
];
```

```
% Valores experimentales del NHV para las tres biomosas
```

```
NHV_real = [
```

```
    18.5; 16.8; 17.1; % Tipo 1
```

```
    19.2; 18.3; 18.8; % Tipo 2
```

```
    17.5; 16.9; 17.0; % Tipo 3
```

```
];
```

```
% Definir la ecuación no lineal a ajustar (ejemplo con términos cuadráticos)
```

```
modelo_nolineal = @(b, X) b(1) + b(2)*X(:,1) + b(3)*X(:,2) + b(4)*X(:,3) + b(5)*X(:,4) + ...  
    b(6)*X(:,1).^2 + b(7)*X(:,2).^2 + b(8)*X(:,3).^2 + b(9)*X(:,4).^2 + ...  
    b(10)*X(:,1).*X(:,2) + b(11)*X(:,3).*X(:,4);
```

```
% Valores iniciales de los coeficientes [a, b, c, d, e, f, g, h, i, j, k]
```

```
valores_iniciales = [1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1];
```

```
% Usar lsqcurvefit para ajustar el modelo no lineal
```

```
opts = optimset('Display','off');
```

```
[b_ajustados] = lsqcurvefit(modelo_nolineal, valores_iniciales, X, NHV_real, [], [], opts);
```

```
% Mostrar los coeficientes ajustados
```

```
disp('Coeficientes ajustados:');
```

```
disp(b_ajustados);
```

```
% Imprimir la ecuación ajustada
```

```
fprintf('La ecuación ajustada es:\n');
```

```
fprintf('NHV = %.4f + %.4f*H + %.4f*VM + %.4f*Ash + %.4f*FC + %.4f*H^2 +  
    %.4f*VM^2 + %.4f*Ash^2 + %.4f*FC^2 + %.4f*(H*VM) + %.4f*(Ash*FC)\n', ...
```

```
    b_ajustados(1), b_ajustados(2), b_ajustados(3), b_ajustados(4), b_ajustados(5), ...
```

```
    b_ajustados(6), b_ajustados(7), b_ajustados(8), b_ajustados(9), b_ajustados(10),
```

```
    b_ajustados(11));
```

```
% Calcular los valores predichos usando el modelo ajustado
```

```
NHV_pred = modelo_nolineal(b_ajustados, X);
```

```
% Comparar valores reales vs predichos
```

```
disp('Valores reales vs. predichos:');
```

```
disp([NHV_real, NHV_pred]);
```

```

% ---- Cálculo de los valores estadísticos por cada tipo de biomasa ----
% Definir los índices de cada tipo de biomasa
indices_tipo1 = 1:3;
indices_tipo2 = 4:6;
indices_tipo3 = 7:9;

tipos = {'Tipo 1', 'Tipo 2', 'Tipo 3'};
indices = {indices_tipo1, indices_tipo2, indices_tipo3};

for i = 1:3
    idx = indices{i};

    % Cálculo del Coeficiente de Regresión  $(R^2)$ 
    SStot = sum((NHV_real(idx) - mean(NHV_real(idx))).^2); % Suma total de cuadrados
    SSres = sum((NHV_real(idx) - NHV_pred(idx)).^2);      % Suma de cuadrados residuales
    R2 = 1 - (SSres / SStot);                            % Coeficiente de determinación  $(R^2)$ 

    % Cálculo del Error Absoluto Promedio (%)
    error_absoluto = abs(NHV_real(idx) - NHV_pred(idx)); % Errores absolutos
    error_absoluto_pct = (error_absoluto ./ abs(NHV_real(idx))) * 100; % Errores en porcentaje
    error_absoluto_promedio = mean(error_absoluto_pct);

    % Cálculo de la Desviación Estándar
    desviacion_estandar = std(NHV_real(idx) - NHV_pred(idx)); % Desviación estándar de los
    residuos

