

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y DE RECURSOS
NATURALES
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y DE RECURSOS
NATURALES



“BIOACEITE OBTENIDO DE LA CASCARILLA DE CAFÉ
MEDIANTE PIRÓLISIS ASISTIDA POR MICROONDAS,
CALLAO 2023”

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO AMBIENTAL Y DE RECURSOS NATURALES

AUTORES:

KAREN VICTORIA BRUNO GREY
JUVENAL'S ALEXANDER CARMONA MENDEZ

Two handwritten signatures in black ink. The first signature is for Karen Victoria Bruno Grey and the second is for Juvenal's Alexander Carmona Mendez.

ASESOR: MC.

RICHARD JOAO HUAPAYA PARDAVÉ

A handwritten signature in black ink for Richard Joao Huapaya Pardavé.

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: CIENCIAS DE LA TIERRA Y DEL AMBIENTE












Callao, 2023











PERÚ

Document Information

Analyzed document	TESIS_CARMONA MENDEZ-BRUNO GREY_BIOACEITE OBTENIDO DE LA CASCARILLA DE CAFE, MEDIANTE PIROLISIS ASISTIDA POR MICROONDAS, CALLAO 2023..pdf (D172859416)
Submitted	2023-08-16 09:57:00
Submitted by	
Submitter email	fiarn.investigacion@unac.edu.pe
Similarity	8%
Analysis address	unidad.de.investigacion.fiarn.unac@analysis.arkund.com

Sources included in the report

SA	Universidad Nacional del Callao / PÉREZ SÁNCHEZ-TORPOCO CANO-TESIS - EVALUACION DE LA CALIDAD DE BRIQUETAS COMO BIOCOMBUSTIBLE SOLIDO, ELABORADAS A PARTIR DEL RESIDUO CASCARILLA CAFE EN EL VALLE DEL MONZON.pdf Document PÉREZ SÁNCHEZ-TORPOCO CANO-TESIS - EVALUACION DE LA CALIDAD DE BRIQUETAS COMO BIOCOMBUSTIBLE SOLIDO, ELABORADAS A PARTIR DEL RESIDUO CASCARILLA CAFE EN EL VALLE DEL MONZON.pdf (D148236712) Submitted by: fiarn.investigacion@unac.edu.pe Receiver: unidad.de.investigacion.fiarn.unac@analysis.arkund.com		24
SA	katherineulpo.pdf Document katherineulpo.pdf (D129456597)		3
SA	CONVERSIÓN DE LA BIOMASA SÓLIDA MEDIANTE LA PIROLISIS_.pdf Document CONVERSIÓN DE LA BIOMASA SÓLIDA MEDIANTE LA PIROLISIS_.pdf (D92760344)		4
SA	PLAN DE TESIS-BISMAR HUACASI CHURQUIPA5.docx Document PLAN DE TESIS-BISMAR HUACASI CHURQUIPA5.docx (D45635275)		1
SA	TESIS-BACH. ANGELA CASTILLO HIJAR-2022.pdf Document TESIS-BACH. ANGELA CASTILLO HIJAR-2022.pdf (D143540836)		1
W	URL: https://www.elsevier.es/es-revista-educacion-quimica-78-articulo-quimica-verde-un-nuevo-enfoqu... Fetched: 2023-08-16 09:58:00		4
W	URL: https://core.ac.uk/download/pdf/225316322.pdf Fetched: 2020-06-21 21:51:10		2
W	URL: http://scielo.sld.cu/pdf/ind/v31n1/2224-5421-ind-31-01-31.pdf Fetched: 2023-08-16 09:59:00		2
W	URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1385894717301250 Fetched: 2023-08-16 09:58:00		3
W	URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0255270123000302#bib0010 Fetched: 2023-08-16 09:58:00		4
W	URL: https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/52871/1128275757.2015.pdf?sequence=1&isA... Fetched: 2022-05-04 00:49:07		1

W	URL: https://books.google.com.bo/books?id=29VL_OlqInoC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summ... Fetched: 2023-08-16 09:58:00		1
W	URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652623015986 . Fetched: 2023-08-16 09:58:00		1
W	URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165237006000908 Fetched: 2023-08-16 09:58:00		1
SA	TESIS_ Samaniego Wilson.pdf Document TESIS_ Samaniego Wilson.pdf (D172723036)		1
W	URL: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-04552020000100093&lng=en&nrm=... Fetched: 2023-08-16 09:58:00		2
W	URL: https://infocarbono.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2023/05/Informe-RAGEI-Agricultura-2019_vf.pdf . Fetched: 2023-08-16 09:58:00		1
W	URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236122016222 . Fetched: 2023-08-16 09:58:00		1
W	URL: https://repositorio.unas.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14292/1468/SRE_2018.pdf?sequence=1&isA... Fetched: 2023-08-16 09:59:00		1
W	URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2589014X23001019 . Fetched: 2023-08-16 09:59:00		1
W	URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844023020212#bib11 . Fetched: 2023-08-16 09:59:00		1

Entire Document

100%	MATCHING BLOCK 1/60	SA	PÉREZ SÁNCHEZ-TORPOCO CANO-TESIS - EVALUACION ... (D148236712)
UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y DE RECURSOS NATURALES ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y DE RECURSOS NATURALES "			
BIOACEITE OBTENIDO DE LA CASCARILLA DE CAFÉ MEDIANTE PIRÓLISIS ASISTIDA POR MICROONDAS, CALLAO 2023"			
100%	MATCHING BLOCK 2/60	SA	PÉREZ SÁNCHEZ-TORPOCO CANO-TESIS - EVALUACION ... (D148236712)
TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO AMBIENTAL Y DE RECURSOS NATURALES AUTORES:			
KAREN VICTORIA BRUNO GREY JUVENAL'S ALEXANDER CARMONA MENDEZ ASESOR: MC. RICHARD JOAO HUAPAYA PARDAVÉ LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: CIENCIAS DE LA TIERRA Y DEL AMBIENTE			
		SA	PÉREZ SÁNCHEZ-TORPOCO CANO-TESIS - EVALUACION ... (D148236712)
MATCHING BLOCK 3/60			
Callao, 2023 PERÚ INFORMACIÓN BÁSICA FACULTAD: INGENIERÍA AMBIENTAL Y DE RECURSOS NATURALES UNIDAD DE INVESTIGACIÓN: DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y DE RECURSOS NATURALES TÍTULO: "			
BIOACEITE OBTENIDO DE LA CASCARILLA DE CAFÉ MEDIANTE PIRÓLISIS ASISTIDA POR MICROONDAS, CALLAO, 2023" AUTOR(ES): KAREN VICTORIA BRUNO GREY CÓDIGO ORCID: 0009-0009-9132-5663 DNI: 71457932 JUVENAL'S ALEXANDER CARMONA MENDEZ CÓDIGO ORCID: 0009-0009-5843-0744			



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO
FACULTAD DE INGENIERIA AMBIENTAL Y DE RECURSOS NATURALES
(Resolución N° 019-2021-CU del 20 de enero de 2021)



V CICLO TALLER DE TESIS

ANEXO 3

ACTA N° 006-2023 DE SUSTENTACIÓN DE TESIS CON CICLO DE TESIS PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO AMBIENTAL Y DE RECURSOS NATURALES.

LIBRO 01 FOLIO No. 85 ACTA N°006-2023 DE SUSTENTACIÓN DE TESIS CON CICLO DE TESIS PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO AMBIENTAL Y DE RECURSOS NATURALES.

A los 19 días del mes de agosto del año 2023, siendo las 12:10 horas, se reunieron, en la sala meet: <https://meet.google.com/zch-bnpr-wqt>, el JURADO DE SUSTENTACION DE TESIS para la obtención del TÍTULO Profesional de Ingeniero Ambiental y de Recursos Naturales de la Facultad de Ingeniería Ambiental y de Recursos Naturales, conformado por los siguientes docentes ordinarios de la Universidad Nacional del Callao:

Ms.C.	María Teresa Valderrama Rojas	: Presidente
Dr.	Miguel Ángel De La Cruz Cruz	: Secretario
Mtra.	Janet Mamani Ramos	: Vocal
Dr.	Jorge Quintanilla Alarcón	: Suplente
Mg.	Richard Joao Huapaya Pardavé	: Asesor

Se dio inicio al acto de sustentación de la tesis de los Bachilleres Karen Victoria Bruno Grey y Juvenal's Alexander Carmona Mendez, quienes habiendo cumplido con los requisitos para optar el Título Profesional de Ingeniero Ambiental y de Recursos Naturales, sustentan la tesis titulada: "BIOACEITE OBTENIDO DE LA CASCARILLA DE CAFÉ MEDIANTE PIRÓLISIS ASISTIDA POR MICROONDAS, CALLAO 2023", cumpliendo con la sustentación en acto público, de manera no presencial a través de la Plataforma Virtual, en cumplimiento de la declaración de emergencia adoptada por el Poder Ejecutivo para afrontar la pandemia del Covid19, a través del D.S. N° 044-2020-PCM y lo dispuesto en el DU N° 026-2020 y en concordancia con la Resolución del Consejo Directivo N°039-2020-SUNEDU-CD y la Resolución Viceministerial N° 085-2020-MINEDU, que aprueba las "Orientaciones para la continuidad del servicio educativo superior universitario";

Con el quórum reglamentario de ley, se dio inicio a la sustentación de conformidad con lo establecido por el Reglamento de Grados y Títulos vigente. Luego de la exposición, y la absolución de las preguntas formuladas por el Jurado y efectuadas las deliberaciones pertinentes, acordó: Dar por Aprobado con la escala de calificación cualitativa Muy bueno y calificación cuantitativa DIECISEIS (16) la presente Tesis, conforme a lo dispuesto en el Art. 27 del Reglamento de Grados y Títulos de la UNAC, aprobado por Resolución de Consejo Universitario N° 099-2021-CU del 30 de junio de 2021.

Se dio por cerrada la Sesión a las 13:00 horas del día sábado 19 de agosto del año en curso.

Presidente

Secretario

Vocal

Asesor

INFORMACIÓN BÁSICA

FACULTAD:

INGENIERÍA AMBIENTAL Y DE RECURSOS NATURALES

UNIDAD DE INVESTIGACIÓN:

DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y DE RECURSOS NATURALES

TÍTULO:

“BIOACEITE OBTENIDO DE LA CASCARILLA DE CAFÉ MEDIANTE PIRÓLISIS ASISTIDA POR MICROONDAS, CALLAO, 2023”

AUTOR(ES):

KAREN VICTORIA BRUNO GREY

CÓDIGO ORCID: 0009-0009-9132-5663

DNI: 71457932

JUVENAL'S ALEXANDER CARMONA MENDEZ

CÓDIGO ORCID: 0009-0009-5843-0744

DNI: 76455562

ASESOR:

MC. RICHARD JOAO HUAPAYA PARDAVÉ

CÓDIGO ORCID: 0000-0002-4997-2041

DNI: 44127158

LUGAR DE EJECUCIÓN:

LABORATORIOS DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y DE RECURSOS NATURALES

UNIDADES DE ANÁLISIS:

BIOCOMBUSTIBLE LÍQUIDO

TIPO / ENFOQUE / DISEÑO DE INVESTIGACIÓN:

APLICADA / CUANTITATIVO / EXPERIMENTAL

TEMA OCDE: 2.09.03 – BIOCOMBUSTIBLES

DEDICATORIA

A Dios, por guiarme en cada paso que doy.

A mis padres, por su amor, apoyo incondicional y sacrificio, para alcanzar cada logro en mi trayectoria académica.

A mis hermanos, por su comprensión, alegría y los momentos compartidos.

A mis familiares y amigos, quienes me brindaron soporte con palabras de aliento.

Juvenal's Alexander Carmona Mendez

A Dios, quien es guía de mis pasos. A mis padres, por ser fuente de mi inspiración y por siempre creer en mí. A mis amigos, por el apoyo mutuo a lo largo de estos años. A mi amor, cuya paciencia y aliento constante han sido el impulso que necesitaba para alcanzar este logro.

Este logro no solo es mío, sino de todos ustedes. Gracias por formar parte de mi vida y por contribuir de manera significativa a este capítulo académico.

Karen Victoria Bruno Grey

AGRADECIMIENTO

A los profesores de la Facultad de Ingeniería Ambiental y de Recursos Naturales por compartirnos sus conocimientos y experiencias durante nuestra formación profesional.

A nuestros familiares y amigos, quienes constituyen un pilar fundamental, siendo nuestro soporte emocional para la culminación de la presente investigación.

Con especial reconocimiento a nuestro asesor, Richard Joao Huapaya Pardavé, cuya orientación y consejos fue fundamental en el desarrollo de esta investigación.

Nuestro agradecimiento sincero a quienes, de diversas formas, han contribuido significativamente a nuestro desarrollo y éxito académico.

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE CONTENIDO	7
ÍNDICE DE TABLAS	10
ÍNDICE DE FIGURAS.....	11
ÍNDICE DE ABREVIATURAS	12
RESUMEN.....	13
ABSTRACT	14
INTRODUCCIÓN.....	12
I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	14
1.1. Descripción de la realidad problemática.....	14
1.2. Formulación del problema.....	17
1.2.1. Problema general.....	17
1.2.2. Problemas específicos	18
1.3. Objetivos.....	18
1.3.1. Objetivo general	18
1.3.2. Objetivos específicos	18
1.4. Justificación	18
1.5. Delimitantes de la investigación	23
1.5.1. Teórica	23
1.5.2. Temporal	23
1.5.3. Espacial	24
II. MARCO TEÓRICO.....	25
2.1. Antecedentes del estudio.....	25
2.1.1. A nivel internacional	25
2.1.2. A nivel nacional	30

2.2.	Bases Teóricas	32
1.6.	Marco Conceptual.....	41
1.7.	Términos Básicos	51
III.	HIPÓTESIS Y VARIABLES	52
3.1.	Hipótesis	52
3.1.1.	Operacionalización de variables.....	53
IV.	METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....	55
4.1.	Diseño metodológico	55
4.2.	Método de investigación	56
4.2.1.	Materiales, Insumos y Equipos.....	56
4.2.2.	Procedimiento	57
4.3.	Población y muestra	63
4.3.1.	Población	63
4.3.2.	Muestra	64
4.4.	Lugar de estudio y periodo de desarrollo	65
4.5.	Técnicas e instrumentos para la recolección de la información.....	65
4.5.1.	<i>Técnica</i>	65
4.5.2.	Instrumentos de recolección de información.....	66
4.6.	Análisis y procesamiento de datos	67
4.7.	Aspectos éticos de la investigación.....	68
V.	RESULTADOS.....	69
5.1.	Resultados descriptivos	69
5.1.1.	Caracterización de la cascarilla de café	69
5.1.2.	Comportamiento de la temperatura de pirolisis	75
5.1.3.	Caracterización de las propiedades fisicoquímicas del bioaceite de cascarilla con mejor rendimiento.....	78

5.1.4. Caracterización de las propiedades energéticas del bioaceite de cascarilla con mejor rendimiento.....	81
5.2. Resultados Inferenciales.....	82
VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	85
6.1. Contratación y demostración de la hipótesis con los resultados.....	85
6.1.1. Contrastación de la hipótesis general.....	85
6.1.2. Contrastación con la hipótesis específica 1	85
6.1.3. Contrastación con la hipótesis específica 2	86
6.1.4. Contrastación con la hipótesis específica 3	86
6.1.5. Contrastación con la hipótesis específica 4	87
6.2. Contrastación de los resultados con otros estudios similares	88
6.3. Responsabilidad ética de acuerdo a los reglamentos vigentes	89
VII. CONCLUSIONES.....	91
VIII. RECOMENDACIONES	92
IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	94
ANEXOS	108

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Matriz de Operacionalización de Variables	53
Tabla 2 Experimentos pirolíticos	56
Tabla 3 Técnica e Instrumento de recolección de datos	66
Tabla 4 Análisis Elemental, Proximal y Contenido Energético	70
Tabla 5 Prueba ANOVA de un solo factor para el rendimiento	78
Tabla 6 Propiedades energéticas del bioaceite con mejor rendimiento	81
Tabla 7 Rendimientos del bioaceite	82
Tabla 8 Prueba de Normalidad y homogeneidad de varianza	83
Tabla 9 Prueba ANOVA de un solo factor para el rendimiento	83
Tabla 10 Prueba ANOVA de un solo factor para el rendimiento	84
Tabla 11 Caracterización de la CC y su comparación con valores de la literatura.	88

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Diseño experimental	55
Figura 2 Procedimiento de la Investigación	57
Figura 3 Diseño del reactor de pirólisis	58
Figura 4 Sistema de condensación	61
Figura 5 Ubicación de la Empresa Aromas del Monzón S.A.C	64
Figura 6 Ubicación del Lugar de estudio – Universidad Nacional del Callao	65
Figura 7 Procedimiento estadístico inferencial	68
Figura 8 Gráficas de los parámetros del análisis elemental de CC	71
Figura 9 Gráficas de los parámetros del análisis proximal de CC	73
Figura 10 Poder Calorífico Superior expresado en MJ/kg ³	74
Figura 11 Gráficas de temperatura vs tiempo en cada reacción	75
Figura 12 Gráficas de los parámetros del análisis elemental del bioaceite (Fase acuosa)	79
Figura 13 Gráficas de los parámetros del análisis elemental del bioaceite (Fase acuosa)	81

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

AC: Carbón Activado

ANOVA: Análisis de la Varianza (por sus siglas en inglés)

ASTM: Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (por sus siglas en inglés)

CC: Cascarilla de café

CNS: Cáscara de Nuez de Marañón

fMAP: Pirólisis Rápida Asistida por Microondas

FTIR: Método Infrarrojo por transformada de Fourier

GC-MS: Cromatógrafo de Gases-Espectrómetro de Masas

GEI: Gases de Efecto Invernadero

HHV: Poder Calorífico Superior

IEA: International Energy Agency

LRC: Carbón de Bajo Rango

MAP: Pirólisis Asistida por Microondas (por sus siglas en inglés)

MLPY: Millones de Litros por Año

OFAT: Diseño de un solo Factor a la vez

ONU: Organización de las Naciones Unidas

OPS: Cáscara de Palma Aceitera

PCS: Poder Calorífico Superior

SEM: Microscopio Electrónico de Barrido

SiC: Carburo de Silicio

TGA: Análisis Termogravimétrico

TWh: Teravatio-Hora

RESUMEN

En el contexto de la creciente preocupación por la inadecuada gestión de los residuos agroindustriales, esta investigación se enfoca en la valorización de la cascarilla de café como una fuente potencial para la generación de bioenergía. El objetivo principal de la investigación fue desarrollar la obtención de bioaceite a partir de la cascarilla de café mediante pirólisis asistida por microondas. Para lograr dicho objetivo, se aplicó un enfoque metodológico basado en una investigación de tipo aplicada, con un enfoque cuantitativo, de nivel explicativo, diseño experimental y de corte transversal. Se consideró como población las 4 toneladas métricas de residuos de cascarilla de café generadas anualmente por la empresa Aromas del Monzón S.A.C, y para la muestra se consideró los 0.7425 kg de cascarilla de café necesarios para llevar a cabo la parte experimental.

Los resultados principales revelaron que los parámetros de la caracterización de la cascarilla de café se encontraron dentro de los rangos establecidos en estudios previos, y que los parámetros de caracterización del bioaceite con mejor rendimiento cumplen con los rangos establecidos para bioaceites convencionales. En conclusión, mediante el empleo de la pirolisis asistida por microondas en la cascarilla de café, se obtuvo un rendimiento máximo de bioaceite del 18.3%, a una temperatura de pirólisis de 700°C y utilizando carburo de silicio como absorbente al 20%. Estos resultados demuestran que la valorización de la cascarilla de café mediante esta técnica puede representar una alternativa viable para aprovechar este residuo y obtener un biocombustible.

ABSTRACT

In the context of the growing concern for the inadequate management of agroindustrial wastes, this research focuses on the valorization of coffee husks as a potential source for the generation of bioenergy. The main objective of the research was to develop the production of bio-oil from coffee husks by means of microwave-assisted pyrolysis. To achieve this objective, a methodological approach was applied based on an applied type of research, with a quantitative approach, explanatory level, experimental design and transversal cut. The population was considered to be the 4 metric tons of coffee husk waste generated annually by the company Aromas del Monzon S.A.C., and the sample was considered to be the 0.7425 kg of coffee husk necessary to carry out the experimental part.

The main results revealed that the coffee husk characterization parameters were found to be within the ranges established in previous studies, and that the characterization parameters of the bio-oil with the best yield comply with the ranges established for conventional bio-oils. In conclusion, through the use of microwave-assisted pyrolysis of coffee husks, a maximum bio-oil yield of 18.3% was obtained at a pyrolysis temperature of 700°C and using 20% silicon carbide as absorbent. These results demonstrate that the valorization of coffee husks by this technique can represent a viable alternative for using this waste to obtain a biofuel.

INTRODUCCIÓN

La creciente preocupación por el agotamiento de los recursos naturales y la necesidad de encontrar alternativas sostenibles han impulsado la investigación en el campo de la valorización de residuos agrícolas. Uno de estos residuos abundantes y prometedores es la cascarilla de café, que se genera en grandes cantidades como subproducto durante el procesamiento del café. No obstante, a pesar de su amplia disponibilidad, en la actualidad su disposición se realiza de manera inadecuada, ya que en muchos casos se quema al aire libre o se vierte a los ríos cercanos, generando problemas ambientales como la contaminación del suelo y del agua, así como la emisión de gases de efecto invernadero (Fernández-Cortés et al., 2020).

La valorización de la cascarilla de café se ha convertido en un tema de investigación crucial, ya que brinda una oportunidad para obtener productos de alto valor, como los biocombustibles. En este contexto, la pirólisis asistida por microondas ha surgido como una técnica prometedora para convertir la cascarilla de café en bioaceite, un producto con diversas aplicaciones industriales (Setter et al., 2020). Desde un punto de vista científico, este estudio puede generar nuevos conocimientos en el campo de la energía renovable y la sostenibilidad ambiental. También puede resultar útil para identificar nuevas formas de producción de biocombustibles líquidos a partir de residuos agrícolas y contribuir al desarrollo de tecnologías más eficientes y sostenibles. Además, tiene un valor económico en el mercado de los biocombustibles, lo que contribuye al desarrollo económico local. En términos sociales, la implementación de esta técnica podría generar nuevas oportunidades de empleo en la cadena de producción y promover una cultura de gestión sostenible de los residuos al aprovechar eficientemente un recurso natural. Por lo tanto, el objetivo de esta investigación es obtener bioaceite de cascarilla de café mediante la pirólisis asistida por microondas.

El propósito de elegir este tema de investigación radica en la falta de métodos eficientes y selectivos para obtener bioaceite a partir de la cascarilla de café. La pirólisis asistida por microondas surge como una técnica prometedora para

superar estas limitaciones, ofreciendo ventajas significativas en términos de eficiencia y rapidez en comparación con otros métodos de obtención de bioaceite, aumentando su valor comercial. Sin embargo, su aplicación específica en este contexto aún no ha sido suficientemente investigada (Rivera Bautista, 2019). Se prevé que el procedimiento de conversión empleado en esta investigación servirá como punto de partida para investigaciones futuras que busquen desarrollar la obtención de bioaceite a partir de cascarilla de café.

De acuerdo con lo expuesto anteriormente, el trabajo de investigación se organiza de la siguiente manera: en el capítulo I se describe la realidad problemática y se formulan el problema general y los problemas específicos. También se presentan el objetivo general y los objetivos específicos, se justifica la importancia del estudio y se discuten las delimitantes de la investigación. El capítulo II aborda los antecedentes internacionales y nacionales, las bases teóricas y el marco conceptual relacionados con el problema de investigación, además de definir los términos básicos. El capítulo III presenta la hipótesis general y las hipótesis específicas, así como la matriz de operacionalización de las variables. En el capítulo IV se detalla la metodología utilizada, incluyendo la recolección de información y el procesamiento de datos. En el capítulo V se exponen los resultados obtenidos, los cuales se sometieron a un riguroso análisis estadístico. El capítulo VI se lleva a cabo la discusión de los resultados obtenidos para contrastar y demostrar la hipótesis planteada. En el capítulo VII se presentan las conclusiones de la investigación. Finalmente, en el capítulo VIII se hacen las recomendaciones para investigaciones futuras.

I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción de la realidad problemática

La creciente preocupación por el cambio climático y la dependencia de los combustibles fósiles ha impulsado la búsqueda de alternativas más sostenibles y renovables. Una de estas alternativas es la biomasa lignocelulósica, un recurso ampliamente disponible y renovable que se puede utilizar como materia prima para producir biocombustibles líquidos como el bioaceite. La cascarilla de café es un residuo agroindustrial que se genera en grandes cantidades en la producción de café a nivel mundial y local, está compuesta principalmente de celulosa, hemicelulosa y lignina lo que ha demostrado ser una fuente prometedora de biomasa lignocelulósica con mayores posibilidades de aprovechamiento para la obtención de productos de alto valor agregado, como los biocombustibles, siendo esta una línea de investigación en constante desarrollo (Yafetto, Odamtten y Wiafe-Kwagyan, 2023).

Conforme la población mundial continúa expandiéndose y la demanda de producción agrícola aumenta, se observa un incremento en la generación de residuos agrícolas. En el caso de China, un país de gran relevancia en el ámbito agrícola, se estima que la cantidad anual de agro-residuos alcanza aproximadamente 0,9 billones de toneladas (Yu et al., 2023). En Estados Unidos la cantidad anual generada es de 150 millones de toneladas. India, genera una cantidad anual aproximada de 605 millones de toneladas (Zhao et al., 2022). La simple disposición inadecuada o la quema de estos agro-residuos puede tener un impacto negativo en el medio ambiente, afectando la calidad del suelo y de las fuentes de agua. De acuerdo con la Agencia de Protección Ambiental (EPA), al quemar 1 tonelada de residuos agrícolas en el campo, se liberan aproximadamente 1400 kg de CO₂, 58 kg de CO, 11 kg de material particulado, 4,9 kg de NO_x y 1,2 kg de SO₂ a la atmósfera. Estos contaminantes emitidos durante la combustión contribuyen al calentamiento global, la formación de smog y la afectación de la visibilidad (Bhuvaneshwari, Hettiarachchi y Meegoda, 2019).

Este crecimiento demográfico además ha incrementado la demanda de energía, principalmente proveniente de fuentes fósiles (Pérez Romero et al., 2022). A partir de 2019, aproximadamente el 84,3% de la energía global se obtuvo de combustibles fósiles, como el petróleo, carbón y gas contribuyendo con el 33,1%, 27% y 24,3%, respectivamente, mientras que el 11,3% provino de fuentes de energía renovable como los residuos agrícolas (Awogbemi y Kallon, 2023). Es por ello que, en Europa, Estados Unidos y otros países se está promoviendo el uso de biocombustibles obtenidos a partir de residuos agrícolas. En particular, se espera que para el 2027 aproximadamente un tercio de la producción de nuevos combustibles provengan de desechos y residuos agrícolas (International Energy Agency (IEA), 2022). Ante esta situación, es fundamental promover la valorización de estos residuos que pueden contribuir a la generación de energías renovables como los biocombustibles y presentarse como una alternativa a la escasez de recursos fósiles (Yafetto, Odamtten y Wiafe-Kwagyan, 2023; Allende, Brodie y Jacob, 2023).

La relación entre el crecimiento económico y las emisiones de CO₂ en Perú muestra que un aumento del 1% en el crecimiento económico se traduce en un aumento del 0.59% en las emisiones de CO₂. Por otro lado, un aumento del 1% en el uso de energías renovables resulta en una reducción del 0.52% en las emisiones de CO₂ a largo plazo. Además, la expansión del suelo agrícola en un 1% se asocia con un aumento del 1.58% en las emisiones de CO₂ a largo plazo. Estos hallazgos revelan que el crecimiento económico y la expansión de la tierra agrícola contribuyen al aumento de las emisiones de CO₂, mientras que el uso de energías renovables tiene un impacto positivo en la calidad ambiental al reducir las emisiones (Raihan y Tuspekova, 2022).

A nivel nacional, durante el año 2019, el cultivo de café pergamino ocupó el primer lugar en términos de área destinadas a la agricultura, abarcando aproximadamente un 13.89% del total de áreas cultivadas del país, lo que representa una superficie de 438,177.10 hectáreas (Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego, 2023). El Perú se ha convertido en uno de los principales productores y exportadores mundiales de café orgánico. Las principales regiones

productores son Amazonas, Ayacucho, Cajamarca, Cusco, Huánuco, Junín, Pasco, Piura, Puno y San Martín.

En los últimos años, el sector agrícola peruano ha experimentado un crecimiento del 60%, siendo el café su producto más exportado. Sin embargo, la industria del café al producir grandes cantidades de pulpa, mucílagos, cascarilla y la piel plateada de la cosecha de diversos productos agrícolas, incluyendo el café, se ha convertido en un problema ambiental en el país. Los residuos de la cosecha del café, se vierten en el campo, se utilizan como compost o se queman al aire libre sin un aprovechamiento energético. Esto provoca emisiones de gases de efecto invernadero y problemas ambientales (Emma, Alangar y Yadav, 2022). Por lo tanto, es importante desarrollar y promover estrategias para el uso de biocombustibles en el país, como el bioaceite producido a partir de residuos agrícolas.

El valle del Monzón es una zona dedicada al cultivo de café, que en la actualidad enfrenta a una realidad problemática relacionada a la producción de café y la gestión inadecuada de sus residuos. Un aspecto crítico es la falta de uso industrial de la cascarilla de café, lo que lleva a su disposición inapropiada en vertederos o a su quema, generando efectos negativos en la calidad del suelo, la salud de las personas y la emisión de gases de efecto invernadero.

El Valle del Monzón fue caracterizado históricamente como una zona de producción de la hoja de coca, convirtiéndose en el principal centro de producción de esta planta (Grillo Ramos, 2019; Solsol Ramirez, 2018). A partir del año 2013 se han realizado esfuerzos para reemplazar algunas plantaciones de coca por sistemas agroforestales, las áreas abandonadas, conocidas como "ex cicales", presentan suelos degradados y contribuyen a la degradación del suelo en la región de ceja de selva y selva alta (Solsol Ramirez, 2018). Las condiciones climáticas y topográficas, como la alta pluviosidad y la pendiente excesiva, facilitan la erosión del suelo. Además, los residuos de los biocidas utilizados en grandes cantidades terminaron en los cursos de agua, afectando a las cadenas tróficas y generando desequilibrios de los ecosistemas. La actividad cocalera no solo disminuyó la capacidad productiva del suelo, sino que también

tuvó consecuencias graves, como la pérdida de servicios ambientales como el suministro de agua, alimentos y madera, así como sequías prolongadas y la desertificación de las áreas intervenidas (Panaifo-Gómez, Ñique-Álvarez y Levano-Crisóstomo, 2021).

En los últimos años, el valle del Monzón ha experimentado una transición de la producción de coca a la producción de café. Sin embargo, este cambio tuvo un impacto negativo en el conocimiento y experiencia de los productores, ya que requiere tiempo para adaptarse y especializarse en un nuevo cultivo (Ayllón Pariona y Loayza Inga, 2020). A pesar de los desafíos, la producción de café y cacao se ha convertido en una de las principales actividades económicas en el valle del Monzón, aprovechando las condiciones agroecológicas favorables de la región (Rubio Gabriel, 2016).

El cultivo del café tiene un impacto ambiental significativo debido al consumo de agua para el riego y la contaminación del proceso de despulpado. En comparación con otros cultivos como el trigo, maíz, soja, caña de azúcar y algodón, el café tiene una huella ecológica mayor en términos de cantidad de agua gastada y contaminada por la cantidad producida. La huella hídrica verde del café se debe al alto consumo de agua de las precipitaciones y la huella hídrica gris debido a la alta contaminación del agua (Espinoza Durand, 2022).

Frente a esta problemática nace la necesidad de proponer la técnica de pirólisis asistida por microondas, que es un proceso de conversión termoquímica que permite transformar la biomasa en biocombustibles (Amalina et al., 2023), para obtener bioaceite a partir de cascarilla de café. Esta técnica ha sido ampliamente estudiada y se destaca por su eficiencia, lo cual puede resultar en un mayor rendimiento y calidad de los subproductos (Allende, Brodie y Jacob, 2023).

1.2. Formulación del problema

1.2.1. Problema general

¿Es posible desarrollar la obtención de bioaceite de cascarilla de café mediante la pirólisis asistida por microondas?

1.2.2. Problemas específicos

P1: ¿Es posible caracterizar la cascarilla de café en base a su análisis elemental, proximal y contenido energético?

P2: ¿Es posible determinar las condiciones del proceso de pirólisis asistida por microondas que mejoran el rendimiento del bioaceite de cascarilla de café?

P3: ¿Es posible caracterizar las propiedades fisicoquímicas del bioaceite de cascarilla de café con mejor rendimiento?

P4: ¿Es posible caracterizar las propiedades energéticas del bioaceite de cascarilla de café con mejor rendimiento?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Desarrollar la obtención de bioaceite a partir de la cascarilla de café mediante pirólisis asistida por microondas.

1.3.2. Objetivos específicos

O1: Caracterizar la cascarilla de café en base a su análisis elemental, proximal y contenido energético.

O2: Determinar las condiciones del proceso de pirólisis asistida por microondas que mejoran el rendimiento del bioaceite de cascarilla de café.

O3: Caracterizar las propiedades fisicoquímicas del bioaceite de cascarilla de café con mejor rendimiento.

O4: Caracterizar las propiedades energéticas del bioaceite de cascarilla de café con mejor rendimiento.

1.4. Justificación

Justificación ambiental

La pirólisis asistida por microondas es una alternativa sostenible para la producción de bioenergía utilizando recursos naturales renovables. El uso de biomasa como materia prima permite su aprovechamiento y valorización, lo cual

ayuda a reducir la cantidad de residuos sólidos que se incineran o disponen de manera inadecuada. Esta técnica, además de mejorar la eficiencia energética del proceso, también reduce significativamente las emisiones de gases de efecto invernadero, mejorando la calidad del aire y colaborando con la mitigación del cambio climático.

Justificación Normativa - Legal

La producción de biocombustibles líquidos a partir de residuos orgánicos y la utilización de tecnologías limpias y sostenibles en el Perú, están respaldados por diversas normas y leyes nacionales e internacionales que promueven la protección del medio ambiente y la reducción de emisiones contaminantes.

La Constitución Política del Perú reconoce el derecho de toda persona a un ambiente saludable y equilibrado y establece la obligación del Estado de garantizar la conservación de la biodiversidad y el uso sostenible de los recursos naturales. La Ley General del Ambiente establece que toda actividad que tenga un impacto ambiental debe contar con una evaluación ambiental, y la Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos establece la promoción de la valorización de los residuos sólidos como uno de los principales objetivos de la gestión integral de los residuos sólidos en el territorio peruano, para ello, se fomenta la implementación de procesos de tratamiento y transformación de los residuos sólidos en materiales útiles y productos energéticos, como biocombustibles líquidos. El Reglamento de la Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos establece medidas específicas para fomentar la valorización de residuos sólidos y la promoción de uso de biocombustibles líquidos como una alternativa energética sostenible y viable. La Ley de Promoción del Mercado de Biocombustibles promueve la producción, comercialización y uso de biocombustibles, lo que puede generar un mercado para el bioaceite producido a partir de la cascarilla de café. Además de ello, fomenta el uso de las tecnologías limpias, así como la investigación y el desarrollo tecnológico en el sector de los biocombustibles, lo que puede contribuir al desarrollo de técnicas de pirólisis asistida por microondas para obtener bioaceite de la cascarilla de café.

Justificación teórica

Es crucial destacar la relevancia de los planteamientos en la investigación de Zhang et al., (2022) en relación con la problemática actual que enfrentamos. Su contribución con la variable pirólisis asistida por microondas, es de suma importancia para nuestra investigación porque explora la posibilidad de utilizar esta técnica para producir biocombustible a partir de un residuo orgánico, lo que podría reducir la dependencia de los combustibles fósiles. Esta dependencia es una de las principales preocupaciones en el mundo debido a su impacto negativo en el medio ambiente y el cambio climático, siendo la industria de la aviación uno de los mayores consumidores de combustibles fósiles. Además, la pirólisis por microondas es un proceso eficiente y rápido que podría utilizarse para producir grandes cantidades de biocombustible.

Asimismo, lo planteado por Zhang et al., (2017) contribuye con la variable bioaceite, la cual es determinante para nuestra investigación porque describe una técnica innovadora para convertir biomasa en bioaceite utilizando la pirólisis asistida por microondas. El bioaceite producido mediante este proceso puede ser utilizado como un combustible renovable alternativo a los combustibles fósiles, reduciendo así la dependencia de los mismos y disminuyendo las emisiones de gases de efecto invernadero, siendo una elección más sostenible y amigable con el medio ambiente. Además, la técnica aplicada en la investigación puede ser utilizada para valorizar residuos sólidos y reducir la cantidad de residuos que se envían a vertederos.

Justificación metodológica

La presente investigación se enfoca en el uso de la técnica de pirólisis asistida por microondas, un proceso de descomposición térmica de la cascarilla de café para la obtención de bioaceite, con el propósito de valorizar estos residuos y obtener otras alternativas de energías renovables.

El cuarto capítulo de este documento describe el enfoque cuantitativo, que se centra en el procedimiento e instrumentos utilizados para obtener información. Este enfoque se basa en el manejo de datos medibles, cuantificables y verificables relacionados con nuestras variables de estudio. Para ello, se

empleará una ficha de recolección de datos que permitirá recopilar y analizar tanto las propiedades físicas y energéticas del bioaceite obtenido, como el análisis proximal y elemental de la muestra de cascarilla de café. La utilización de una ficha de recolección de datos estructurada y estandarizada garantizará la validez, confiabilidad y comparabilidad de los resultados obtenidos con investigaciones anteriores, facilitando la replicación precisa del estudio con futuras investigaciones que utilicen métodos similares, promoviendo el avance del conocimiento en el campo de la pirólisis asistida por microondas de biomasa lignocelulósica. Además, el uso de esta herramienta promoverá la eficiencia y la objetividad en la recopilación de datos, optimizando los recursos y minimizando el sesgo subjetivo en la investigación.

Justificación práctica

La obtención de bioaceite de cascarilla de café mediante pirólisis asistida por microondas es una forma de aprovechar y valorizar los residuos de cascarilla de café, promoviendo la economía circular al transformar un residuo en un producto útil.

Una de las principales ventajas que tiene esta técnica es su fácil implementación en pequeñas escalas, lo cual facilita su replicación en otros lugares. Para ello, se debe evaluar los diferentes tipos de materia prima, los parámetros controlados para el proceso de pirólisis asistida por microondas y la evaluación del bioaceite obtenido.

Justificación económica

La pirólisis asistida por microondas permite reducir costos y aumentar la eficiencia en relación a la pirólisis convencional para producir bioaceite. Al valorizar los residuos agrícolas y forestales permite que los agricultores puedan obtener ingresos adicionales. Por otro lado, para evaluar la implementación de la pirólisis asistida por microondas para obtener bioaceite a nivel industrial y determinar si es rentable, es necesario realizar un análisis económico completo, en el cual se deben tomar en cuenta los costos de inversión, los costos operativos, los ingresos generados por la venta de bioaceite y sus derivados, los ahorros de costos en la producción de energía.

Justificación social

La pirólisis asistida por microondas para obtener bioaceite de cascarilla de café tiene múltiples justificaciones sociales que la hacen una opción prometedora. En primer lugar, la producción de bioaceite a partir de residuos agrícolas y forestales puede generar empleo adicional en la cadena de suministro, lo que puede ser particularmente beneficioso para las comunidades locales y rurales que a menudo tienen una economía agrícola y forestal. Además, la producción de bioaceite puede mejorar la calidad de vida de las personas al reducir la contaminación del aire y reducir la dependencia de los combustibles fósiles, lo que puede ser especialmente beneficioso para las personas que viven en áreas urbanas y rurales donde la calidad del aire puede ser vulnerada debido a la quema de combustibles fósiles. También, la valorización de residuos a través de la producción de bioaceite puede generar ingresos adicionales para las comunidades locales y los agricultores, lo que puede ayudar a reducir la pobreza en esas áreas.

Justificación tecnológica

La investigación sobre la pirólisis asistida por microondas para obtener bioaceite de cascarilla de café tiene varias justificaciones tecnológicas importantes. En primer lugar, esta tecnología puede mejorar significativamente la eficiencia energética del proceso de producción de bioaceite en comparación con otros métodos convencionales. La utilización de microondas para calentar la biomasa puede reducir el tiempo y la energía necesarios para realizar la pirólisis, lo que puede aumentar la eficiencia del proceso.

Además, la producción de bioaceite a partir de residuos agrícolas y forestales mediante la tecnología de pirólisis asistida por microondas puede contribuir al desarrollo de tecnologías de energía renovable. La producción de bioaceite a partir de residuos es una forma sostenible de aprovechar los recursos naturales y reducir la dependencia de los combustibles fósiles.

Otra justificación importante de la tecnología de pirólisis asistida por microondas es su capacidad para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. La quema de residuos agrícolas y forestales al aire libre puede emitir grandes

cantidades de gases de efecto invernadero, pero al convertir estos residuos en bioaceite mediante la pirólisis, se puede reducir la cantidad de gases emitidos al ambiente y contribuye con la mitigación del cambio climático.

1.5. Delimitantes de la investigación

1.5.1. Teórica

De acuerdo con la teoría de los principios de pirólisis y los principios de la química verde, las variables "pirólisis asistida por microondas" y "bioaceite" se encuentran dentro del ámbito de investigación de la ingeniería ambiental.

La investigación se sostiene en fuentes confiables con una antigüedad máxima de 5 años para garantizar la actualidad y pertinencia de la información. A nivel nacional, se ha encontrado una limitación bibliográfica en el área de investigación, mientras que, a nivel internacional, existe una amplia cantidad de artículos científicos relacionados a la pirólisis convencional, más no a la pirólisis asistida por microondas para la generación de bioaceite. Debido a esta limitación de fuentes bibliográficas con el criterio mencionado, se han utilizado artículos científicos con una antigüedad mayor a la requerida para complementar la información teórica, ya que eran relevantes para la investigación.

Los instrumentos utilizados son válidos para ser empleados en el campo de la ingeniería y pueden ser evaluados desde diferentes perspectivas, como su carácter universal, técnico y analítico. En concordancia a lo mencionado se ha clasificado a cada instrumento empleado de acuerdo a su carácter: analizador elemental: analítico, bomba calorimétrica: técnico y analítico, analizador termogravimétrico: técnico y analítico, termopar tipo K: técnico, valorador volumétrico: técnico y analítico, viscosímetro: técnico y analítico, Potenciómetro: técnico, oxímetro: técnico y analítico y los instrumentos calculados mediante fórmulas para medir propiedades: técnico y analítico.

1.5.2. Temporal

La investigación se llevó a cabo en los meses de abril, mayo, junio y julio del año 2023. Durante el mes de mayo y junio se realizó la recolección y análisis de datos. Con respecto a la disponibilidad de la materia prima, se utilizó una

pequeña cantidad de cascarilla de café y no se presentaron restricciones estacionales.

1.5.3. Espacial

Durante la investigación para obtener bioaceite de cascarilla de café por medio de pirólisis de asistida por microondas, se realizaron una serie de experimentos en el laboratorio de fisicoquímica de la Facultad de Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional del Callao. Para obtener la muestra de cascarilla de café, se recolectaron residuos de cascarilla de café de la empresa Aromas de Monzón S.A.C, ubicada en el valle del Monzón en Huánuco. Las muestras de cascarilla de café y bioaceite obtenido de la pirólisis, fueron enviadas al Laboratorio de Energías Renovables de la Universidad Nacional Agraria La Molina para su análisis.

II. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes del estudio

2.1.1. A nivel internacional

Amalina et al. (2023) en su investigación denominado “Efecto de los parámetros de proceso en el rendimiento de bioaceite a partir de biomasa lignocelulósica mediante tecnología de pirólisis asistida por microondas para recursos energéticos sostenibles: estado actual”, se evaluaron diversas mejoras y se analizaron los principales factores que afectan el rendimiento en la pirólisis asistida por microondas. Los resultados obtenidos demuestran que el rendimiento de bioaceite se ve significativamente influenciado por diversos parámetros, tales como la temperatura de pirólisis, la potencia de las microondas, el tipo de absorbente utilizado y la catálisis. Además, se observó que el tiempo de residencia, el tamaño de las partículas de biomasa, el tipo de gas de purga y el caudal también influyen en la producción de bioaceite, aunque en menor medida. Es importante destacar que la pirólisis asistida por microondas se presenta como un proceso escalable con múltiples ventajas medioambientales. A continuación, se introduce la Metodología de Superficie de Respuesta (RSM) como una herramienta para optimizar los sistemas MAP. En conclusión, el estudio resalta la importancia de la pirólisis asistida por microondas como un proceso sostenible y renovable para la obtención de bioaceite. Los hallazgos presentados ofrecen un marco de referencia para optimizar los parámetros operativos, mejorar la eficiencia y maximizar el rendimiento en la producción de bioaceite. La literatura de la revista es altamente significativa porque permitirá explorar y evaluar la viabilidad de la pirólisis asistida por microondas como una técnica eficiente para obtener bioaceite a partir de la cascarilla de café.

Jansuwan et al. (2023) llevó a cabo un estudio titulado “Propiedades del bioaceite y el biocarbón procedentes de la pirólisis asistida por microondas de alta intensidad de residuos de cáscara de palma aceitera”, teniendo como objetivo evaluar la aplicación de la pirólisis asistida por microondas de alta intensidad en la obtención de bioaceite crudo y biocarbón a partir de residuos de

cáscara de palma aceitera. Para ello, se aplicó un diseño experimental factorial completo 2^3 , que manipuló los factores de temperatura, relación de mezcla y tiempo de pirólisis, con el propósito de maximizar el porcentaje de rendimiento de biopetróleo crudo al menor costo posible. El ajuste óptimo obtenido según el modelo propuesto reveló una temperatura de 611°C, acompañada de una proporción de mezcla de 70:30 de cáscara de palma aceitera (OPS) y carbón activado (AC), y un tiempo de 39,6 minutos, lo cual resultó en un rendimiento del 15,3% y un costo de 8,48 Thai-Bath/cc. Los coeficientes de determinación (R^2) alcanzaron valores de 93,99% y 94,00% para los modelos respectivos. Considerando una contribución viable para nuestra investigación, ya que nos permitirá tener conocimiento de los niveles (bajo y alto) del factor temperatura donde se logre obtener el mayor rendimiento de bioaceite crudo.