    % Imprimir los resultados para cada tipo de biomasa
    fprintf('\n--- Resultados para %s ---\n', tipos{i});
    fprintf('Coeficiente de regresión R²: %.4f\n', R2);
    fprintf('Promedio del error absoluto (%): %.4f\n', error_absoluto_promedio);
    fprintf('Desviación estándar: %.4f\n', desviacion_estandar);
end

```

end

% ---- Verificación del último valor predicho ----

fprintf('\n--- Verificación del último valor predicho ---\n');

fprintf('Valor real del último dato: %.4f\n', NHV_real(end));

fprintf('Valor predicho del último dato: %.4f\n', NHV_pred(end));

% ---- Gráficas para cada tipo de biomasa ----

% Graficar los resultados para el tipo 1 de biomasa

figure;

hold on;

plot(NHV_real(indices_tipo1), NHV_pred(indices_tipo1), 'bo', 'MarkerSize', 8,
 'MarkerFaceColor', 'b');

plot([min(NHV_real(indices_tipo1)), max(NHV_real(indices_tipo1))],
 [min(NHV_real(indices_tipo1)), max(NHV_real(indices_tipo1))], 'r-', 'LineWidth', 2);

xlabel('NHV Real');

ylabel('NHV Predicho');

title('Tipo 1 de Biomasa: NHV Real vs Predicho');

legend('Valores Predichos', 'Referencia (y=x)', 'Location', 'NorthWest');

grid on;

hold off;

% Graficar los resultados para el tipo 2 de biomasa

figure;

hold on;

plot(NHV_real(indices_tipo2), NHV_pred(indices_tipo2), 'bo', 'MarkerSize', 8,
 'MarkerFaceColor', 'b');

plot([min(NHV_real(indices_tipo2)), max(NHV_real(indices_tipo2))],
 [min(NHV_real(indices_tipo2)), max(NHV_real(indices_tipo2))], 'r-', 'LineWidth', 2);

xlabel('NHV Real');

ylabel('NHV Predicho');

```

title('Tipo 2 de Biomasa: NHV Real vs Predicho');
legend('Valores Predichos', 'Referencia (y=x)', 'Location', 'NorthWest');
grid on;
hold off;