En la investigación realizada por Sardi et al. (2023) denominado “Producción avanzada de bioaceite a partir de una mezcla de microalgas y carbón de bajo rango mediante pirólisis asistida por microondas”, el propósito de este estudio consistió en la determinación de la producción de bioaceite, una prometedora alternativa energética, mediante la utilización de una mezcla innovadora compuesta por carbón de bajo rango (C) y la microalga *Chlorella vulgaris* (A), en combinación con un catalizador HZSM-5 en una proporción de 1% en peso. Para alcanzar este objetivo, se empleó la avanzada técnica de pirólisis por microondas, llevada a cabo en un reactor por lotes bajo condiciones de vacío (~ 10 mm H₂O) y a una temperatura de 500 °C. El enfoque experimental se basó en la exploración de diversas variables de operación, incluyendo la relación C/A, el tiempo de pirólisis y la potencia de entrada, con el fin de obtener una producción óptima de bioaceite. Se destaca la importancia de estos parámetros en el diseño de procesos eficientes y sostenibles para la obtención de energía a partir de fuentes renovables. A través de un minucioso estudio experimental, se lograron identificar las condiciones óptimas que condujeron a un rendimiento de bioaceite destacable, alcanzando un valor del 33.8% en peso. Estas condiciones óptimas se lograron mediante una relación C/A de 4:6 y un tiempo de reacción de 75 minutos. Estos resultados representan un importante avance en el campo de la producción de biocombustibles a partir de microalgas

y contribuyen significativamente a la reducción de la huella de carbono asociada al consumo masivo de combustibles fósiles, por lo tanto, se infiere la relevancia de utilizar una técnica innovadora y eficiente como la pirólisis asistida por microondas, que permite maximizar la producción de bioaceite a partir de biomásas lignocelulósicas y resalta la importancia de la selección de catalizadores adecuados que potencialmente podría incrementar el rendimiento y la calidad del bioaceite obtenido.

Amaliyah y Eka Putra (2021) en su artículo llamado “Pirólisis asistida por microondas de cáscara de anacardo”, tiene como objetivo analizar las características de los productos obtenidos mediante el proceso de pirólisis asistida por microondas a partir de residuos de cáscara de nuez de marañón (CNS). Se empleó un sistema de calentamiento por microondas a una potencia de 400 W durante un periodo de 60 minutos, se identificaron y caracterizaron los productos resultantes de la pirólisis, tales como biogás, bioaceite y biocarbón, mediante un análisis integral que incluyó técnicas como el análisis proximal y final, el microscopio electrónico de barrido (SEM), el análisis termogravimétrico (TGA/DTG), el cromatógrafo de gases-espectrómetro de masas (GC-MS) y el método de infrarrojo transformado de Fourier (FTIR). El rendimiento de bioaceite obtenido mostró una densidad de 1.036 gr/ml, una viscosidad de 19,5 cSt, a un punto de inflamación de 138°C y un poder calorífico superior (HHV) de 21,7 MJ/kg. El estudio demostró que la pirólisis asistida por microondas a 400°C es una metodología alternativa eficiente para producir biocarbón y bioaceite a partir del CNS. Este método se caracteriza por su rápida generación de productos a baja temperatura gracias al calentamiento homogéneo de microondas. Los rendimientos de biocarbón y bioaceite fueron aproximadamente del 35% y 45% respectivamente, con un 20% de productos excedentes como agua y biogás. Estos resultados resaltan la relevancia de la pirólisis asistida por microondas como una opción sostenible para la valorización de los residuos de cáscara de nuez de marañón. Tomando en consideración un aporte práctico para nuestra investigación porque se afirma que el proceso de la pirólisis asistida por microondas es una metodología alternativa para producir bioaceite de buena calidad bajo ciertos parámetros como la temperatura.

En el trabajo de investigación de Batista Júnior et al. (2021) titulado "Metodología de superficie de respuesta aplicada a la pirólisis de residuos de café usado: efecto de la temperatura y la velocidad de calentamiento en el rendimiento y la caracterización del producto". El objetivo del estudio fue examinar los efectos de la temperatura y la velocidad de calentamiento en la producción de productos pirolíticos a partir de residuos de café. El experimento se llevó a cabo en un reactor de lecho fijo y se utilizó un diseño experimental factorial para analizar los resultados. Los principales productos obtenidos fueron líquido, carbón vegetal y gas, con rendimientos promedio de 49,45%, 26,45% y 24,05% en peso, respectivamente. Se determinó que la temperatura fue el factor más influyente en el rendimiento del producto, siendo la desvolatilización máxima alcanzada a una temperatura de 823 K y una velocidad de calentamiento de 80 K/min, las mismas condiciones que minimizaron la producción de carbón. El nivel de significancia del estudio es referencial, ya que se valida el diseño de superficie de respuesta como metodología para obtener el mejor rendimiento de bioaceite a partir de la cascarilla de café, siendo un aporte prometedor para nuestra investigación.

Baray-Guerrero et al. (2019) desarrollaron una investigación denominada "Tratamiento de la biomasa lignocelulósica mediante la pirólisis lenta y a baja temperatura para la producción de biocombustibles", donde se abordó el procesamiento de la biomasa residual con el objetivo de determinar las condiciones óptimas para la pirólisis lenta y a baja temperatura, con el fin de lograr el máximo rendimiento de materia volátil en la biomasa lignocelulósica. Para ello, se empleó un reactor de lecho fijo con un sistema de condensación acoplado a un cromatógrafo de gases para la identificación de los gases presentes en la biomasa residual durante el proceso de pirólisis, donde se llevaron a cabo pruebas utilizando aproximadamente 2 g de muestra de biomasa con un tamaño de partícula de 150 mc, las temperaturas variaron entre 150°C a 550°C, con una velocidad de calentamiento de 5°C/min, con el propósito de determinar los gases generados a diferentes temperaturas durante un tiempo de residencia de 60 minutos. Como resultado de su investigación, se llegó a la conclusión que para alcanzar el rendimiento máximo de materia volátil durante

la pirólisis, es necesario emplear una temperatura final superior a 350°C, con una velocidad de calentamiento, un tiempo de residencia y un tamaño de partículas de 5 °C/min, 60 minutos y 150 mc, respectivamente. Este estudio se enfoca en aprovechar la biomasa residual para obtener compuestos energéticos valiosos mediante la pirólisis lenta y a baja temperatura, ofreciendo una base sólida de conocimientos relacionados con la pirólisis asistida por microondas en la transformación de la biomasa. Además, sostiene que varios de los indicadores mencionados en la investigación como el contenido de cenizas, el contenido de materia volátil y el poder calorífico, son de gran relevancia para la producción de biocombustibles con un alto potencial.

En la investigación realizada por Saleem y Baig (2018) titulada “Producción de bioaceite y biocarbón a partir de diferentes residuos de biomasa”, el objetivo consistió en examinar el efecto de la temperatura en el rendimiento de bioaceite y biocarbón, considerando tres temperaturas distintas (300°C, 400°C y 500°C) con una velocidad de calentamiento de 3.69 °C/min. Se evaluó el rendimiento de bioaceite y biocarbón mediante un método de pirólisis convencional, empleando cuatro tipos diferentes de residuos de biomasa: cáscara de arroz, bagazo, aserrín de *Dalbergia sisso Roxb.* y aserrín de *Populus caspica Bornm.*, todos estos materiales fueron procesados en un reactor de lecho fijo. Es importante destacar que se utilizó un tamaño de partícula de 0,498 mm para cada residuo de biomasa y se empleó ácido sulfúrico como catalizador con el fin de aumentar la velocidad de reacción. Los resultados obtenidos revelaron una clara relación entre el incremento de temperatura y el aumento en el rendimiento de bioaceite, específicamente se obtuvo el mayor rendimiento de bioaceite (32,39 %) a una temperatura de 500°C utilizando bagazo como materia prima. Con una contribución relevante para nuestra investigación.

Por último, la investigación realizada por Borges et al. (2014) titulada “Pirólisis rápida de biomasa asistida por microondas usando absorbente de microondas”, se introdujo y exploró un innovador enfoque de pirólisis rápida asistida por microondas (fMAP) en presencia de absorbentes de microondas. El objetivo principal fue evaluar los efectos de la temperatura, la carga de materia prima, el tamaño de las partículas y el grado de vacío en la producción de

bioaceite a partir de aserrín de madera y rastrojo de maíz. La investigación reveló que las condiciones óptimas para la pirólisis de aserrín de madera fueron una temperatura de 480°C, 50 granos de SiC y una alimentación de biomasa de 2 g/min, lo que resultó en un rendimiento máximo de bioaceite del 65% en peso. Para el rastrojo de maíz, las temperaturas entre 490°C y 560°C, tamaños de partículas de biomasa de 0,9 mm a 1,9 mm y un grado de vacío inferior a 100 mmHg condujeron a un rendimiento máximo de bioaceite del 64% en peso. Los resultados también revelaron rendimientos de bioaceite superiores en comparación con el enfoque convencional de pirólisis asistida por microondas (MAP), en concreto, se lograron esos rendimientos utilizando el sistema fMAP con SiC como absorbente, mejorando significativamente la velocidad de calentamiento de ambas biomásas. La literatura del presente artículo es sumamente valiosa debido a que, al emplear SiC como absorbente de microondas a cierta temperatura del microondas, incluyendo otros parámetros, la técnica de pirólisis rápida asistida por microondas es efectiva para obtener un alto rendimiento de bioaceite.

2.1.2. A nivel nacional

Paredes et al. (2022) en su estudio titulado “Caracterización de dos biomásas lignocelulósicas *Coffea arabica* L. para la producción de biochar”, se caracterizaron dos tipos de biomasa agrícola derivados de la cosecha de café: la pulpa y la cascarilla. Para lograr este objetivo, se realizaron diversos análisis para determinar su composición elemental, poder calorífico, pH, contenido de humedad, cenizas, materia volátil, carbono fijo, así como el contenido de celulosa, lignina y holocelulosa, mediante técnicas como análisis próximo, termogravimetría y espectroscopía IR. En resumen, la metodología incluyó la selección y preparación de las muestras de pulpa (50 kg) y cascarilla de café (60 kg), el análisis de su tamaño de partícula, y la utilización de la espectroscopia de infrarrojo para obtener información sobre su composición química. Estos hallazgos son de gran relevancia, ya que ofrecen alternativas para el manejo sostenible de los residuos generados por la industria del café, permitiendo aprovechar su potencial energético y reduciendo así los impactos ambientales. Además, los resultados respaldan la viabilidad técnica y ambiental de la

producción de biocombustibles a partir de este residuo agrícola (cascarilla de café), contribuyendo al conocimiento de la investigación al proporcionar una caracterización detallada de la biomasa, la cual nos permitirá hacer una comparación con los valores referenciales de este estudio.

Cotrina Saavedra (2018) en su tesis denominada “Aprovechamiento de residuos lignocelulósicos del *Saccharum officinarum* por pirólisis para la obtención de bioaceite, Chongoyape 2018” para obtener el grado de título profesional de Ingeniería Ambiental, tuvo como propósito determinar las propiedades físicas y químicas de los residuos lignocelulósicos del *Saccharum officinarum*, que son clave en la producción de bio-aceite. Además, se buscó determinar la temperatura óptima para maximizar el rendimiento de bio-aceite en la pirólisis de estos residuos y evaluar las propiedades físicas del bio-aceite obtenido. La metodología utilizada involucró observación y experimentación, siendo la investigación de tipo aplicada y de nivel explicativa, con un diseño completamente aleatorizado con tres tratamientos y tres repeticiones. Se probaron tres temperaturas (400°C, 550°C y 650°C), y se midieron los rendimientos de los productos líquidos, sólidos y gaseosos. Los datos se analizaron utilizando ANOVA como prueba estadística, y se obtuvo la prueba de Tukey. A partir de los datos analizados se llega a las siguientes conclusiones, los resultados revelaron las características físicas y químicas de los residuos lignocelulósicos, así como las propiedades físicas del bio-aceite obtenido mediante pirólisis rápida al vacío. Se encontró que la temperatura óptima para maximizar el rendimiento de bio-aceite fue de 500°C. Estos hallazgos indican que la pirólisis de los residuos lignocelulósicos del *Saccharum officinarum* son una alternativa viable que permite evitar impactos negativos en el medio ambiente. Además, al identificar la temperatura óptima para la obtención de bio-aceite, se proporciona información valiosa para optimizar los procesos de pirólisis y promover una producción eficiente y sostenible de biocombustible líquido.

2.2. Bases Teóricas

Procesos termoquímicos

La biomasa celulósica se puede considerar una fuente para producir biocombustibles. Hay diversas vías de convertir la biomasa mediante procesos termoquímicos (Bu et al., 2016). Sin embargo, debido a la naturaleza resistente de la biomasa vegetal, los procesos biológicos para convertirla pueden ser costosos y difíciles de llevar a cabo debido a los mecanismos estructurales y químicos complejos que impiden la descomposición de los azúcares estructurales. Por lo tanto, los procesos termoquímicos podrían ser una mejor opción para convertir la biomasa lignocelulósica rápidamente y a un costo menor (Huang, Chiueh y Lo, 2016).

De acuerdo al estudio realizado por (Huang, Chiueh y Lo, 2016) los procesos de conversión termoquímica se dividen en:

1. **Combustión:** es la quema de biomasa en el aire para convertir la energía química almacenada en la biomasa en calor, energía mecánica o electricidad.
2. **Gasificación:** es la conversión de biomasa en gas combustible mediante calentamiento en un medio como aire, oxígeno o vapor.
3. **Licuefacción:** generalmente se lleva a cabo a temperaturas relativamente bajas para producir productos líquidos.
4. **Pirólisis:** es una descomposición térmica, proceso que ocurre en ausencia de oxígeno, y siempre es también el primer paso para producir productos primarios en los procesos de combustión y gasificación donde le sigue la oxidación total o parcial de los productos intermedios.

Productos de pirólisis de biomasa

La pirólisis es un proceso termoquímico que descompone la biomasa a temperaturas medias a altas (350-700°C) en ausencia de oxígeno. Este proceso produce productos sólidos, líquidos y gaseosos que pueden ser fuentes alternativas de energía (Bu et al., 2016).

Según (Huang, Chiueh y Lo, 2016), señalan que la temperatura y el tiempo de residencia de vapor también influyen en la producción de los productos trifásicos y que la producción de carbón se favorece con una temperatura de proceso más baja y un tiempo de residencia prolongado, mientras que la producción de gas de síntesis se incrementa con una temperatura de procesamiento más alta y un tiempo de residencia de vapor más prolongado. Una temperatura moderada y un tiempo de residencia de vapor más corto son óptimos para la producción de líquidos.

Además, (Huang et al., 2016) mencionan que el rendimiento de biocarbón, bioaceite o gas de síntesis puede ser mayor según los parámetros operativos (nivel de potencia de microondas y tiempo de procesamiento), las características de la biomasa y los efectos de los catalizadores o absorbentes de microondas

Para clasificar los productos del proceso de pirólisis se tomó como referencia el estudio de (Huang, Chiueh y Lo, 2016), el cual nos plantea la siguiente clasificación:

1. Producto Sólido: es conocido como carbón o biocarbón, los productos de la pirólisis asistida por microondas son diferentes de los de la pirólisis convencional, ya que el carbón de pirólisis por microondas tiene poros más uniformes y una estructura más abierta en comparación con el carbón de pirólisis convencional, que tiene poros irregulares y grietas profundas. Además, la pirólisis por microondas aumenta el valor calorífico de la biomasa debido a la desvolatilización de la hemicelulosa y la celulosa. Sin embargo, a niveles de potencia de microondas más altos, también se produce desvolatilización de la lignina, lo que da como resultado carbón vegetal con valores caloríficos más bajos. Los autores destacan que la pirólisis por microondas puede ser una técnica prometedora para producir carbón vegetal y otros productos a partir de biomasa.
2. Producto Líquido: generalmente se denomina bioaceite, aceite de pirólisis o líquido de pirólisis, es un líquido orgánico de color marrón oscuro cuyo poder calorífico es aproximadamente la mitad del del fueloil convencional debido a su alto contenido de oxígeno y agua. Para aumentar el poder

calorífico del bioaceite obtenido de la pirólisis convencional se necesitan más procesos de mejorar y refinación. Sin embargo, la pirólisis por microondas parece tener un potencial para producir bioaceites con mayor contenido de carbono y poder calorífico y menor contenido de oxígeno. Además, las propiedades y la estabilidad de los bioaceites se pueden mejorar mezclando metanol o etanol en los bioaceites.

3. Producto Gaseoso: los componentes principales del producto gaseoso son H₂, CH₄, CO y CO₂, con concentraciones de aproximadamente 32,9%, 33% y 23% en volumen, respectivamente. La pirólisis asistida por microondas tiene potencial para producir gas combustible rico en H₂. Además, el gas producto de la pirólisis asistida por microondas puede proporcionar más bioenergía debido a su poder calorífico que la pirólisis convencional, ya que contiene más H₂ y CO pero menos CH₄ y CO₂.

A medida que aumenta la temperatura de reacción, las concentraciones de H₂ y CO aumentan sustancialmente, mientras que la concentración de CO₂ disminuye. No obstante, no se observa un cambio evidente en la concentración de CH₄.

Clases de pirólisis

Según la temperatura de calentamiento, así como las condiciones operativas y la formación del producto el pirólisis se clasifica en pirólisis lenta, pirólisis rápida y pirólisis instantánea (Potnuri et al., 2022).

Por la tanto, las clases de pirólisis serian:

1. Pirólisis rápida: es una ruta de conversión termoquímica que puede transformar materias primas voluminosas de biomasa agroforestal y residual en biopetróleo líquido y pequeñas cantidades de productos sólidos en ausencia de O₂ a una temperatura de 400 a 600°C y un tiempo de residencia del vapor de 0,5e3 s (Hu, Bassi y Xu, 2020).
2. Pirólisis lenta: Es conocido como el tipo más convencional de pirólisis, este proceso se lleva a cabo a velocidades de calentamiento bajas y temperaturas < 500 °C y con un largo tiempo de residencia (Bonassa

et al., 2018). Generalmente se trabaja con una velocidad de calentamiento de 0,1 a 1°C/s en un rango de tiempo de 5 a 30 min, como producto principal se obtiene carbón sólido, sin embargo, también se puede producir combustibles líquidos y productos gaseosos en pequeñas cantidades (Elkhalifa et al., 2019).

3. Pirólisis instantánea: La pirólisis instantánea o flash convierte la materia prima en gaseosa (Chhabra et al., 2020).

Biomasa lignocelulósica

La biomasa lignocelulósica, un importante recurso de biomasa, ha sido reconocida como materia prima potencialmente sostenible para la producción de biocombustibles y otros biomateriales. La bioenergía y los biocombustibles derivados de las materias primas de biomasa exhiben emisiones de gases de efecto invernadero durante el ciclo de vida más bajas que los combustibles fósiles (Huang, Chiueh y Lo, 2016).

Los materiales de biomasa con alto potencial energético incluyen residuos agrícolas (paja, cáscaras y bagazo) y residuos forestales (astillas de madera, aserrín y corteza), los cuales pueden considerarse como biomasa lignocelulósica (Huang et al., 2016).

Composición de biomasa lignocelulósica

La biomasa lignocelulósica, como cultivos, madera, residuos agrícolas y forestales, se compone principalmente de celulosa, hemicelulosa y lignina. En general, los contenidos de celulosa, hemicelulosa y lignina de la biomasa vegetal son aproximadamente 35%–50%, 25%–30% y 15%–30% en peso, respectivamente (Huang, Chiueh y Lo, 2016).

Los principales componentes de la biomasa lignocelulósica son la celulosa, la hemicelulosa y la lignina.

1. Celulosa: El polisacárido principal en la biomasa lignocelulósica proviene de la celulosa, que es el principal polímero estructural de la pared celular de una planta. La celulosa es un polisacárido lineal constituido por anhidroglucopiranosas conectadas por β-1,4 enlace glucosídico. La

tendencia característica de la molécula es formar fuertes enlaces de hidrógeno intermoleculares e intramoleculares. Los enlaces de hidrógeno intermoleculares e intramoleculares desempeñan un papel fundamental en el mantenimiento y el refuerzo de la conformación plana y lineal de la cadena.

2. Hemicelulosa: La hemicelulosa está compuesta por diferentes monómeros de azúcar como glucosa, xilosa, manosa, galactosa, arabinosa, ácidos urónicos y ácido 4-O-metil-dglucurónico. La hemicelulosa puede formar enlaces de hidrógeno tanto con la celulosa como con la lignina, por lo que se conoce como glicanos reticulantes.
3. Lignina: La lignina es el segundo componente más importante de la biomasa lignocelulósica después de la celulosa. La lignina normalmente se descompone en el rango de temperatura de 280-500°C y es también el componente más resistente al calor de los tres constituyentes principales de la biomasa lignocelulósica; como resultado, se produce más carbón residual durante la pirólisis de lignina que durante la pirólisis de celulosa.

Los otros componentes incluyen algunos extractivos orgánicos y minerales inorgánicos (Bu et al., 2016).

Descomposición de biomasa lignocelulósica

Los principales componentes de la biomasa lignocelulósica, incluidas las hemicelulosas, la celulosa y la lignina, se pueden descomponer selectivamente para obtener productos químicos de valor agregado. Esta descomposición térmica está guiada por las propiedades de estabilidad termoquímica de estos tres principales constituyentes de la biomasa en la que la hemicelulosa es el polímero menos estable (descomposición rápida en el rango de calentamiento de 200 °C a 300 °C), la celulosa es más estable (descomposición rápida en el rango de 300 °C a 400 °C), y el rango de temperatura de descomposición de la lignina es muy amplio (descomposición gradual en el rango de 200 °C a 500 °C) (Bu et al., 2016).

Cascarilla de café: Llamado también pergamino de café, es aquella parte que envuelve el grano inmediatamente después de la capa mucilaginosa. Es un material orgánico compuesto por celulosa (44,81%), hemicelulosa (23,65%), lignina (28,54%) y cenizas (1,8%) (Manals Cutiño, Salas Tort y Penedo Medina, 2018; Sabogal Otálora, Palomo Hernández y Piñeros Castro, 2022).

De acuerdo con Paredes et al., (2022), en su estudio se recopilaron valores referenciales para la composición de la cascarilla de café:

- Análisis elemental: carbono (43.79% - 50.69%), hidrógeno (5.64% - 6.23%), nitrógeno (0.82% - 2.74%), oxígeno (47.69% - 42.05%) y azufre (0.14% - 0.20%).
- Análisis proximal: humedad (5.50 - 7.92%), ceniza (3.54 - 5.00), materia volátil (63.3 - 71.63) y carbono fijo (16.9% - 26.2%).
- Poder Calorífico Superior (17.48MJ/kg - 18.98 MJ/kg).

Microondas

En el espectro electromagnético, las microondas se encuentran entre el infrarrojo y las frecuencias de radio. Las longitudes de onda de las microondas están entre 1 mm y 1 m con frecuencias correspondientes entre 300 GHz y 300 MHz, respectivamente. Las dos frecuencias de microondas más utilizadas son 915 MHz y 2,45 GHz. La energía de microondas se deriva de la energía eléctrica con una eficiencia de conversión de aproximadamente 85% para 915 MHz y 50% para 2,45 GHz. La mayoría de los hornos microondas domésticos utilizan la frecuencia de 2,45 GHz. En comparación con 2,45 GHz, el uso de 915 MHz puede proporcionar una profundidad de penetración sustancialmente mayor, que es un parámetro importante en el diseño del tamaño de la cavidad de microondas, la ampliación del proceso y la investigación de la capacidad de absorción de microondas de los materiales (Huang, Chiueh y Lo, 2016).

Calentamiento por microondas

El calentamiento por microondas incluye dos mecanismos: la rotación del dipolo y la conducción iónica. En comparación con el calentamiento convencional, el

calentamiento por microondas puede ser más eficiente debido a su calentamiento rápido, selectivo, volumétrico y uniforme (Huang et al., 2016).

Las microondas provocan movimiento molecular por migración de especies iónicas o rotación de especies dipolares o ambas para generar calor debido a la fricción entre las moléculas. Los materiales que pueden absorber microondas se denominan absorbentes o dieléctricos, por lo que el calentamiento por microondas también se conoce como calentamiento dieléctrico. El grado de calentamiento por microondas de un material se puede determinar mediante un término denominado tangente de pérdida, que es la relación entre el factor de pérdida dieléctrica y la constante dieléctrica del material. En general, los materiales se pueden dividir en tres tipos según sus tangentes de pérdida: materiales de absorción de microondas alta ($> 0,5$), media ($0,1-0,5$) y baja ($< 0,1$). Las tangentes de pérdida de los materiales de carbono como el carbón vegetal, el negro de humo y el carbón activado, que oscilan entre $0,1$ y $0,8$, son comparables o superiores a la tangente de pérdida del agua destilada ($0,118$ a $2,45$ GHz y 298 K), por lo que los materiales de carbono son buenos absorbentes de microondas que muestran una alta capacidad para absorber y convertir la energía de microondas en calor.

El calentamiento por microondas ofrece una serie de ventajas sobre el calentamiento convencional, como: (1) calentamiento sin contacto; (2) transferencia de energía en lugar de transferencia de calor; (3) mayor tasa de calentamiento; (4) calentamiento selectivo de materiales; (5) calentamiento volumétrico; (6) puesta en marcha y parada rápidas; (7) calentamiento desde el interior del cuerpo material; (8) mayor nivel de seguridad y automatización. La energía de microondas es eficiente en el calentamiento selectivo de materiales ya que no se desperdicia energía en el calentamiento a granel de las materias primas, lo cual es una clara ventaja sobre los métodos convencionales (calentamiento a granel en hornos) (Huang, Chiueh y Lo, 2016).

Clasificación de materiales según su interacción con las microondas

Los materiales se pueden clasificar en tres categorías según sus interacciones con las microondas: conductores, aislantes y absorbentes. Las microondas se

reflejan en la superficie y, por lo tanto, no calientan los metales, que generalmente tienen una alta conductividad y se clasifican como conductores. Los materiales (por ejemplo, vidrio y cerámica) transparentes a las microondas se clasifican como aislantes (Huang, Chiueh y Lo, 2016).

Biocombustibles

Los biocombustibles son un tipo de combustible obtenido a partir de biomasa. La biomasa es definida como la fracción biodegradable de los productos y desechos tanto de origen biológico (orgánico) así como de los residuos industriales municipales (Bazco Marco, 2021).

Clasificación de biocombustibles, según su estado físico:

1. Biocombustibles sólidos: compuestos de biomasa sólida orgánica no fósil y de origen biológico, estos biocombustibles se producen a partir de carbón vegetal, leña, pellets de madera, residuos de madera, desechos animales y otros desechos industriales renovables, tienen importantes aplicaciones en la generación de calor, energía y electricidad (Mahapatra et al., 2021).
2. Biocombustibles líquidos: son aquellos producidos a partir de biomasa natural o fracción biodegradable, tienen múltiples aplicaciones y ventajas sobre los biocombustibles sólidos y gaseosos debido a su alta densidad energética ideales para el transporte, el almacenamiento y la modernización, entre los más conocidos se encuentra el bioetanol, el biodiésel y el bioaceite (Mahapatra et al., 2021).

Así también existen otras clasificaciones de biocombustible líquido como:

Biocombustibles a base de triglicéridos: incluyen biomasa como aceite vegetal, aceite pirolítico, biodiésel, aceite hidrogenado y biogasolina.

Biocombustibles de base lignocelulósica: incluyen materias primas para biocombustibles, como los bioaceites, junto con el diésel BTL y los biocombustibles directos.

Clasificación de los biocombustibles, según su generación, de acuerdo al estudio realizado por (Dahman et al., 2019):

1. Biocombustibles de primera generación: los biocombustibles de primera generación están hechos de azúcar, almidón y aceite vegetal. Los combustibles producidos biológicamente, como el etanol, el propanol y el butanol, se producen por la acción de microorganismos y enzimas a través de la fermentación de azúcares o almidones, o celulosa. Los procesos de biocombustibles de primera generación son útiles, pero existe un umbral por encima del cual no pueden producir suficiente biocombustible sin amenazar el suministro de alimentos y la biodiversidad. Muchos biocombustibles de primera generación dependen de subsidios y no son competitivos en costos con los combustibles fósiles existentes, como el petróleo, y algunos producen solo ahorros limitados de emisiones de gases de efecto invernadero.
2. Biocombustibles de segunda generación: se obtienen a partir de cultivos lignocelulósicos. Esta tecnología de generación permite separar la lignina y la celulosa de una planta para que la celulosa pueda fermentarse en alcohol. Estos biocombustibles se pueden fabricar a partir de diferentes tipos de biomasa como define cualquier fuente de carbono orgánico. Esto puede renovarse rápidamente como parte del ciclo del carbono. Las tecnologías de biocombustibles de segunda generación se han desarrollado porque la fabricación de biocombustibles de primera generación tiene limitaciones importantes.
3. Biocombustibles de tercera generación: las algas han estado presentando un caso sólido, ya que tienen el potencial de revolucionar completamente el mercado de la energía. Las algas tienen muchas ventajas ya que solo necesitan CO₂, nutrientes, agua y luz solar para crecer. También se ha demostrado que algunos cultivos de algas crecen en aguas residuales, lo que reduce aún más los costos ya que elimina la necesidad de un medio de agua dulce. Además, se ha demostrado que los biocombustibles renovables tienen un rendimiento energético muy favorable en comparación con los combustibles tradicionales, lo que significa que la energía ganada versus la energía requerida es mucho mayor, manteniendo una huella de carbono mucho menor. Una ventaja de

muchos biocombustibles sobre la mayoría de los otros tipos de combustible es que son biodegradables.

1.6. Marco Conceptual

Principio de pirólisis

La pirólisis es la descomposición térmica de la materia orgánica, como la presente en los residuos, en ausencia de oxígeno. Los compuestos basados en carbono contenidos en el residuo se descomponen dando gases, hidrocarburos condensables y un residuo carbonoso o char (palabra que se emplea en esta tecnología para designar al coque). Desde el punto de vista operativo, los procesos de pirólisis pueden encuadrarse en tres grandes bloques: pirólisis convencional, pirólisis rápida y pirólisis instantánea (Castells y Velo, 2012).

Pirólisis asistida por microondas

Para la definición conceptual de la variable independiente “pirólisis asistida por microondas” se revisó diversas fuentes y autores, y se logró contribuir con lo expuesto a continuación.

La pirólisis asistida por microondas (MAP) es un proceso termoquímico que convierte la biomasa en bioaceite, y su eficiencia está influida por varios aspectos. Según (Zhang et al., 2022), estos aspectos incluyen la selección de la materia prima, la intensificación del proceso de calentamiento y la intensificación del proceso de pirólisis. En comparación con la pirólisis convencional, este proceso es más rápido, eficiente, selectivo, controlable, confiable y flexible, gracias a que las microondas penetran en la partícula de materia prima y la energía se transforma en calor dentro de la partícula (Zhang et al., 2017). En el calentamiento convencional, el calor penetra desde la superficie exterior hasta el núcleo por conducción, convección y radiación.. Al mismo tiempo, las microondas inducen el calentamiento volumétrico del material en MAP (Suriapparao, Tanneru y Reddy, 2022).

La pirólisis de biomásas produce bioaceites con una amplia variedad de compuestos, desde los volátiles hasta los pesados (Giorcelli et al., 2021), lo que los hace prometedores como productos de recuperación de energía con alta

eficiencia y mínimas emisiones atmosféricas. En general, el proceso de pirólisis puede reducir el volumen de residuos de biomasa y convertirlos en productos de recuperación de energía, como gas de síntesis, bioaceite y biocarbón (Ethaib et al., 2020).

La definición conceptual seleccionada para nuestra variable independiente “pirólisis asistida por microondas” es precisa y completa porque menciona de manera detallada los aspectos claves que influyen en el proceso de pirólisis asistida por microondas. En particular, la selección de la materia prima es fundamental, ya que cada tipo de biomasa tiene una composición diferente, lo cual puede influir en el proceso de pirólisis. Asimismo, la intensificación del proceso de calentamiento y pirólisis es importante para mejorar la eficiencia del proceso y obtener un mayor rendimiento del bioaceite. En consecuencia, la definición conceptual es relevante y útil para sustentar la variable independiente, ya que aborda los aspectos claves que influyen en la calidad de bioaceite obtenido a través de este proceso.

Las dimensiones de la variable “pirólisis asistida por microondas” que se utilizaron en la investigación fueron: 1) materia prima, 2) proceso de calentamiento y 3) proceso de pirólisis.

Materia prima

A partir del análisis elemental, el análisis proximal y la composición bioquímica, las materias primas de biomasa se pueden evaluar para comprender sus características. A través del análisis elemental (C, H, O, N, S, etc.), la fórmula se puede utilizar para evaluar el alto poder calorífico de la biomasa para inferir el valor potencial de la materia prima, cuando se convierte en biocombustible. En el análisis proximal, el alto contenido de cenizas y el alto contenido de oxígeno suelen tener un efecto adverso en la eficiencia del proceso y el valor del producto. Cuanto mayor sea el contenido de agua, más energía se necesitará para calentar la materia prima a las temperaturas requeridas para la pirólisis, por lo que el pretratamiento de la materia prima a menudo incluye un paso de secado. La biomasa altamente volátil producirá una gran cantidad de bioaceite y

gas de síntesis, mientras que el carbono fijo aumenta la producción de biocarbón (Xiong et al., 2023).

Para medir la dimensión materia prima se utilizaron los indicadores:

1. Carbono (C): La biomasa con altos valores de carbono e hidrógeno es la que más contribuye al poder calorífico del combustible. La energía generada por las reacciones térmicas está asociada a la entalpía del carbono, hidrógeno y azufre (Mendoza Martinez et al., 2019). Se recomienda un 39.68% a 46.41% de contenido de carbono en la biomasa (Zinla et al., 2021; Setter et al., 2020).
2. Hidrógeno (H): La biomasa con altos valores de carbono e hidrógeno es la que más contribuye al poder calorífico del combustible. La energía generada por las reacciones térmicas está asociada a la entalpía del carbono, hidrógeno y azufre (Mendoza Martinez et al., 2019). Se recomienda un 5.41% a 6.00% de contenido de hidrógeno en la biomasa (Zinla et al., 2021; Paredes et al., 2022).
3. Nitrógeno (N): El contenido de nitrógeno en las biomásas varía en el intervalo de 0,10% a 12%. La presencia de nitrógeno y azufre en la biomasa tiene un impacto directo en la contaminación ambiental, debido a la formación de óxidos nocivos (NO_x, SO_x) a partir de compuestos volátiles (Mendoza Martinez et al., 2019). Se recomienda un 0.36% a 3.01% de contenido de nitrógeno en la biomasa (Zinla et al., 2021; Paredes et al., 2022).
4. Oxígeno (O): El oxígeno está generalmente presente en los combustibles de origen vegetal, y su presencia disminuye el poder calorífico. Por lo tanto, las relaciones H/C y O/C bajas son deseables para el uso de biomasa para energía (Mendoza Martinez et al., 2019). Se recomienda un 41.82% a 51.58% de contenido de oxígeno en la biomasa (Zinla et al., 2021; Paredes et al., 2022).
5. Azufre (S): La presencia de nitrógeno y azufre en la biomasa tiene un impacto directo en la contaminación ambiental, debido a la formación de óxidos nocivos (NO_x, SO_x) a partir de compuestos volátiles (Mendoza

Martinez et al., 2019). Se recomienda un 0.09% a 0.31% de contenido de azufre en la biomasa (Setter et al., 2020; Zinla et al., 2021).

6. Poder calorífico: El poder calorífico representa la cantidad de energía liberada por una unidad de masa de una muestra durante la reacción química para la combustión completa que produce CO (Perez, Jonnalagedda y Toraman, 2022). Se recomienda un 15.02% a 18.50% de contenido de hidrógeno en la biomasa (Setter et al., 2020; Zinla et al., 2021).
7. Contenido de ceniza: Cuando la biomasa se incinera, el contenido de humedad se evapora y la materia volátil se quema, el material restante se conoce como la ceniza de la biomasa. Este material restante no tiene valor energético. El contenido de cenizas se compone de materias inorgánicas. Si el valor del contenido de cenizas en la biomasa está más allá de los límites aceptables, causa problemas en los procesos termoquímicos como la pirólisis, la combustión y la gasificación. Dado que la ceniza es alcalina, la mayor cantidad de ceniza tiende a disminuir el punto de fusión, lo que puede causar escoria y ensuciamiento (Kamran, 2023). Se recomienda un 3.55% a 8.00% de contenido de cenizas en la biomasa para que el reactor pirolítico opere sin ningún problema (Setter et al., 2020; Zinla et al., 2021).
8. Contenido de humedad: Se define como el porcentaje de humedad en una muestra de biomasa que se examina cuando se calienta justo por encima del punto de ebullición del agua (105 °C). El calor dado a esta temperatura evapora el agua de la muestra de biomasa, lo que cambia el peso original de la biomasa. En el momento en que deja de cambiar, la diferencia entre el peso inicial y el peso final expresa el contenido de humedad que es la pérdida de peso. Se expresa como un porcentaje del material de biomasa (Kamran, 2023). La cantidad de agua contenida, influye en el poder calorífico del biocombustible, por eso para un proceso pirolítico es recomendable hasta 11.3% de contenido de humedad (Zinla et al., 2021).

9. **Materia volátil:** Cuando se quema la biomasa, la materia volátil se quema fácilmente en presencia de oxígeno y se determina como la pérdida de masa. Una gran cantidad de materia volátil en la biomasa es indeseable porque produce alquitrán en el motor de combustión interna (ICE), creando serios problemas. Un gasificador se diseña considerando la cantidad de alquitrán en el combustible y se gestiona la eliminación continua del alquitrán del sistema de refrigeración y limpieza. La biomasa contiene más materia volátil que el carbón, lo que facilita la ignición de la biomasa (Kamran, 2023). La cantidad de materia volátil en la biomasa es recomendable hasta 77.09% (Setter et al., 2020).
10. **Carbono fijo:** Se define como el residuo sólido combustible que queda cuando se quema una muestra de la biomasa a una temperatura de 750°C durante 7 min. Cuando el contenido de humedad, el contenido de cenizas y la materia volátil se eliminan de la biomasa, el resto es el carbono fijo (Kamran, 2023). La cantidad de carbono fijo en la biomasa se recomienda que sea hasta 19.36% (Setter et al., 2020).

Proceso de calentamiento

Durante el proceso de pirólisis asistido por microondas, un buen calentamiento asistido por microondas depende significativamente de la capacidad de absorción de microondas de las materias primas o materiales utilizados. Por ello, los absorbentes o susceptores de microondas se suelen utilizar para intensificar los procesos de calentamiento y pirólisis por microondas (Zhang et al., 2022).

Para medir la dimensión proceso de calentamiento se utilizó el indicador:

1. **Absorbentes o susceptores de microondas:** Son aquellos materiales con un alto valor de pérdida de tangente dieléctrica ($\tan \delta$) (Suriapparao, Tanneru y Reddy, 2022).

Proceso de pirólisis

Para la intensificación del proceso de pirólisis, se puede enfocar la temperatura de pirólisis y la potencia de microondas (Zhang et al., 2022).

Para medir la dimensión proceso de pirólisis se utilizaron los indicadores:

1. Temperatura de pirólisis: La temperatura de pirólisis es aquel parámetro que debe seleccionarse y controlarse de manera adecuada (es decir, ~500 °C) para intensificar el proceso de pirólisis (Zhang et al., 2022).
2. Potencia de microondas: La potencia de microondas es un parámetro importante para la pirólisis por microondas de desechos orgánicos. Afecta significativamente las reacciones entre los desechos orgánicos y las microondas, cambiando así los procesos de transferencia de calor y masa. Una potencia de microondas más alta generalmente aumenta los procesos de transferencia de calor y masa para descomponer los desechos orgánicos para formar componentes de aceite, mientras que una potencia de microondas más alta puede aumentar aún más los procesos de transferencia de calor y masa para romper los componentes de aceite formados para generar componentes de gas, generando finalmente menos aceite. Es por eso que se debe seleccionar y controlar una potencia de microondas adecuada para intensificar el proceso de pirólisis (Zhang et al., 2022).

Por lo antes señalado, el nuevo constructo de pirólisis asistida por microondas, se refiere a un proceso termoquímico que utiliza microondas como fuente de energía para descomponer biomasa en ausencia de oxígeno, con el propósito de obtener un producto líquido conocido como bioaceite.

La fundamentación teórica de este constructo se basa en el principio de pirólisis y se respalda en investigaciones previas sobre la pirólisis de biomasa y las aplicaciones de microondas en procesos termoquímicos.

Este constructo involucra varios elementos clave que han sido considerados como dimensiones de la variable de estudio. Estos elementos incluyen la selección de la materia prima, donde se realiza el análisis elemental y proximal de la biomasa utilizada. Además, se considera el proceso de calentamiento, en el cual se emplean absorbentes de microondas. Por último, se toman en cuenta los parámetros de operación del proceso de pirólisis, tales como la temperatura y la potencia del microondas.

Principio de la química verde

El término "biorrefinería" se originó en los años 90 junto con el surgimiento de la química verde. El Departamento de Energía de los Estados Unidos definió una biorrefinería como una planta de procesamiento que utiliza materia prima de biomasa para producir un rango de productos valiosos, incluyendo combustibles y productos químicos de alto valor. Este enfoque está en línea con el séptimo principio de la química verde, el cual promueve el uso de materias primas renovables en lugar de fuentes no renovables como el carbón o el petróleo. Las biorrefinerías son, por lo tanto, una alternativa sostenible a las refinerías tradicionales de la industria petroquímica (Calvo-Flores y Martin-Martinez, 2022).

Los 12 principios de la Química Verde, originalmente definidos por Anastas y Warner, se han utilizado para desarrollar una amplia gama de productos y procesos con el objetivo de minimizar los riesgos para la salud y el medio ambiente, reducir la generación de desechos y prevenir la contaminación. El séptimo principio se centra en el uso de materias primas renovables. Actualmente, la biomasa se ha convertido en una fuente de energía en desarrollo, especialmente en la producción de combustibles para el transporte. El etanol se ha utilizado durante algún tiempo en mezcla con combustibles convencionales. Los aceites vegetales han sido objeto de mayor atención, lo que ha llevado a la síntesis y uso del biodiésel. Si se utiliza la lignocelulosa como materia prima para generar biocombustibles, los azúcares, terpenos y aceites vegetales de mayor valor pueden utilizarse para la síntesis de productos con mayor valor agregado. Esto se alinea con el enfoque de la química verde para maximizar el uso de materias primas renovables y minimizar la generación de desechos (Doria Serrano, 2009).

Bioaceite

Para la definición conceptual de la variable dependiente "bioaceite" se revisó diversas fuentes y autores, y se logró contribuir con lo expuesto a continuación.

El bioaceite es un líquido orgánico marrón oscuro que fluye libremente y tiene diferentes sinónimos como aceite de pirólisis o líquido de madera.

La despolimerización y fragmentación de la biomasa producen una mezcla de diferentes tamaños moleculares, lo que le da al bioaceite diferentes propiedades físicas y químicas en comparación con los aceites diesel y de petróleo (Zhang et al., 2017). La composición del bioaceite depende de la composición del material de la biomasa, con cada componente lignocelulósico (celulosa, hemicelulosa y lignina) generando un modelo de reacción exclusivo. Por ejemplo, la celulosa se descompone principalmente en ácidos, furanos y cetonas en bioaceite con grandes cantidades de sacáridos degradados. La hemicelulosa muestra productos similares, ya que los ácidos y las cetonas son los más contenidos en bioaceite, mientras que la lignina revela una gran capacidad para generar fenoles (Zhang et al., 2022).

Los bioaceites de pirólisis son una mezcla compleja de compuestos orgánicos que varían en tamaño molecular y composición dependiendo del tipo de materia prima y del proceso termoquímico utilizado (Ethaib et al., 2020; Bu et al., 2016b). Estos pueden ser diferentes de los bioaceites producidos por pirólisis eléctrica convencional (Zhang et al., 2020). En general, el bioaceite tiene una amplia variedad de grupos químicos, como ácidos, alcoholes, aldehídos, ésteres, cetonas, fenoles y guayacoles (Bu et al., 2016b).

La definición conceptual seleccionada para nuestra variable dependiente "bioaceite" es precisa y completa, ya que describe la apariencia, composición y propiedades del líquido obtenido a partir de la pirólisis asistida por microondas. El bioaceite tiene composición, propiedades y características diferentes en comparación a los aceites diésel y aceites de petróleo. Por lo tanto, la definición conceptual es relevante y útil para sustentar la variable dependiente "bioaceite", ya que proporciona una descripción del líquido proveniente de la pirólisis y además comprende la composición y propiedades del bioaceite, lo cual es fundamental para evaluar la calidad del producto y su posible uso como combustible y fuente de energía renovable. Además, la definición destaca que la composición y propiedades del bioaceite pueden variar según la biomasa utilizada y las condiciones de pirólisis, lo que es esencial para comprender la calidad y las posibles aplicaciones del producto obtenido.

Las dimensiones de la variable “bioaceite” que se utilizaron en la investigación fueron 1) propiedades físicas y 2) propiedades energéticas.

Propiedades físicas del bioaceite

Las propiedades físicas del bioaceite incluyen principalmente el contenido de humedad, el contenido de sólidos, la viscosidad, la densidad, el pH, etc. (Zhang et al., 2017).

Para medir la dimensión propiedades físicas se utilizaron los indicadores:

1. Contenido de humedad: El contenido de humedad del bioaceite de pirólisis proviene principalmente de dos fuentes: (a) el agua en la materia prima y (b) el agua producida por las reacciones de deshidratación que ocurren durante el proceso de pirólisis (Zhang et al., 2017). El contenido de humedad para un bioaceite convencional puede variar en un rango entre 15% a 30% (Yu et al., 2007).
2. Viscosidad: La viscosidad cinemática de un bioaceite convencional puede variar en un rango de 2.5 cSt a 30 cSt (Yu et al., 2007). La viscosidad dependiendo de su temperatura, y puede ser aún mayor cuando el bioaceite se almacena en malas condiciones durante períodos más prolongados (Zhang et al., 2017).
3. Potencial de hidrógeno (pH): Los bajos valores de pH de los bioaceites de pirólisis se atribuyen principalmente a las cantidades sustanciales de ácidos orgánicos, por ejemplo, ácido acético y ácido fórmico. Esta corrosividad es especialmente grave cuando el bioaceite de pirólisis se encuentra a temperaturas elevadas y un mayor contenido de agua (Zhang et al., 2017). El pH de un bioaceite convencional puede variar en un rango de 2.0 a 3.8 (Yu et al., 2007).