% Graficar los resultados para el tipo 3 de biomasa
figure;
hold on;
plot(NHV_real(indices_tipo3), NHV_pred(indices_tipo3), 'bo', 'MarkerSize', 8,
     'MarkerFaceColor', 'b');
plot([min(NHV_real(indices_tipo3)), max(NHV_real(indices_tipo3))],
     [min(NHV_real(indices_tipo3)), max(NHV_real(indices_tipo3))], 'r-', 'LineWidth', 2);
xlabel('NHV Real');
ylabel('NHV Predicho');
title('Tipo 3 de Biomasa: NHV Real vs Predicho');
legend('Valores Predichos', 'Referencia (y=x)', 'Location', 'NorthWest');
grid on;
hold off;

```

resultados que se mando a realizar en el laboratorio de energías renovables- la molina



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
LABORATORIO DE ENERGÍAS RENOVABLES
Unidad de Biomasa Energética

REPORTE DE ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO – TGA (PROXIMAL)
LER – BIOMASA 005 - 2024

Solicitante : Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo
Atención : Sr. Carlos Carlos De la Cruz
RUC : 20105685875
Tipo de muestra : Residuos orgánicos
Fecha Recepción : 08/ 01/ 2024
Fecha Reporte : 24/ 01/ 2024
Norma : ASTM D7582

N. LABORATORIO	CÓDIGO DE CAMPO	BASE HÚMEDA			
		CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	MATERIA VOLÁTIL (%)	CENIZAS (%)	CARBONO FIJO (%)
UBE-(01/2024)-0004	Arroz	6.11	66.13	16.19	11.58
UBE-(01/2024)-0005	Bagazo	6.06	80.52	2.13	11.30
UBE-(01/2024)-0006	Café	6.05	80.19	2.34	11.43

NOTA:

- El análisis se realizó con la muestra en base húmeda (muestra tal como se recibió). El análisis se realizó con la muestra triturada.
- Se realizó el análisis por triplicado de cada muestra, obteniéndose resultados aproximados y se determinó la desviación estándar (medida de la dispersión de los valores respecto a la media) de la muestra.



José Calle Maraví, Ph. D.
Jefe del Laboratorio de
Energías Renovables





UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
LABORATORIO DE ENERGÍAS RENOVABLES
Unidad de Biomasa Energética

REPORTE DE ANÁLISIS ELEMENTAL (C, H, N, O, S)
LER – BIOMASA 006 - 2024

Solicitante : Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo
Atención : Sr. Carlos Carlos De la Cruz
RUC : 20105685875
Tipo de muestra : Residuos orgánicos
Fecha Recepción : 08/ 01/ 2024
Fecha Reporte : 24/ 01/ 2024
Norma : ASTM D5373

N. LABORATORIO	CÓDIGO DE CAMPO	C (%)	H (%)	N (%)	O (%)	S (%)
UBE-(01/2024)-0004	Arroz	44.52	6.28	0.41	---	---
UBE-(01/2024)-0005	Bagazo	49.78	7.34	0.30	---	---
UBE-(01/2024)-0006	Café	54.04	7.41	1.20	---	---

NOTA:

- El análisis se realizó con la muestra en base seca (la muestra fue secada en estufa a 105°C durante 24 horas).
- Se realizó el análisis por triplicado de cada muestra, obteniéndose resultados aproximados y se determinó la desviación estándar (medida de la dispersión de los valores respecto a la media) de la muestra.



Laboratorio de
Energías Renovables

José Calle Maraví, Ph. D.
Jefe del Laboratorio de
Energías Renovables





UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
LABORATORIO DE ENERGÍAS RENOVABLES
Unidad de Biomasa Energética

REPORTE DE ANÁLISIS ELEMENTAL (C, H, N, O, S)
LER – BIOMASA 022 - 2024

Solicitante : Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo
Atención : Dra. Ada Patricia Barturén Quispe
RUC : 20105685875
Tipo de muestra : Residuos orgánicos
Fecha Recepción : 08/ 04/ 2024
Fecha Reporte : 23/ 04/ 2024
Norma : ASTM D5373

N. LABORATORIO	CÓDIGO DE CAMPO	C (%)	H (%)	N (%)	O (%)	S (%)
UBE-(04/2024)-0041	Bagazo de caña	---	---	---	---	0.022
UBE-(04/2024)-0042	Cascarilla de Arroz	---	---	---	---	0.022
UBE-(04/2024)-0043	Cascarilla de Café	---	---	---	---	0.023

NOTA:

- El análisis se realizó con la muestra en base seca (la muestra fue secada en estufa a 105°C durante 24 horas).
- Se realizó el análisis por triplicado de cada muestra, obteniéndose resultados aproximados y se determinó la desviación estándar (medida de la dispersión de los valores respecto a la media) de la muestra.




José Calle Maraví, Ph. D.
Jefe del Laboratorio de
Energías Renovables





UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
LABORATORIO DE ENERGÍAS RENOVABLES
Unidad de Biomasa Energética

REPORTE DE ANÁLISIS DE CONTENIDO ENERGÉTICO
(CALORÍMETRO)
LER – BIOMASA 023 - 2024

Solicitante : Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo
Atención : Dra. Ada Patricia Barturén Quispe
RUC : 20105685875
Tipo de muestra : Residuos orgánicos
Fecha Recepción : 08/ 04/ 2024
Fecha Reporte : 23/ 04/ 2024
Norma: : ASTM D5865

N. LABORATORIO	CÓDIGO DE CAMPO	BASE SECA	BASE HÚMEDA
		PCS (kcal/kg)	PCI (kcal/kg)
UBE-(04/2024)-0041	Bagazo de caña	4253.68	---
UBE-(04/2024)-0042	Cascarilla de Arroz	3678.78	---
UBE-(04/2024)-0043	Cascarilla de Café	4421.05	---

NOTA:

- El análisis del PCS se realizó con la muestra en base seca (la muestra fue secada en estufa a 105°C durante 24 horas). El análisis se realizó con la muestra triturada.
- Se realizó el análisis por triplicado de cada muestra, obteniéndose resultados aproximados y se determinó la desviación estándar (medida de la dispersión de los valores respecto a la media) de la muestra.



José Calle Maravi, Ph. D.
Jefe del Laboratorio de
Energías Renovables