Propiedades energéticas del bioaceite

Las características distintivas de las composiciones elementales para el bioaceite de pirólisis asistida por microondas son que tienen un mayor contenido de oxígeno (29% - 40%) mientras que un menor contenido de carbono (54% - 60%) en comparación con aceite diésel y aceite de petróleo. Como el oxígeno

en sí mismo no es un elemento combustible, el alto contenido de oxígeno de un bioaceite daría como resultado un poder calorífico superior más bajo del bioaceite (Zhang et al., 2017).

Para medir la dimensión propiedades energéticas se utilizaron los indicadores:

1. Contenido de Oxígeno: El oxígeno está presente en la mayoría de los compuestos de aceite que se han identificado en los bioaceites (más de 300), y las distribuciones de estos compuestos dependen en gran medida de las características de la biomasa y las condiciones de operación (temperatura de pirólisis, velocidad de calentamiento y tiempo de residencia). El contenido de oxígeno de un bioaceite convencional varía en un rango de 29% a 40% (Zhang et al., 2017).
2. Poder calorífico: El poder calorífico representa la cantidad de energía liberada por una unidad de masa de una muestra durante la reacción química para la combustión completa que produce CO (Perez, Jonnalagedda y Toraman, 2022). El poder calorífico de un bioaceite convencional varía en un rango de 15 MJ/kg a 19 MJ/kg (Yu et al., 2007).

Por lo antes señalado, el nuevo constructo de bioaceite, se refiere a un producto líquido que resulta de la pirólisis asistida por microondas de biomasa. Es una mezcla compleja de compuestos orgánicos líquidos que tiene la capacidad de ser utilizada como biocombustible.

La fundamentación teórica de este constructo se basa en el principio de la química verde, que promueve el uso de materias primas renovables, y se respalda en investigaciones previas sobre las propiedades y características del bioaceite obtenido de procesos de descomposición térmica.

Este constructo involucra varios elementos clave que han sido considerados como dimensiones de la variable de estudio. Estos elementos incluyen las propiedades físicas del bioaceite, como el contenido de humedad, la viscosidad y el potencial de hidrógeno. Además, se consideran las propiedades energéticas del bioaceite, como contenido de oxígeno y el poder calorífico.

1.7. Términos Básicos

Bioenergía: Se define como una fuente energía renovable que usa materias primas de biomasa y es capaz de reemplazar la energía fósil (Lago et al., 2019; Wu y Pfenninger, 2023).

Biomasa: Son materias primas utilizadas para la producción de biocombustibles y están compuestas por productos químicos lignocelulósicos (Bonassa et al., 2018).

Combustible fósil: Son recursos naturales no renovables, que actualmente son considerados como la principal fuente de energía que tienen numerosos efectos nocivos sobre el medio ambiente y cuyas las reservas se están agotando rápidamente (Choudhary, Panda y Behl, 2023).

Desarrollo sostenible: Se define como el desarrollo que cumple con los requisitos actuales al mismo tiempo que garantiza la capacidad de las próximas generaciones para cumplir con sus requisitos y considera tres dimensiones: sociedad, economía y ecología (Choudhary, Panda y Behl, 2023).

Eficiencia energética o térmica: Se define como la transferencia de energía del combustible al cuerpo receptor (Aristizábal Hernández, 2014).

Poder calorífico: Es la cantidad de energía liberada en forma de calor en un kilogramo, o en un metro cúbico de combustible durante el proceso de combustión completa. Puede expresarse como poder calorífico superior (PCS) o poder calorífico inferior (PCI), siendo el PCI el que considera el calor de condensación del agua presente en la biomasa (Ramírez Pinzón y Riaño Galán, 2022).

Reactor de pirólisis: Es un equipo que transfiere calor a través de procesos de conducción y convección, convirtiendo la energía de microondas en energía térmica mediante absorbentes de microondas, que se aplica en la pirólisis de biomasa (Duan et al., 2023; Mong et al., 2022).

III. HIPÓTESIS Y VARIABLES

3.1. Hipótesis

Hipótesis General

La aplicación de pirólisis asistida por microondas permite desarrollar la obtención de bioaceite de cascarilla de café.

Hipótesis Específicas

He₁: Los resultados de la caracterización de la cascarilla de café en base a su análisis elemental, proximal y contenido energético se encuentran dentro de los rangos establecidos en la literatura.

He₂: Existen condiciones del proceso de pirólisis asistida por microondas que permiten mejorar el rendimiento del bioaceite de cascarilla de café.

He₃: Las propiedades físicas del bioaceite de cascarilla de café con mejor rendimiento se encuentran dentro de los rangos establecidos: contenido de humedad entre 15% y 50%, viscosidad cinemática entre 25-1000m²/s, y una acidez entre los valores de 100-200 TAN.

He₄: Las propiedades energéticas del bioaceite de cascarilla de café con mejor rendimiento se encuentran dentro de los rangos establecidos: contenido de oxígeno entre 29% y 40%, y poder calorífico entre 15 MJ/kg y 19 MJ/kg.

3.1.1. Operacionalización de variables

Tabla 1

Matriz de Operacionalización de Variables

Variable	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensión	Indicador	Unidad	Técnica	Instrumentos
Variable Independiente: Pirólisis asistida por microondas	La pirólisis asistida por microondas de residuos orgánicos para la producción de bioaceite está influida por aspectos como (a) selección de la materia prima, (b), intensificación del proceso de calentamiento e (c) intensificación del proceso de pirólisis (Zhang et al., 2022).	La pirólisis asistida por microondas se evaluará considerando la materia prima, proceso de calentamiento y proceso de pirólisis; empleando los siguientes instrumentos: analizador elemental para los indicadores carbono, hidrógeno, nitrógeno y azufre; bomba calorimétrica para el indicador de poder calorífico; analizador termogravimétrico para los indicadores contenido de ceniza, humedad y materia volátil; y calculado para los indicadores oxígeno y carbono fijo.	Materia Prima	Carbono (C)	%	ASTM D5373/ Mét. A	Analizador elemental
				Hidrógeno (H)	%		
				Nitrógeno (N)	%		
				Oxígeno (O)	%	Calculado	
				Azufre (S)	%	ASTM D4239	
				Poder calorífico	MJ/kg	ASTM D5865-13	Bomba calorimétrica
				Contenido de ceniza	%		
				Humedad	%	ASTM D7582	Analizador Termogravimétrico
				Materia volátil	%		
				Carbono fijo	%	Calculado	Calculado
			Calentamiento por microondas	Potencia de Microondas	Wats	Calculado	Calculado
			Proceso de pirólisis	Temperatura de pirólisis	°C	Termopar tipo K	Termopar tipo K
				Dosificación de Absorbentes	%	Teórico	Teórico

Variable Dependiente: Bioaceite	El bioaceite es un líquido orgánico marrón oscuro que fluye libremente. El bioaceite obtenido de la pirólisis asistida por microondas de una biomasa es una mezcla de componentes de diferentes tamaños moleculares derivados de la despolimerización y fragmentación de la biomasa, por lo que tiene una composición, propiedades y características diferentes en comparación con los aceites diésel y los aceites de petróleo (Zhang et al., 2017).	El bioaceite se evaluará considerando las propiedades físicas y energéticas, empleando la técnica de método Karl Fischer para el indicador de humedad y su instrumento de medición valorador volumétrico; la técnica ASTM D-44 para el indicador de viscosidad y su instrumento de medición viscosímetro; la técnica ASTM D-664 para el indicador de pH y su instrumento de medición el potenciómetro; la técnica ASTM D-5291 para el indicador de oxígeno y su instrumento de medición el oxímetro; la técnica ASTM D 240 para el indicador de poder calorífico superior y su instrumento de medición la bomba calorimétrica.	Propiedades físicas	Humedad	%	Método Karl Fischer	Valorador Volumétrico
			Propiedades energéticas	Viscosidad cinemática	cSt	ASTM D-44	Viscosímetro
				pH	Unidad pH	ASTM D-664	Potenciómetro
				Oxígeno	%	ASTM D 5291	Oxímetro
			Propiedades energéticas	Poder calorífico superior	MJ/kg	ASTM D 240	Bomba calorimétrica

Nota: Elaboración propia.

IV. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

4.1. Diseño metodológico

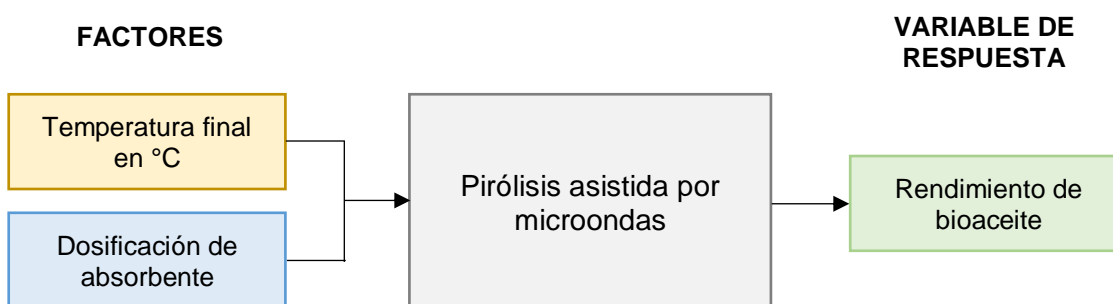
Para Hernández, Fernández y Bautista (2014), el tipo de investigación es aplicada porque el objetivo principal de la investigación es la aplicación práctica de los resultados obtenidos, es decir que busca desarrollar soluciones o mejoras concretas en un campo específico, en lugar de simplemente adquirir conocimientos teóricos.

Por otro lado, según su enfoque la investigación es cuantitativa porque se basa en análisis de datos numéricos y estadísticos para poder obtener resultados, permitiendo interpretar y determinar la significancia de los resultados (Hernández, Fernández y Bautista, 2014). Asimismo, el nivel de la investigación es explicativo, porque permite explicar y comprender la relación causal entre las variables que se estudian. También porque se va a requerir de realizar experimentos para establecer la relación entre las variables.

Por último, la investigación se clasifica como experimental del tipo puro debido a la manipulación de la variable independiente para ver el efecto en la variable dependiente o de respuesta (Hernández, Fernández y Bautista, 2014). Mientras que el corte de la investigación es transversal ya que, nuestra variable dependiente no tiene un pre-test. Ver Figura 1.

Figura 1

Diseño experimental



Nota: Elaboración propia.

Con el fin de establecer la temperatura pirolítica que mejora el rendimiento del bioaceite se establecieron los siguientes experimentos, descritos en la Tabla 2.

Tabla 2

Experimentos pirolíticos

% de susceptor	Temperatura	Rendimiento (%)
15	700	R1
17.5	700	R2
20	700	R3
15	600	R4
17.5	600	R5
20	600	R6
15	800	R7
17.5	800	R8
20	800	R9

Nota: Elaboración propia

4.2. Método de investigación

Para Deza Rivasplata y Muñoz Ledesma (2008), la investigación hipotética - deductiva es un método científico que se basa en la formulación de una hipótesis que pueda ser falsable mediante la observación empírica, es decir, que puede ser comprobada o refutada a través de la evidencia empírica.

4.2.1. Materiales, Insumos y Equipos

- Reactor pirolítico asistida por microondas, con una frecuencia de 2450 MHz.
- Cascarilla de café, como fuente de materia prima para el desarrollo de los experimentos, procedente de la empresa Aromas del Monzón S.A.C.
- Carburo de silicio (SiC), como absorbentes de microondas.
- Tamiz, malla metálica con 1.2 mm de dimensión, que permite clasificar partículas menores o igual a sus dimensiones nominales.
- Balanza electrónica de 6 kg de capacidad y 0,2 g de precisión.
- 2 termocuplas

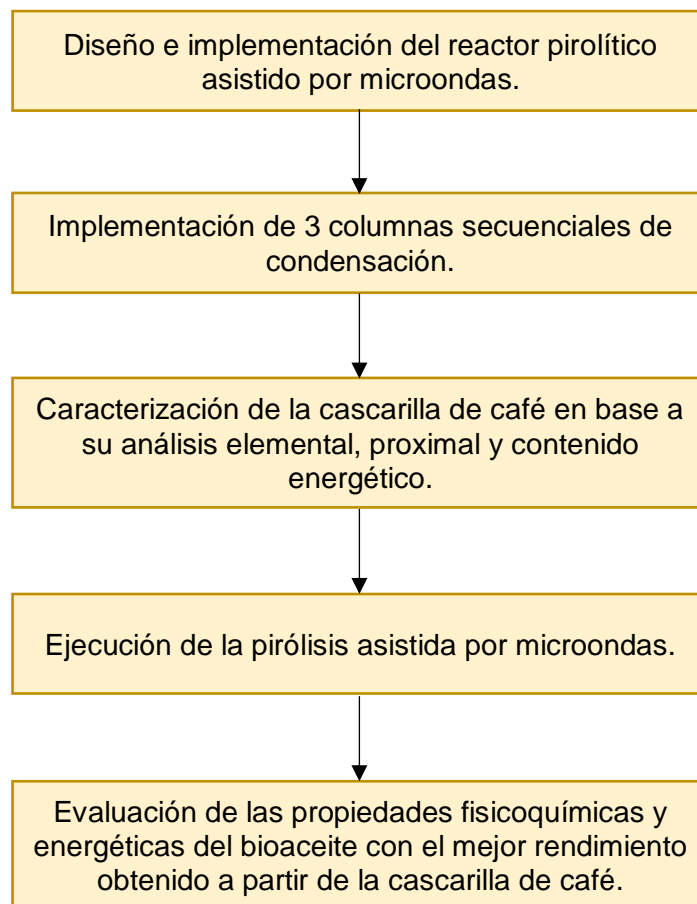
- Matraz de cuarzo de 3 bocas, de 500 ml de capacidad.
- Tanque de gas comprimido de N₂, de 2 m³ de capacidad.
- Caudalímetro.
- Condensadores de vidrio borodilicato.

4.2.2. Procedimiento

En la Figura 2, se presenta el procedimiento de la investigación.

Figura 2

Procedimiento de la Investigación



Nota: Elaboración propia

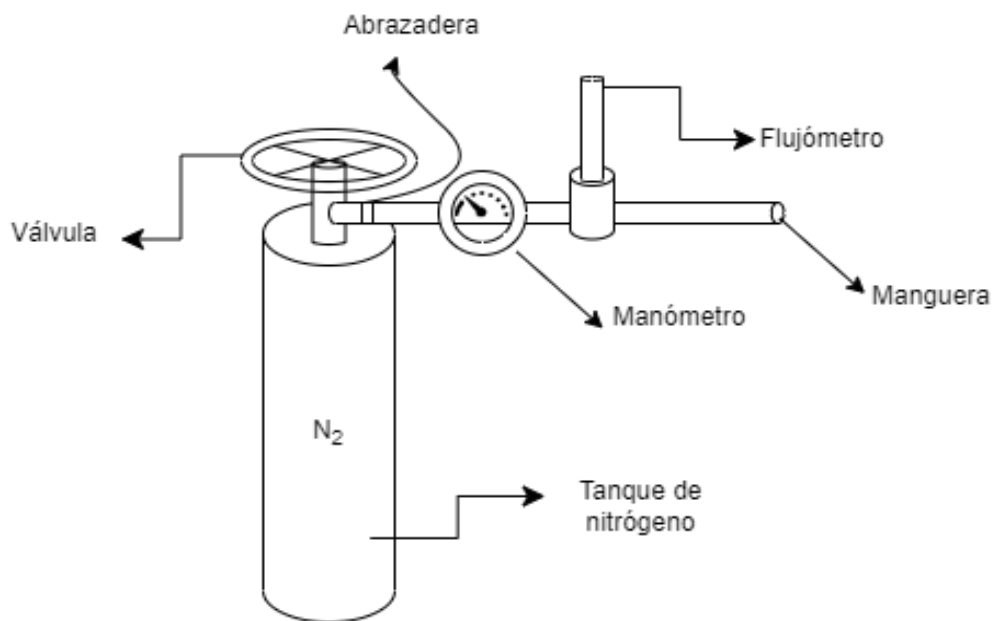
A continuación, se describen las actividades realizadas en el procedimiento.

Paso 1: Diseño e implementación del reactor pirolítico asistido por microondas

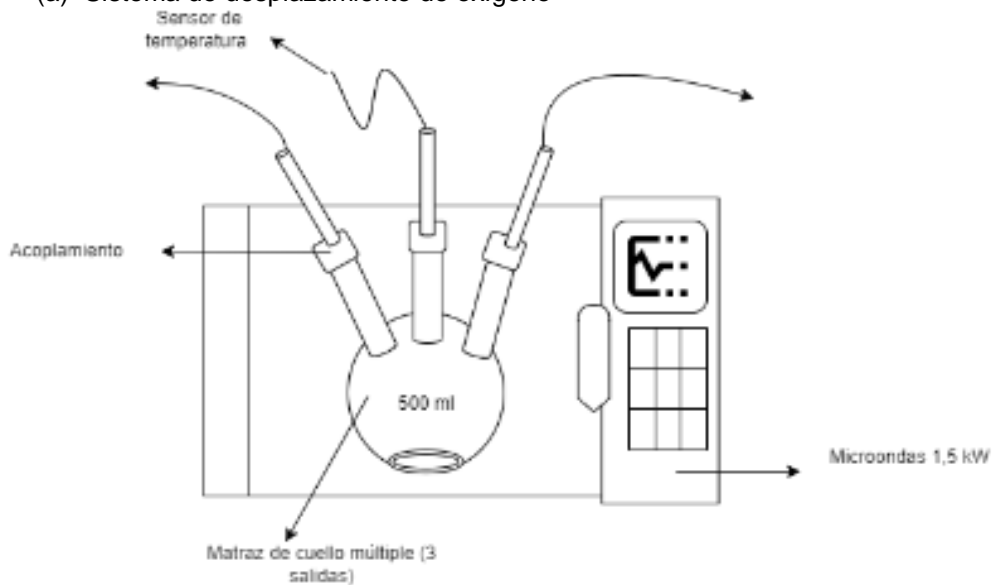
En la Figura 3, se presenta el diseño del reactor pirolítico asistido por microondas, basado en el diseño de (Bu et al., 2016).

Figura 3

Diseño del reactor de pirólisis



(a) Sistema de desplazamiento de oxígeno



(b) Sistema de reactor de microondas

El diseño del sistema de desplazamiento de oxígeno tiene los siguientes componentes:

- Tanque de N₂
- Válvula de salida del tanque con manómetro de control de presión del tanque
- Caudalímetro o flujómetro
- Mangueras de salidas de caudal

El *tanque de gas nitrógeno* tiene dos funciones:

1. Desplaza el oxígeno que se encuentra dentro del matraz de cuarzo a un flujo constante de 0.5 l/min y garantiza la ausencia de oxígeno en el proceso pirolítico.
2. Purga los vapores pirolíticos del reactor.

Por otro lado, el *caudalímetro* controla el flujo que sale del tanque de nitrógeno de aproximadamente 2 m³ de capacidad. Asimismo, este tanque está acoplado de un manómetro para registrar la presión que ejerce el tanque.

El diseño del sistema del reactor de microondas tiene los siguientes componentes

- Cavity de microondas multimodo (uso doméstico)
- Matraz de cuarzo de tres bocas
- Termocupla (Termopar tipo K) para la cavity microondas
- Termocupla (Termopar tipo K) para el reactor de cuarzo
- Controlador de temperatura (Arduino)
- Acoplamiento al sistema de desplazamiento de oxígeno
- Acoplamientos al sistema de condensadores

La cavity de microondas es la que irradia las ondas microondas al matraz de cuarzo, que es un material aislante o transparente. La cavity forma parte de un horno microondas doméstico ideal para pruebas de laboratorio a escala piloto. Los hornos domésticos trabajan a una potencia máxima de microondas de entre 900 W a 1500 W y una frecuencia establecida de microondas de 2.45 GHz, permitiendo tiempos de retención de hasta 30 minutos a máxima potencia. Cabe

resaltar que, la cavidad multimodo del microondas doméstico fue acoplada para la entrada del matraz de cuarzo y sus comunicaciones con el tanque de nitrógeno, la termocupla y el sistema de condensación.

El *matraz de cuarzo*, de tres bocas permite la carga de la biomasa a ser pirolizada, al ser un material resistente a altas temperaturas (hasta 1400°C) y transparente a las microondas, permite la interacción microondas y biomasa calentándola y produciendo vapores volátiles, que luego fueron desplazados por el flujo de nitrógeno a los condensadores. La primera boca está destinada para recibir el flujo de gas nitrógeno, mientras que la segunda permite la inserción de la termocupla y finalmente la tercera boca permite la salida de los compuestos orgánicos volátiles.

La *termocupla*, es un sensor de temperatura que permite registrar temperaturas de hasta 1200°C, que acoplado a un controlador (Arduino) permite el registro en tiempo real de la temperatura de la muestra. Por ello, según Salema, Afzal y Bennamoun (2017), se recomienda colocar el sensor de temperatura en contacto con la muestra de biomasa para obtener una temperatura precisa. Asimismo, también se implementó un a termocupla a la cavidad de microondas con el fin de controlar temperaturas que pudiesen dañar los componentes electrónicos del horno microondas.

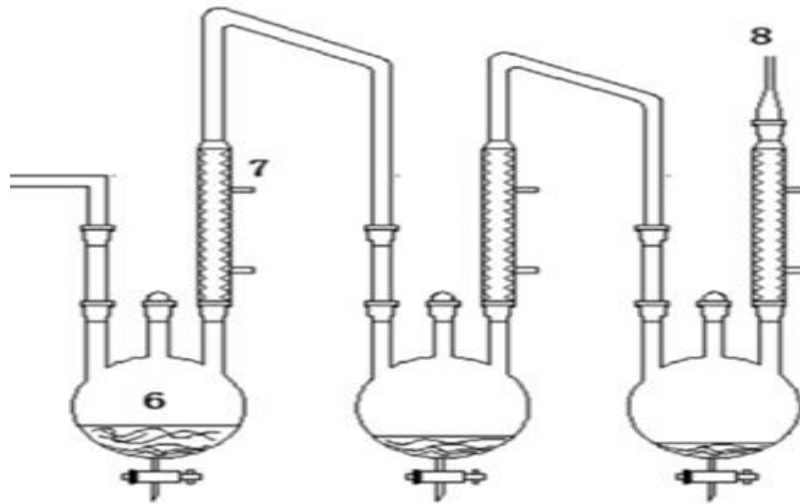
Paso 2: Implementación de tres columnas secuenciales de condensación.

El sistema de condensación, ver Figura 4, cuya función es recolectar los compuestos orgánicos volátiles condensables tiene los siguientes componentes.

- 3 balones de vidrio esmerilado 3 bocas c/llave de teflón ns 29/32-19/26 x 500 ml – Marca ISOLAB ALEMAN
- 6 mangueras de silicona 10x14 mm x metro – importado
- 3 tapas de vidrio hexagonal ns 29/32 - Marca ISOLAB ALEMAN
- 3 adaptadores para refrigerante ns 29/32 de 150mm – Marca ISOLAB ALEMAN
- refrigerante serpentín (coiled) esmerilado ns 29/32 x 250 mm – Marca ISOLAB ALEMAN

Figura 4

Sistema de condensación



Nota. basado en el diseño de (Bu et al., 2016)

El *líquido condensable* (bioaceite), precipita dentro de los matraces, en donde son almacenados hasta su análisis en laboratorio. Se debe tener en cuenta que las conexiones y tuberías del sistema son de borodilicato para resistir las elevadas temperaturas del proceso.

Los *condensadores* con columnas o intercambiadores de calor de vidrio borodilicato, donde el refrigerante a usar será agua a temperaturas entre 5 a 24°C.

Paso 3: Caracterización de la cascarilla de café en base a su análisis elemental, proximal y contenido energético

Se realizó el análisis elemental según las normas ASTM D5373/ Mét. A para el contenido de carbono, hidrógeno, nitrógeno, oxígeno y la norma ASTM D4239 para el contenido de azufre. Asimismo, el análisis proximal, se realizó con el fin de conocer el contenido de ceniza, contenido de humedad y materia volátil según la norma ASTM D7582, el carbono fijo se determinó por cálculo, mientras que, para el análisis de contenido energético se determinó el poder calorífico según la norma ASTM D5865-13. Estos análisis fueron realizados por el Laboratorio de Energía Renovables de la Universidad Nacional Agraria la Molina (UNALM), que está acreditado por INACAL.

Paso 4: Ejecución de la pirólisis asistida por microondas

El proceso de pirólisis rápida permite el calentamiento homogéneo y selectivo de materias primas con la ventaja de que no se requiere de un tratamiento previo como otros tipos de procesos de termoconversión. Después de realizado los análisis correspondientes, se utilizó la muestra de 2.26 Kg para realizar los tratamientos de cada experimento.

La pirólisis rápida es similar a la pirólisis lenta, en el sentido de que implica calentar la biomasa en ausencia de oxígeno. Sin embargo, a diferencia de la pirólisis lenta, la pirólisis rápida se lleva a cabo a altas velocidades de calentamiento ($\sim 1000 \text{ }^\circ\text{C s}^{-1}$), tiempos de residencia cortos y extinción rápida de los vapores para maximizar la producción del producto líquido, llamado bioaceite (Brewer y Brown, 2012). El objetivo principal de la pirólisis rápida es maximizar la producción de bioaceite. Por ello, en esta investigación se condicionó a un rango de temperatura de 600 a 900°C, lo cual se logró modulando la potencia del microondas.

Por otro lado, algunos materiales de carbono tienen la propiedad de absorber fácilmente las microondas, lo que permite su calentamiento rápido. El uso de estos materiales como absorbentes de microondas puede acelerar significativamente el proceso de calentamiento, logrando que la biomasa se caliente instantáneamente a la temperatura deseada utilizando esta novedosa técnica de calentamiento (Menéndez et al., 2010). El carburo de silicio (SiC), es uno de los absorbentes de microondas que se empleó en el experimento, debido a que tiene una alta capacidad de absorción de microondas, lo que significa que puede convertir eficientemente la energía de las microondas en calor, acelerando el proceso de pirólisis. Además, tiene una alta resistencia química y térmica, lo que lo hace capaz de soportar temperaturas extremadamente altas y medios corrosivos, pero, sobre todo, el SiC es un material relativamente económico y fácilmente disponible en el mercado, lo que la convierte en una opción rentable. Sobre la base de lo antes planteado, es que se pretende utilizar entre 2% a 10% de absorbente de microondas para garantizar una conversión más eficiente y obtener un mayor rendimiento de bioaceite.

Los resultados del peso de bioaceite se determinó midiendo la diferencia de peso del colector de bioaceite antes y después de cada experimento.

Paso 5: Propiedades físicas y energéticas del bioaceite de cascarilla de café con mejor rendimiento.

En esta etapa se midió el rendimiento del bioaceite obtenido con la siguiente ecuación:

$$\text{Rendimiento} = \frac{\text{Peso de producto obtenido}}{\text{Peso de materia prima utilizada}} \times 100\%$$

Donde:

- **Peso de producto obtenido:** Es el peso del bioaceite obtenido después del proceso de pirólisis asistida por microondas.
- **Peso de materia utilizada:** Es el peso de la biomasa inicial que se utiliza para llevar a cabo la pirólisis asistida por microondas.

Además de ello, el bioaceite obtenido con mejor rendimiento se envió al Laboratorio de Energía Renovables de la Universidad Nacional Agraria la Molina (UNALM), para determinar valores del parámetro de análisis elemental, las propiedades físicas y energéticas del bioaceite según el método de Karl Fisher para el contenido de humedad, la norma ASTM D-44 para la viscosidad cinemática, la norma ASTM D-664 para el pH, la norma ASTM D 5291 para el contenido de oxígeno y la norma ASTM D 240 para el poder calorífico superior.

4.3. Población y muestra

4.3.1. Población

La población es un conjunto total de elementos que poseen las características que se desea estudiar y que se encuentran delimitados por criterios establecidos previamente (Arias Gómez, Villasís Keever y Miranda Novales, 2016).

La población de la presente investigación fueron las 4 toneladas métricas de residuos de cascarilla de café que genera la Empresa Aromas del Monzón S.A.C. anualmente, perteneciente a la región de Huánuco, provincia de

Huamalíes. En la Figura 5 se puede observar la ubicación de la empresa aromas del Monzón.

Figura 5

Ubicación de la Empresa Aromas del Monzón S.A.C



Zona horaria	Este	Norte
18L	346312.18 m	8974033.33 m

Nota: Obtenida de Google Earth Pro.

4.3.2. Muestra

La muestra es un subconjunto de elementos seleccionados de una población, con el propósito de representar a la población y obtener información sobre ella. Para la presente investigación, se realizó el muestreo no probabilístico por conveniencia, en el cual los elementos de la muestra fueron seleccionados de manera no aleatoria, sino basándose en su disponibilidad y experiencia de los investigadores; son elementos que están fácilmente disponibles y dispuestos a participar en el momento que se realiza la investigación (Hernández Sampieri et al., 2014).

En relación con esto, la muestra estuvo conformada por 0.7425 kg de cascarilla de café, procedentes de la Empresa Aromas del Monzón S.A.C. Se requiere esta cantidad debido a que, la dosificación del absorbente varía en un rango entre 15% a 20% y este se mezcla proporcionalmente con la cascarilla de café para en conjunto dar un valor de 100 gr para los 9 tratamientos.

4.4. Lugar de estudio y periodo de desarrollo

La parte experimental de la investigación se realizó en el laboratorio de fisicoquímica de la Facultad de Ingeniería Ambiental y Recursos Naturales de la Universidad Nacional del Callao.

Los análisis de laboratorio, para la caracterización de la cascarilla de café y del bioaceite se realizaron en el Laboratorio de Energías Renovables de la Universidad Nacional Agraria La Molina.

Figura 6

Ubicación del Lugar de estudio – Universidad Nacional del Callao



Nota: Obtenida de Google Earth Pro.

4.5. Técnicas e instrumentos para la recolección de la información

4.5.1. Técnica

Las técnicas de recolección de información empleadas para el desarrollo de la investigación fueron:

- **Análisis de documentos:**

El análisis de documentos implica un proceso analítico-sintético que consistió en revisar literatura científica de libros, informes, tesis, artículos científicos y otros recursos bibliográficos. La información recolectada nos permitió obtener información relevante sobre nuestro tema de estudio.

- **Observación:**

Esta técnica se basa en la recopilación sistemática y directa de información a través de la información cuidadosa y detallada de eventos. En este estudio los datos caracterización de la materia prima, el rendimiento de bioaceite en el proceso pirolítico y las propiedades fisicoquímicas y energéticas del bioaceite fueron recopilados a través de la observación sistemática de los métodos de medición o análisis de estos parámetros.

4.5.2. Instrumentos de recolección de información

Para la recolección de información se emplearon instrumentos adecuados al tipo de investigación, los cuales se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 3

Técnica e Instrumento de recolección de datos

Técnica	Instrumento de recolección de datos
Observación	Ficha: A. Análisis elemental, proximal y contenido energético de la cascarilla de café (Anexo 2). B. Condiciones del proceso de pirólisis asistida por microondas (Anexo 2). C. Propiedades físicas y energéticas del bioaceite de cascarilla de café con mejor rendimiento (Anexo 2).

Nota: Elaboración propia.

La validez de las fichas de recolección de datos se garantizó por medio de expertos en el tema, se consideró a 3 especialistas con una formación de Ingeniero titulado y colegiado, con más de 2 años de experiencia en el campo de estudio.

El equipo de expertos evaluó minuciosamente cada indicador de las fichas de recolección de datos, considerando términos como: claridad, objetividad, actualidad, organización, suficiencia, intencionalidad, consistencia, coherencia, metodología y pertinencia del constructo. Luego de este proceso, los expertos emitieron su informe de juicio validando dichas fichas (Anexo 3).

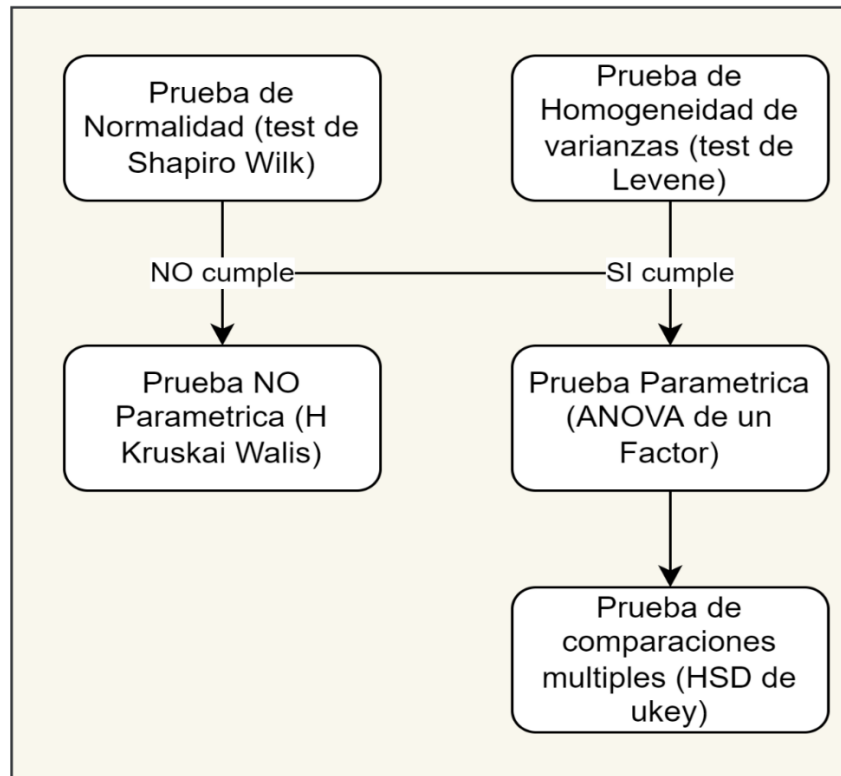
4.6. Análisis y procesamiento de datos

Para la caracterización de la materia prima y evaluación de las propiedades fisicoquímicas y energéticas del bioaceite pirolítico se hizo uso de la estadística descriptiva, representada mediante diagrama de barras.

Por otro lado, para determinar las mejores condiciones (temperatura y % de susceptor) que permiten el mejor rendimiento del bioaceite, primero se realizó un análisis que nos ayudó a determinar el comportamiento de los datos en cada grupo (600, 700 y 800°C). Se pusieron a prueba los dos supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas, para luego establecer diferencias significativas con ayuda de la prueba paramétrica (ANOVA de un Factor), y consecuentemente ubicar cual es el grupo con mayor diferencia con las pruebas de comparaciones múltiples HSD Tukey. En la siguiente grafica se puede observar la ruta por la cual se siguió el análisis inferencial del rendimiento.

Figura 7

Procedimiento estadístico inferencial



4.7. Aspectos éticos de la investigación

La investigación se redactó en cumplimiento de la norma internacional ISO 690, lo que garantiza el cumplimiento de los aspectos éticos en el contenido del estudio que contiene citas, enunciados y apartados con procedencia de autores reconocidos, sin omitir ningún aspecto importante en su desarrollo. Además, se cumplió con la estructura establecida el Anexo 5 de la directiva N° 004-2022-R “Directiva para la elaboración de proyecto e informe final de investigación de pregrado, postgrado, equipos, centros e institutos de investigación”, aprobada por la resolución N° 319-2022-R de la Universidad Nacional del Callao.

Para obtener la muestra cascarilla de café de la empresa Aromas del Monzón S.A.C. se obtuvo el consentimiento informado del Gerente General y se aseguró que la adquisición no represente un riesgo para el medio ambiente (Ver Anexo 4).

V. RESULTADOS

5.1. Resultados descriptivos

5.1.1. Caracterización de la cascarilla de café

Se caracterizó la cascarilla de café en función de sus parámetros del análisis elemental, proximal y de contenido energético. En la Tabla 4, se muestran los resultados de cada análisis, adicionalmente se estableció el índice de combustibilidad y las relaciones atómicas H/C y O/C.

- El índice de combustibilidad (IC)

$$IC = \frac{MV}{CF}$$

Se determina por el cociente entre el porcentaje en masa de materia volátil (MV) y el porcentaje en masa de carbono fijo (CF).

- Relación H/C

$$\frac{H}{C} = \frac{(\%H/M_H)}{(\%C/M_C)}$$

- Relación O/C

$$\frac{O}{C} = \frac{(\%O/M_O)}{(\%C/M_C)}$$

Donde %H, %O y %C, es el contenido de hidrógeno, oxígeno y carbono en la muestra respectivamente y M_H , M_O y M_C es el peso atómico del hidrógeno, oxígeno y carbono respectivamente.

Tabla 4*Análisis Elemental, Proximal y Contenido Energético*

Parámetro	Unidad	Resultados de Laboratorio
Análisis elemental		
C	%	44.08
H	%	6.73
N	%	0.20
O	%	48.20
S	%	0.11
H/C	-	1.82
O/C	-	0.82
Análisis proximal		
Ceniza	%	0.60
Humedad	%	12.16
Materia volátil	%	74.36
Carbono fijo ⁽¹⁾	%	12.89
IC	-	5.77
Análisis energético		
Poder calorífico superior	MJ/kg ⁽²⁾	17.83

Nota: Elaboración propia

(1) El carbono fijo se determina por diferencia a partir de los parámetros ceniza, humedad y materia volátil.

(2) MJ/kg: Megajoule por kilogramo

El análisis de las relaciones atómicas H/C y O/C se utiliza para evaluar el incremento del poder calorífico y el potencial energético de los residuos. El índice de combustibilidad (IC) es un parámetro importante para determinar el potencial de un residuo como combustible. Se sabe que valores bajo de IC y la relación H/C indican que la biomasa puede presentar mayores porcentajes de carbono fijo, lo que contribuye a tiempos de combustión más prolongadas y a un mayor poder calorífico. Por otro lado, una mayor relación atómica de O/C disminuye el poder calorífico de la materia prima, lo que confirma el hecho de que un alto contenido de oxígeno dificulta la transformación de los residuos en combustibles líquidos en el proceso de pirolisis.

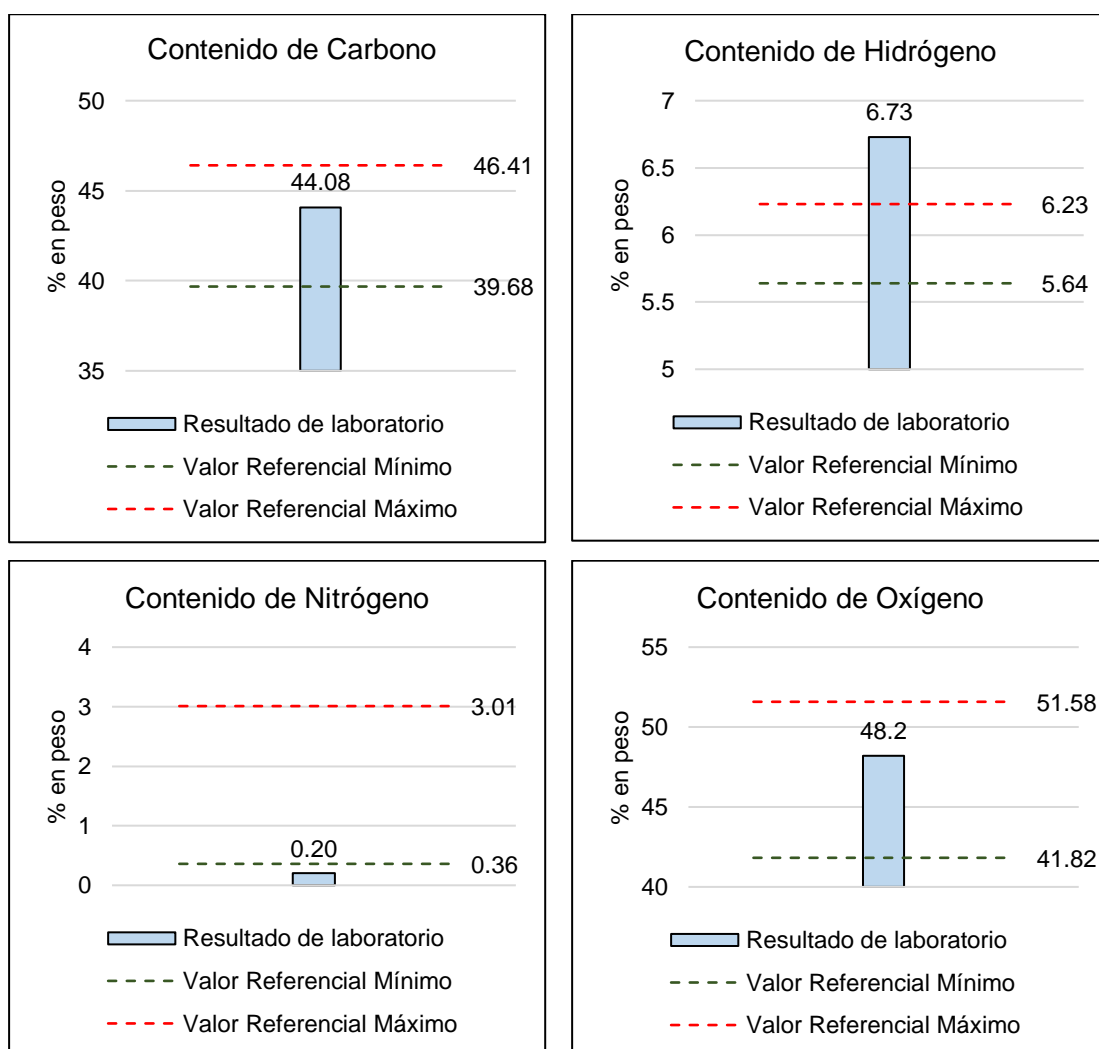
Según la tabla anterior el índice de combustibilidad tiene un valor de 5.77, lo que indica que la cascarilla de café tiene una facilidad de encenderse (punto de

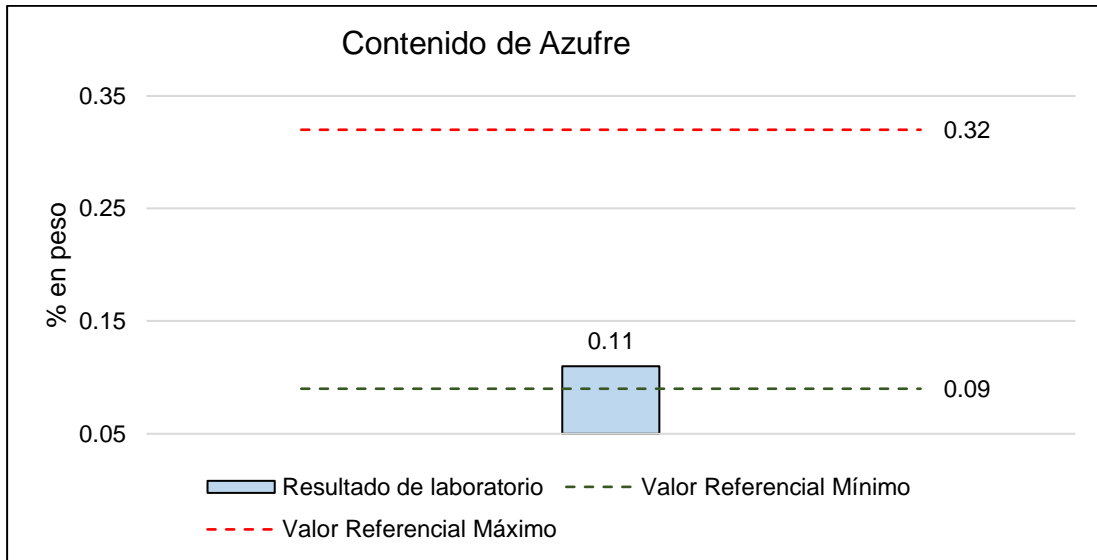
ignición bajo) y una mayor estabilidad en la llama, debido a que el porcentaje (%) de materia volátil es superior al porcentaje de carbono fijo.

En la Figura 8 se representa el contenido de cada parámetro del análisis elemental de cascarilla de café y se comparan con rangos de valores establecidos en la teoría.

Figura 8

Gráficas de los parámetros del análisis elemental de cascarilla de café

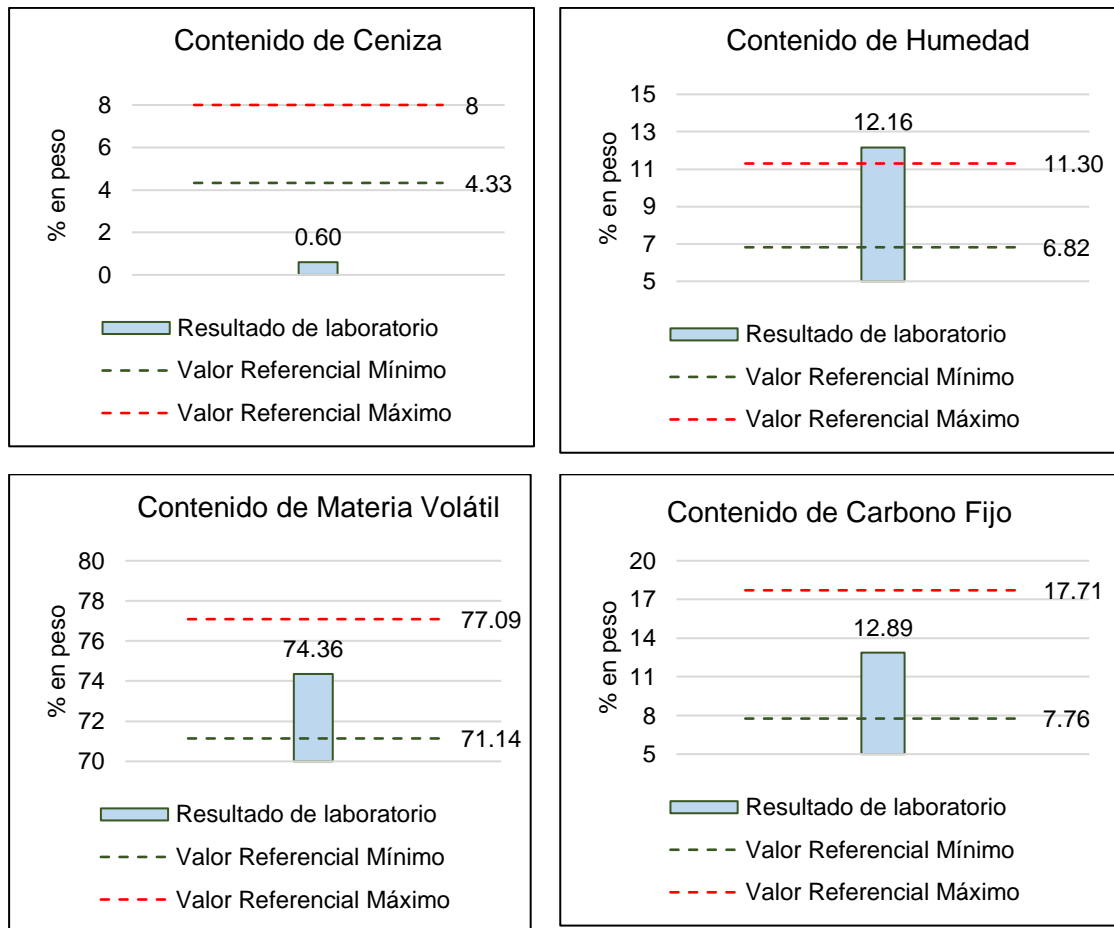




El potencial contaminante siempre es analizado en función de la suma del contenido de azufre y nitrógeno en la mezcla agrupándolos en un solo porcentaje, esto debido a que el azufre es el precursor de óxidos sulfúricos (SOx) y el nitrógeno de óxidos de nitrógeno (NOx), gases contaminantes del medio ambiente. Se asume aceptable un contenido de azufre y nitrógeno total menor al 2% (Rojas, Flores y Lopez, 2019), por lo que en nuestros resultados se observa un total de 0.31% muy inferior al límite establecido. Asimismo, un alto contenido de oxígeno perjudica el poder calorífico de materia prima y dificulta la transformación de la biomasa en biocombustible líquido en este caso de bioaceite durante la pirolisis, nuestros resultados muestran un contenido de oxígeno dentro de los límites establecidos. Por otro lado, el contenido de carbono está relacionado con el porcentaje de carbono fijo en la biomasa, este contenido se encuentra dentro de los límites establecidos. Además, se sabe que el contenido de hidrógeno de la materia prima está relacionado con un alto contenido de materia volátil del residuo que contribuye a una combustión más reactiva y a la producción de la fracción gaseosa en el proceso pirolítico.

Figura 9

Gráficas de los parámetros del análisis proximal de CC

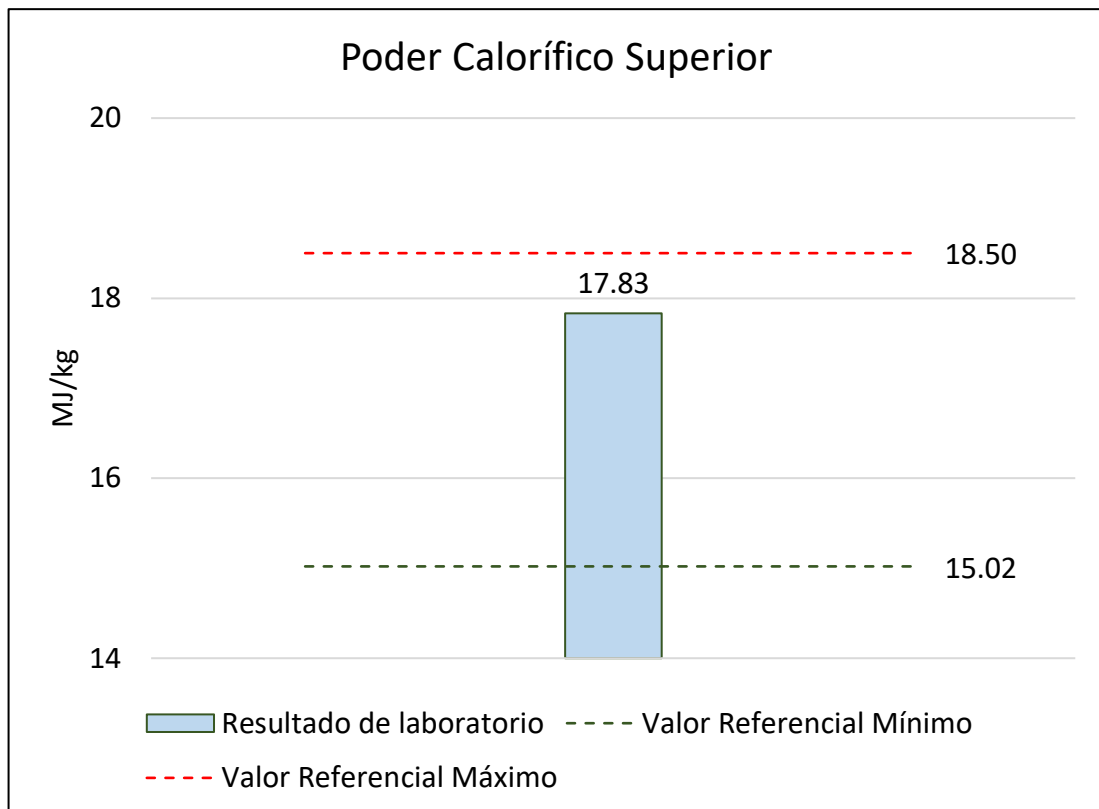


El contenido de ceniza tiene una relación inversa con el poder calorífico de la materia prima, en los resultados se observa que el contenido de ceniza es bajo del orden del 0.6%, lo que lo hace ideal para ser utilizados en procesos termoquímicos. En cuanto al contenido de materia volátil en la biomasa, se conoce que a mayor contenido de materia volátil disminuye la temperatura de ignición de la materia prima, lo que se traduce en una mayor reactividad a la combustión, los resultados demuestran un buen porcentaje de materia volátil de aproximadamente 75%. Con respecto al contenido de humedad se conoce que contenidos mayores a 50% dificultan la combustión de un residuo, afectando negativamente el poder calorífico en proceso de gasificación y combustión, esto debido a que la energía para evaporar un kg de agua es equivalente con la energía que posee un kg de materia prima. Se conoce que, para lograr

aprovechamientos óptimos de la biomasa en la combustión, estas deben ser menores al 8%, por lo que la cascarilla de café cumple con esas recomendaciones.

Figura 10

Poder Calorífico Superior expresado en MJ/kg



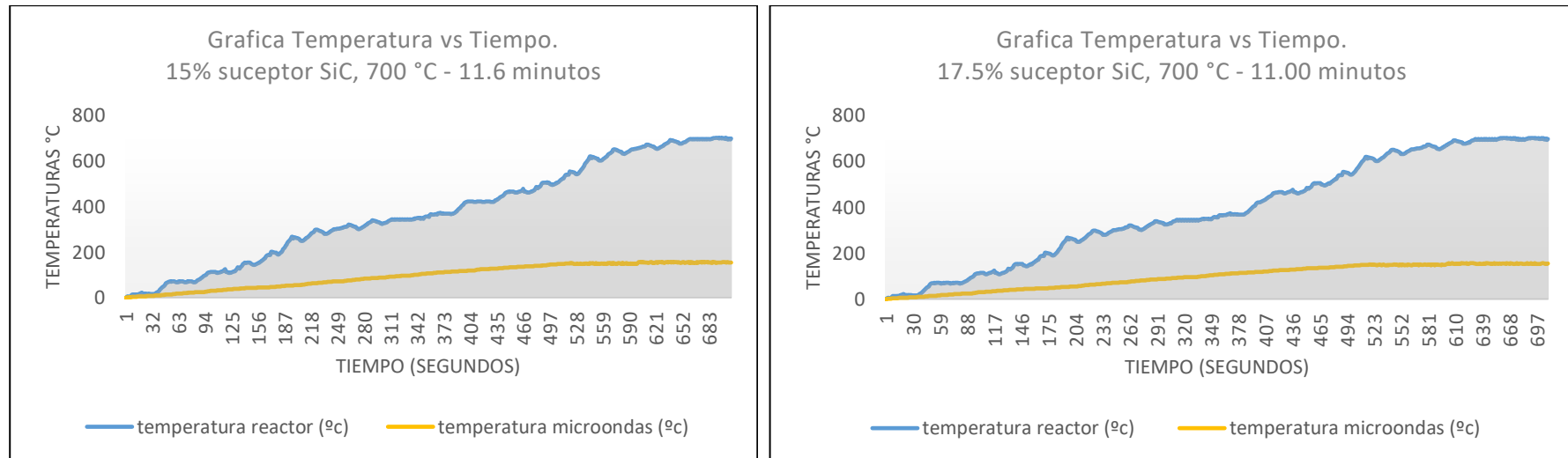
El poder calorífico o contenido energético representa la medida de la energía contenida en la cascarilla de café, este contenido energético depende de humedad, ceniza, CF y MV. Como dato importante tener en cuenta que el aumento en un 1% del contenido de ceniza disminuye el poder calorífico en aproximadamente 0.2 MJ/Kg (DEMIRBAS, 2004).

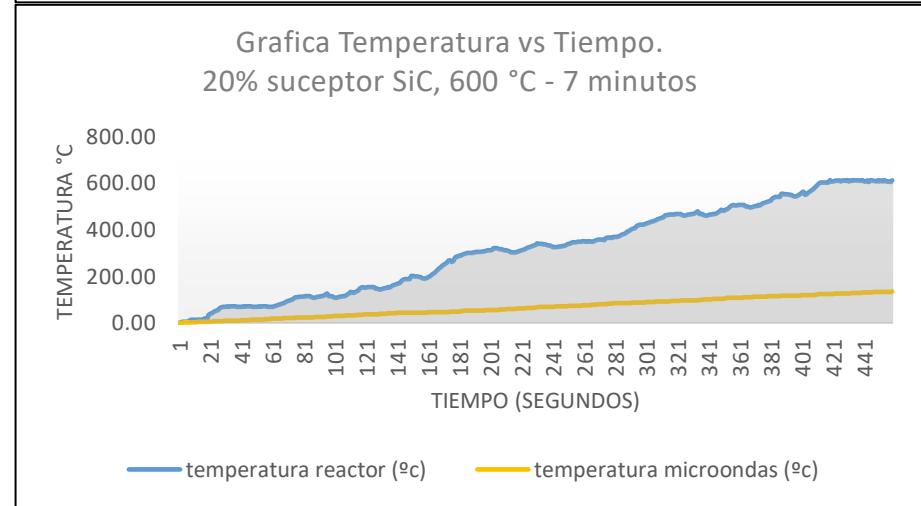
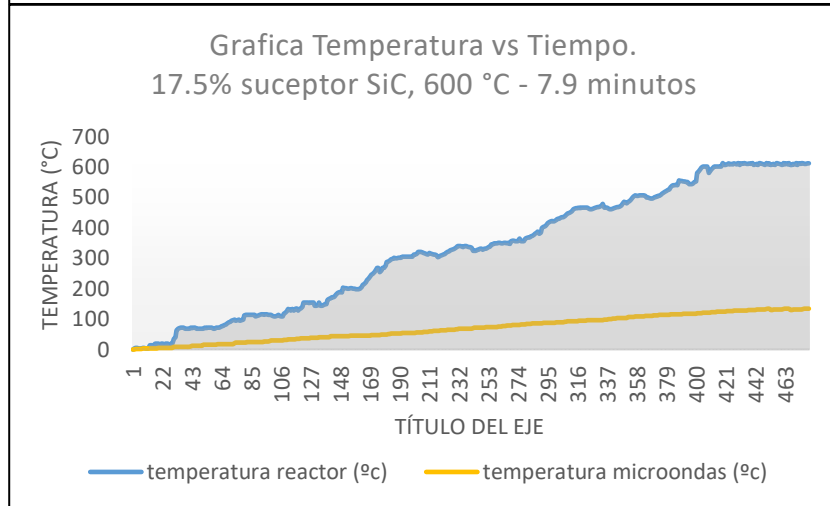
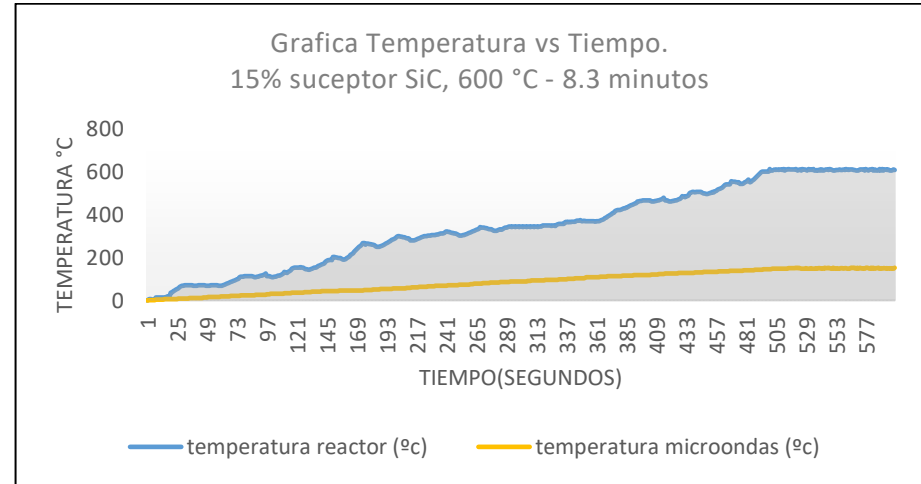
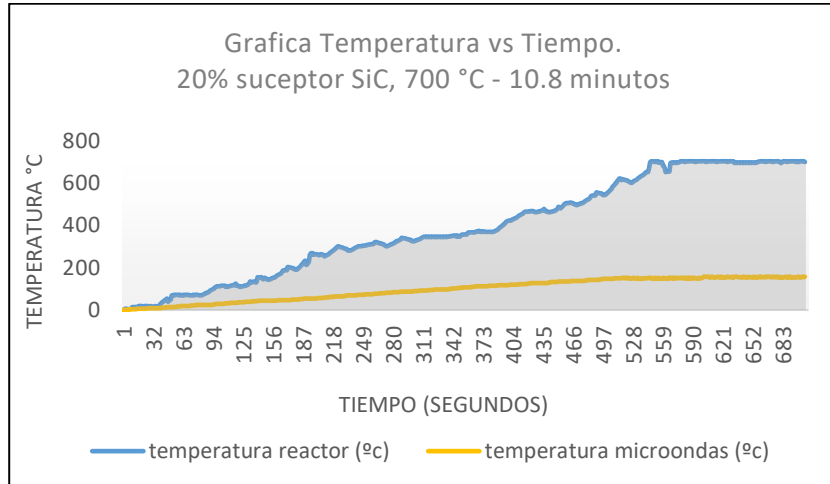
5.1.2. Comportamiento de la temperatura de pirolisis

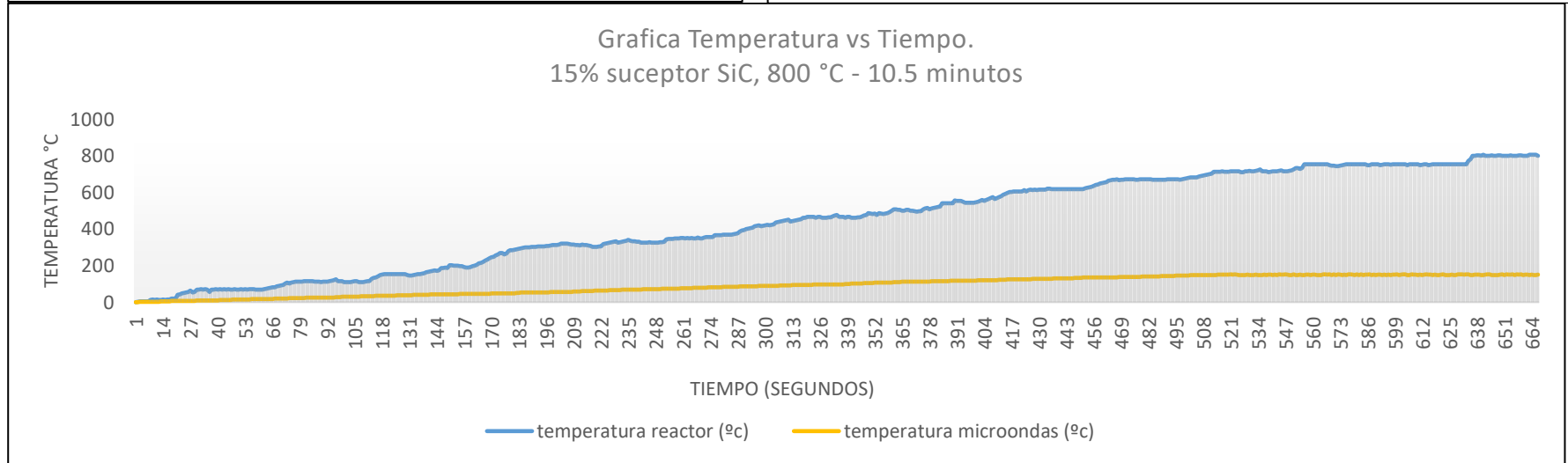
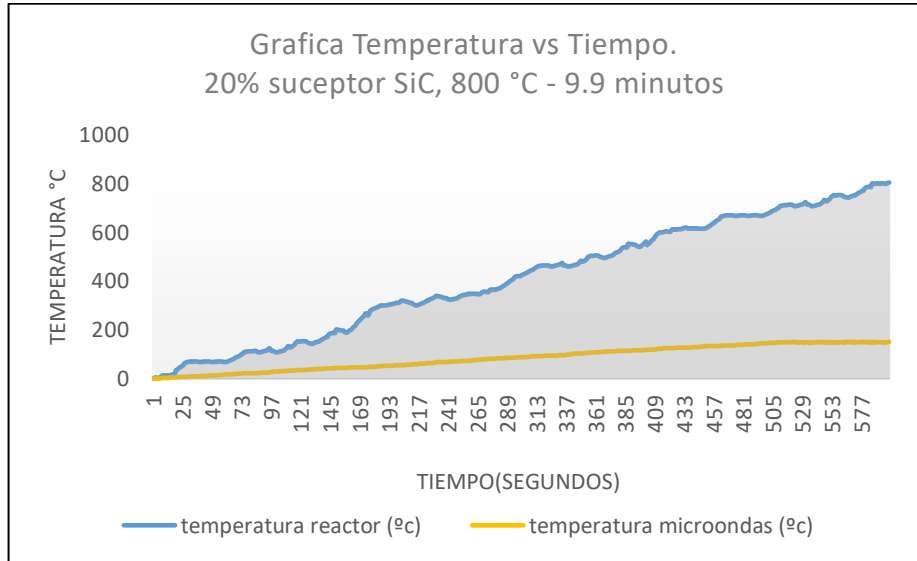
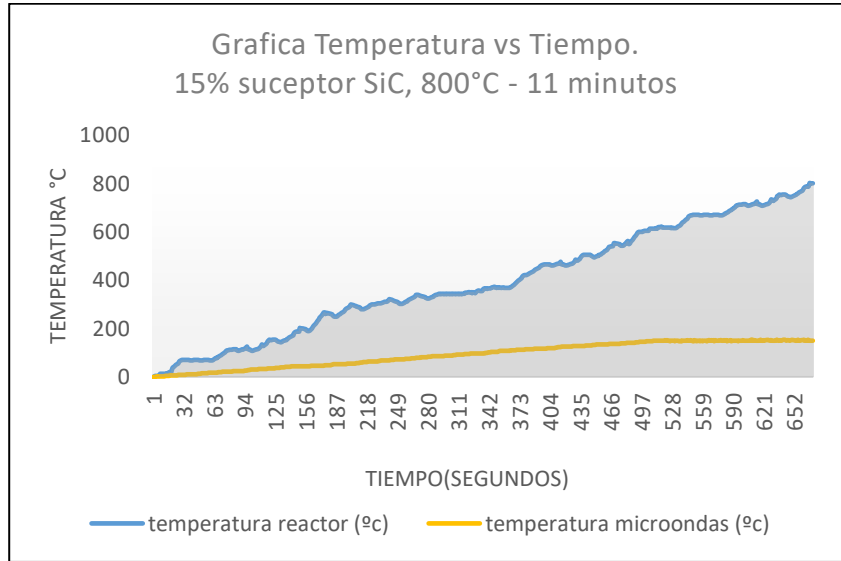
En las siguientes graficas se representan como se comportó la temperatura del reactor pirolítico y de la cavidad multimodo, en cada experimento hasta lograr la temperatura objetivo; tener en cuenta que se trabajó a una potencia establecida de 1050 W, que representó el 70% de la potencia total aplicada en la cavidad de microondas (1500W); asimismo para mantener la temperatura contante se redujo la potencia hasta el 10% de la potencia total.

Figura 11

Gráficas de temperatura vs tiempo en cada reacción







5.1.3. Caracterización de las propiedades fisicoquímicas del bioaceite de cascarilla con mejor rendimiento

La fracción líquida obtenida por los condensadores secuenciales del proceso pirolítico, fueron abalizadas en función a parámetros del análisis proximal, acidez viscosidad y contenido de humedad, tal y como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 5

Prueba ANOVA de un solo factor para el rendimiento

Parámetros	Unidad	Resultado de Laboratorio
		Bioaceite (fase acuosa)
Análisis del aceite		
Número de Acidez	mg KOH/g (TAN)	97
Viscosidad cinemática	mm ² /s	2.02
Contenido de Humedad	% (m/m)	13.73
Análisis elemental		
Carbono	% (m/m)	12.43
Hidrógeno	% (m/m)	7.33
Nitrógeno	% (m/m)	0.09
Oxígeno	% (m/m)	80.1
Azufre	% (m/m)	0.04
H/C	-	7.03
O/C	-	4.84

Nota: Elaboración propia

(1) Referencia bibliográfica del poder calorífico de Yu et al., (2007) y el oxígeno de Zhang et al., (2017).

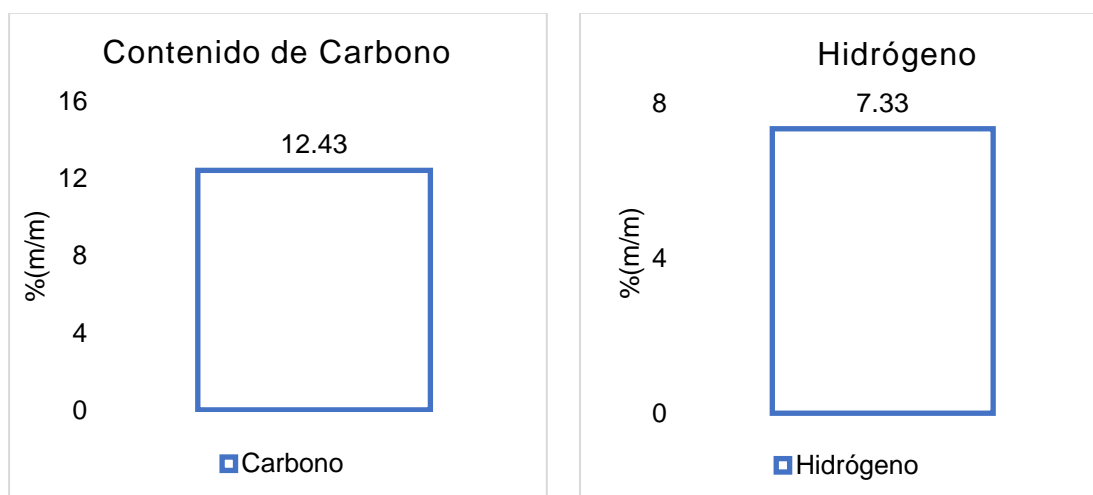
(2) MJ/kg: Megajoule por kilogramo

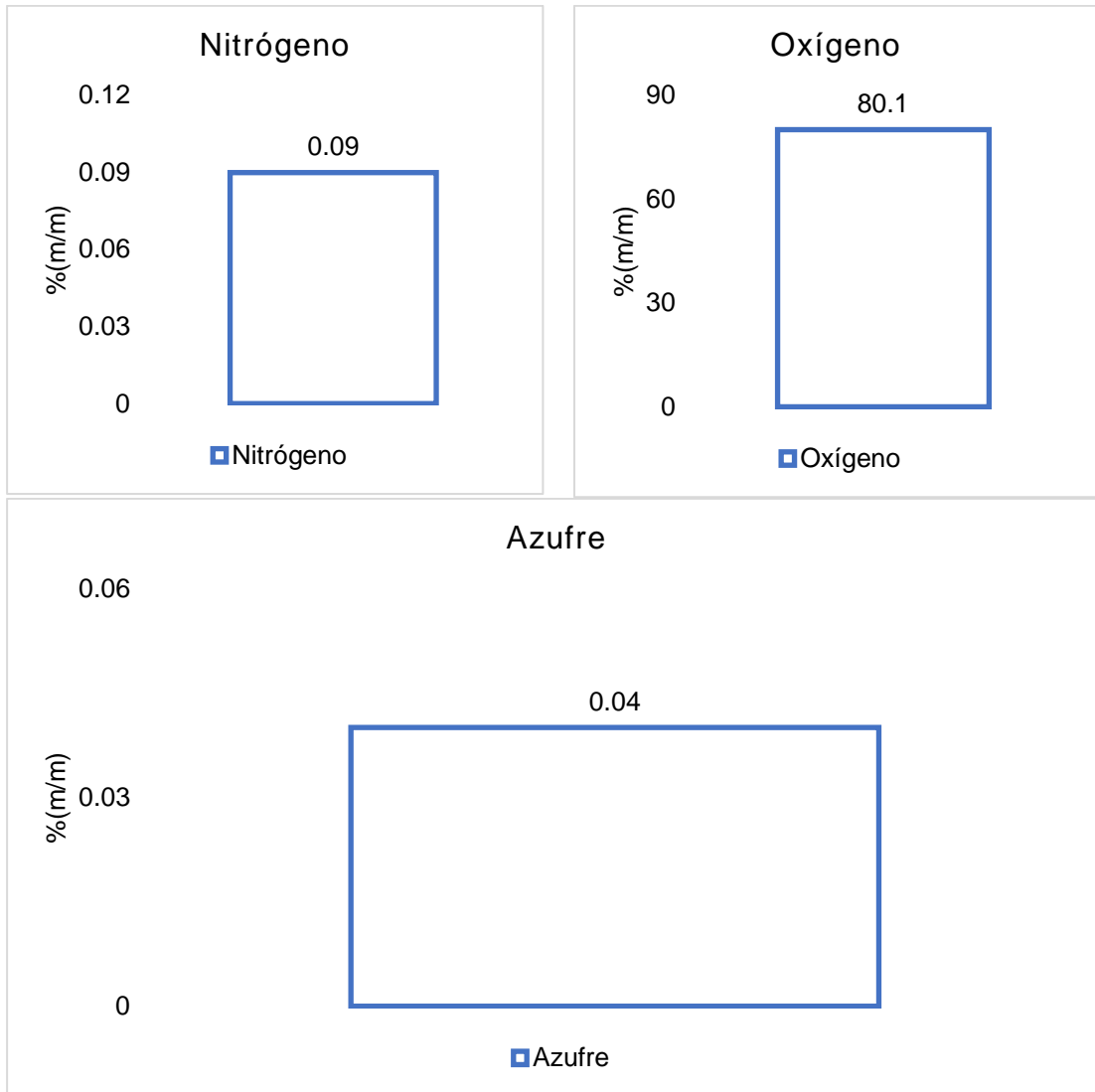
La humedad del bioaceite se refiere al contenido de agua presente en el líquido. Un contenido de humedad más alto puede afectar negativamente la calidad y el valor energético del bioaceite. La presencia de agua puede disminuir el poder calorífico y la estabilidad del bioaceite, lo que puede requerir un mayor procesamiento para su uso como combustible. Es deseable que el contenido de humedad del bioaceite sea lo más bajo posible, en la tabla anterior se puede observar un contenido de humedad en la fase acuosa del bioaceite igual a

13.73%. La viscosidad cinemática del bioaceite es una medida de su resistencia al flujo. Una viscosidad más alta significa que el bioaceite es más espeso y pegajoso, lo que puede dificultar su manejo y uso. La viscosidad del bioaceite está influenciada por varios factores, incluida el tipo de biomasa lignocelulósica y temperatura. Los resultados de viscosidad en la tabla anterior muestran un valor de 2.02 mm²/s. Por otro lado, el número de acidez se expresa como el valor de neutralización, es decir, los mg de hidróxido de potasio (KOH) necesarios para neutralizar ácidos en 1g de aceite, denominado alcalinidad o número de ácido total (TAN). Dicho de otro modo, representa la medida de la acidez total presente en el aceite. Los resultados de nuestra investigación muestran un número de acidez igual a 97 TAN. En general, a medida que el valor del contenido de humedad del bioaceite es bajo, su viscosidad también tiende a hacerlo; lo cual se cumple con los resultados mostrados.

Figura 12

Gráficas de los parámetros del análisis elemental del bioaceite (Fase acuosa)





Como se puede observar en la figura anterior el contenido de carbono es mucho menor a su materia prima precursora con un valor de 12.43%, por otro lado, el hidrógeno tiene valores muy cercanos a la CC con un 7.33%. Sin embargo, el contenido de oxígeno aumento hasta 80.1%, aproximadamente el doble del contenido de oxígeno de su materia prima predecesora. El alto contenido de oxígeno genera una mayor relación atómica de O/C que reduce el poder calorífico del bioaceite, lo que confirma el hecho de que un alto contenido de oxígeno dificulta la combustión del biocombustible líquido. Asimismo, el contenido de nitrógeno y azufre en el bioaceite, predecesores de gases contaminantes es menor que la cascarilla de café, por lo que no existe riesgo de grandes emisiones toxicas de estos gases.

5.1.4. Caracterización de las propiedades energéticas del bioaceite de cascarilla con mejor rendimiento

En la Tabla 6 y Figura 12 se muestran los resultados de las propiedades energéticas del bioaceite obtenido de la cascarilla de café con mejor rendimiento mediante la pirólisis asistida por microondas. Estos valores se compararon con otras investigaciones y se observó que todos los parámetros se encontraron dentro del rango de los valores referenciales establecidos.

Tabla 6

Propiedades energéticas del bioaceite con mejor rendimiento

Parámetros	Unidad	Resultado de Laboratorio	Valores Referenciales ¹
		Bioaceite	Bioaceite convencional
Propiedades energéticas			
Oxígeno (O)	%	80.1	29 - 40
Poder calorífico inferior	MJ/kg ²	0.9	15 -19

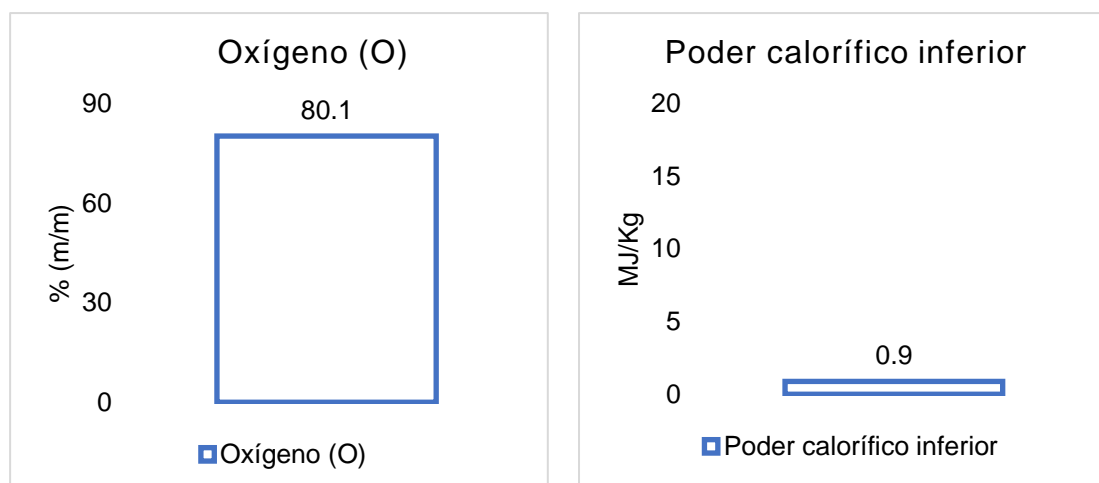
Nota: Elaboración propia.

(1) Referencia bibliográfica del poder calorífico de Yu et al., (2007) y el oxígeno de Zhang et al., (2017).

(2) MJ/kg: Megajoule por kilogramo

Figura 13

Gráficas de los parámetros del análisis elemental del bioaceite (Fase acuosa)



El contenido de oxígeno en el bioaceite es una propiedad importante que puede influir en su valor energético. El bioaceite típicamente contiene oxígeno en forma de grupos funcionales, como hidroxilos y ésteres. Cuanto mayor sea el contenido de oxígeno, menor será el poder calorífico superior del bioaceite, lo que implica una menor capacidad para liberar energía durante la combustión. En nuestra investigación el contenido de oxígeno es igual a 80.1% representando un valor elevado en comparación a su materia prima precursora cascarilla de café, con un contenido de oxígeno de 48.2%.

El poder calorífico superior (PCS) es una medida de la cantidad de calor liberado durante la combustión completa de una unidad de masa de combustible. Indica la capacidad del bioaceite para liberar energía cuando se quema como combustible.

5.2. Resultados Inferenciales

En este apartado se utilizó las pruebas estadísticas inferenciales para evaluar cuales son las condiciones de temperatura, ver Tabla 7, que mejoran el rendimiento del bioaceite

Tabla 7

Rendimientos del bioaceite

% de susceptor	Temperatura	Rendimiento (%)
15	700	17.2
17.5	700	17.9
20	700	18.3
15	600	15.2
17.5	600	16.3
20	600	15.1
15	800	16.9
17.5	800	17.4
20	800	17.1

Nota: Datos procesados en el software estadístico SPSS V 25

Para establecer diferencias de rendimiento en cada tratamiento, en primer lugar, se estableció los supuestos de normalidad (prueba de Shapiro Wilk) y homogeneidad de varianzas (prueba de Levene) en cada grupo de datos, para luego determinar la prueba de normalidad a utilizar.

Tabla 8

Prueba de Normalidad y homogeneidad de varianza

Temperatura	Shapiro-Wilk			Prueba de Levene	
	Estadístico	gl	p valor	Estadístico	p valor
600° C	0.812	3	0.144		
700° C	0.976	3	0.702	1.887	0.231
800° C	0.978	3	0.780		

Nota: datos procesados en el software estadístico SPSS V 25

Según la tabla anterior se puede observar que todos los grupos de datos tienen distribución normal, pues poseen un p valor mayor a 0.05, así mismo existe homogeneidad de varianzas entre grupos, (p valor > 0.05)

Una vez comprobados los supuestos de normalidad y homogeneidad se optó por realizar la prueba paramétrica ANOVA para un solo factor que es la temperatura:

Tabla 9

Prueba ANOVA de un solo factor para el rendimiento

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	p valor
Entre grupos	8.142	2	4.071	14.955	0.005

Nota: datos procesados en el software estadístico SPSS V 25

De la tabla anterior se puede interpretar que, si existen diferencias de rendimiento entre los diferentes grupos, esto debido a un p valor igual a 0.005 menor que la significancia establecida de 0.05. Por otro lado, para establecer cuál de estos tres grupos es el diferente, se realiza las pruebas POS HOC o de comparaciones múltiples, tal y como se observa en la Tabla 10.

Tabla 10*Prueba ANOVA de un solo factor para el rendimiento*

Temperatura		Diferencia de medias (I-J)	Desv. Error	p valor
600° C	700° C	-2,2667*	0.4260	0.004
	800° C	-1,6000*	0.4260	0.022
700° C	600° C	2,2667*	0.4260	0.004
	800° C	0.6667	0.4260	0.329
800° C	600° C	1,6000*	0.4260	0.022
	700° C	-0.6667	0.4260	0.329

Nota: datos procesados en el software estadístico SPSS V 25

De la tabla anterior se puede inferir que el rendimiento del bioaceite a 700°C es mayor a 600°C y 800°C, así mismo el rendimiento a 800°C es mayor al de 600°C, por lo tanto, se puede establecer que las temperaturas que tienen el mejor rendimiento tienen el siguiente orden 700°C > 800°C > 600°C.

VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.1. Contratación y demostración de la hipótesis con los resultados

6.1.1. Contrastación de la hipótesis general

Ho: La aplicación de pirólisis asistida por microondas no permite obtener bioaceite de cascarilla de café.

Ha: La aplicación de pirólisis asistida por microondas permite obtener bioaceite de cascarilla de café.

Los resultados obtenidos demuestran que es posible y viable obtener bioaceite de cascarilla de café mediante pirólisis asistida por microondas. Por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alterna de que “La aplicación de pirólisis asistida por microondas permite obtener bioaceite de cascarilla de café”.

6.1.2. Contrastación con la hipótesis específica 1

Ho₁: Los resultados de la caracterización de la cascarilla de café en base a su análisis elemental, proximal y contenido energético no se encuentran dentro de los rangos establecidos en la literatura.

Ha₁: Los resultados de la caracterización de la cascarilla de café en base a su análisis elemental, proximal y contenido energético se encuentran dentro de los rangos establecidos en la literatura.

Los resultados de la caracterización de la cascarilla de café en base a su análisis elemental, proximal y contenido energético fueron comparados con los rangos establecidos en la literatura. En cuanto al análisis elemental, se encontró que la muestra de cascarilla de café presenta un contenido de carbono de 44.08%, hidrógeno de 6.73%, nitrógeno de 0.20%, oxígeno de 48.20% y azufre de 0.11%. Los valores de carbono, oxígeno y azufre se encontraron dentro de los rangos previstos en la hipótesis, mientras que el contenido de hidrógeno excede el límite superior del rango establecido (5.41% - 6.33%) y el contenido de nitrógeno se encontró por debajo del límite inferior (0.36% - 3.01%). En relación al análisis proximal, se determinó que la muestra de cascarilla de café presentó un contenido de ceniza del 0.60% y humedad del 12.16%, materia volátil del 74.36%

y carbono fijo del 12.89%. Los valores de materia volátil y carbono fijo se encontraron dentro de los rangos establecidos por la literatura, mientras que el contenido de ceniza está por debajo del límite inferior del rango establecido (3.55% - 8.00%) y el contenido de humedad excede el límite superior (6.82% - 11.30%). Con respecto al contenido energético, se determinó que el poder calorífico de la muestra de cascarilla de café es de 17.83 MJ/kg. Este valor se encuentra dentro del rango establecido en la literatura.

Si bien la mayoría de los resultados respaldan la hipótesis, existe una discrepancia con el contenido de hidrógeno, nitrógeno, contenido de ceniza y humedad. Por lo tanto, según los resultados se rechaza la hipótesis alterna, aceptando la hipótesis nula de que “Los resultados de la caracterización de la cascarilla de café en base a su análisis elemental, proximal y contenido energético no se encuentran dentro de los rangos establecidos en la literatura”.

6.1.3. Contrastación con la hipótesis específica 2

Ho₂: No existen condiciones del proceso de pirólisis asistida por microondas que permiten mejorar el rendimiento del bioaceite de cascarilla de café.

Ha₂: Existen condiciones del proceso de pirólisis asistida por microondas que permiten mejorar el rendimiento del bioaceite de cascarilla de café.

Según los resultados inferenciales se determinó con un p valor igual a 0.005 menor a la significancia establecida de 0.05, que, si existen diferencias significativas de rendimiento a las diferentes temperaturas de 600, 700 y 800°C, y según la prueba de Tukey se estableció que el rendimiento del bioaceite tuvo el siguiente orden 700°C>800°C>600°C. Por consiguiente, según los resultados se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alterna de que “Existen condiciones del proceso de pirólisis asistida por microondas que permiten mejorar el rendimiento del bioaceite de cascarilla de café”.

6.1.4. Contrastación con la hipótesis específica 3

Ho₃: Las propiedades físicas del bioaceite de cascarilla de café con mejor rendimiento no se encuentran dentro de los rangos establecidos: contenido de

humedad entre 15% y 50%, viscosidad cinemática entre 25-1000m²/s, y una acidez entre los valores de 100-200 TAN.

Ha₃: Las propiedades físicas del bioaceite de cascarilla de café con mejor rendimiento se encuentran dentro de los rangos establecidos: contenido de humedad entre 15% y 50%, viscosidad cinemática entre 25-1000m²/s, y una acidez entre los valores de 100-200 TAN.

Los resultados de las propiedades físicas del bioaceite de cascarilla de café con mejor rendimiento fueron comparados con la literatura. Para el contenido de humedad el resultado fue de 13.73%, para la viscosidad cinemática fue de 2.02 mm²/s y para el número de acidez fue de 97 TAN. Según los resultados se puede observar que el contenido de humedad, la viscosidad cinemática y el número de acidez no se encuentran dentro de los rangos establecidos en la literatura. Por ello se rechaza la hipótesis alterna y se acepta la hipótesis nula de que "las propiedades físicas del bioaceite de cascarilla de café con mejor rendimiento no se encuentran dentro de los rangos establecidos: contenido de humedad entre 15% y 50%, viscosidad cinemática entre 25-1000m²/s, y una acidez entre los valores de 100-200 TAN".

6.1.5. Contrastación con la hipótesis específica 4

Ho₄: Las propiedades energéticas del bioaceite de cascarilla de café con mejor rendimiento no se encuentran dentro de los rangos establecidos: contenido de oxígeno entre 29% y 40%, y poder calorífico entre 15 MJ/kg y 19 MJ/kg.

Ha₄: Las propiedades energéticas del bioaceite de cascarilla de café con mejor rendimiento se encuentran dentro de los rangos establecidos: contenido de oxígeno entre 29% y 40%, y poder calorífico entre 15 MJ/kg y 19 MJ/kg.

Los resultados de las propiedades energéticas del bioaceite de cascarilla de café con mejor rendimiento fueron comparados con la literatura. Para el contenido de oxígeno el resultado fue de 80.1% y para el poder calorífico superior fue de 0.9 MJ/kg. Según los resultados se rechaza la hipótesis alterna y se acepta la hipótesis nula de que "Las propiedades energéticas del bioaceite de cascarilla de café con mejor rendimiento no se encuentran dentro de los rangos

establecidos: contenido de oxígeno entre 29 % y 40%, y poder calorífico entre 15 MJ/kg y 19 MJ/kg”.

6.2. Contrastación de los resultados con otros estudios similares

Caracterización de la cascarilla de café

En la Tabla 11 se comparan los resultados del análisis proximal, elemental y de contenido energético con los resultados por diversos autores.

Tabla 11

Caracterización de la CC y su comparación con valores de la literatura.

Parámetros	Unidad	Resultados de Laboratorio	Valores Referenciales		
			(Setter et al., 2020)	(Zinla et al., 2021)	(Paredes et al., 2022)
Análisis Elemental					
C	%	44.08	46.41	39.68	45.48
H	%	6.73	6.33	5.41	6.00
N	%	0.20	2.66	3.01	0.36
O	%	48.20	44.51	51.58	41.82
S	%	0.11	0.09	0.32	0.31
Análisis Proximal					
Ceniza	%	0.60	3.55	8.00	4.33
Humedad	%	12.16	9.06	11.30	6.82
Materia volátil	%	74.36	77.09	72.94	71.14
Carbono fijo ¹	%	12.89	19.36	7.76	17.71
Análisis de Contenido Energético					
Poder calorífico superior	MJ/kg ³	17.83	18.50	15.02	17.56

De la tabla anterior se puede observar que los resultados de la caracterización de la cascarilla de café obtenidos en nuestra investigación concuerdan con los valores reportados en otro estudio realizado por Setter et al., (2020); Zinla et al., (2021); Paredes et al., (2022). Los parámetros medidos dentro del análisis proximal, análisis elemental y contenido energético se encuentran dentro del rango establecido, a excepción del contenido de hidrógeno, nitrógeno, ceniza y humedad el cual registró un valor de 6.73%, 0.20%, 0.60%, 12.16% respectivamente, encontrándose fuera del rango establecido por la literatura.

Rendimiento del bioaceite

En cuanto al rendimiento del bioaceite se pudo establecer que estuvo influenciados por parámetros como la temperatura de pirólisis, la potencia de las microondas, el tipo de absorbente utilizado, hallazgos similares fueron reportados por Amalina et al. (2023) y por Sardi et al. (2023), Asimismo en comparación con Dominguez, et al., 2007, nuestro rendimiento fue mas alto a una temperatura final de aproximadamente 700°C.

Caracterización fisicoquímica del bioaceite

Según Beneroso et al., (2017) los bioaceites crudos comúnmente tienen una alta acidez (valores TAN 100-200), viscosidad cinemática variable (25-1000 m²/s), grandes cantidades de fase acuosa (15-50 % en peso). Los resultados reportados en nuestro estudio se encuentran fuera de estos rangos establecidos, esto podría explicarse ya que según Jansuwan et al (2023), la fase acuosa del bioaceite tiene una viscosidad cinemática baja y una humedad debajo del promedio.

Caracterización energética del bioaceite

Beneroso et al., (2017) los bioaceites crudos poseen alto contenido de oxígeno. esto reduce la densidad de energía dentro del bioaceite y afectan su capacidad para ser utilizado como combustible y su posterior valor económico, nuestro estudio reporto un considerable contenido de oxígeno, más del 80%, muy superior al valor medio de 38% especificado por Bridgwater, (2012); lo que explicaría las pobres propiedades energéticas del este bioaceite, aparte de pertenecer a la fase acuosa según Jansuwan et al (2023)

6.3. Responsabilidad ética de acuerdo a los reglamentos vigentes

La presente tesis titulada “Bioaceite obtenido de la cascarilla de café mediante pirólisis asistida por microondas, Callao 2023”, los tesisistas se rigen en cumplir con el Reglamento del Código de Ética de la Investigación de la Universidad Nacional del Callao y la Directiva N° 004-2022-R “Directiva para la elaboración final de investigación de pregrado, posgrado, equipos, centros e institutos de investigación”. Nuestro objetivo principal al realizar esta

investigación es contribuir con conocimientos valiosos tanto para la comunidad científica como para la sociedad en general. En este sentido, nos responsabilizamos por la información emitida en esta investigación, esperando contribuir de manera significativa al avance del conocimiento y fomentar la transparencia y la difusión de la investigación en nuestra institución.

VII. CONCLUSIONES

- Los resultados de la caracterización de la cascarilla de café a través del análisis elemental, proximal y de contenido energético son consistentes con estudios previos. Sin embargo, se observa la excepción en el caso del hidrógeno, nitrógeno, contenido de ceniza y humedad que superan los valores establecidos. A pesar de ello, se evidencia el potencial de la cascarilla de café para ser utilizado como combustible, debido a que presenta buen índice de combustibilidad que le confiere mayor facilidad y estabilidad en la combustión. Además, el contenido de nitrógeno y azufre, predecesores de gases contaminantes, es muy bajo, lo que asegura su sostenibilidad y contribución a la reducción de gases de efecto invernadero.
- Se determinó que la temperatura es el factor más influyente el rendimiento del bioaceite y que a aproximadamente 700°C se obtiene el mayor rendimiento. También se comprobó que el carburo de silicio como suceptor aumenta la velocidad de calentamiento, reduciendo el tiempo que demora el proceso en alcanzar la temperatura final.
- Los resultados obtenidos de las propiedades fisicoquímicas del bioaceite respaldan el hecho de que se puede obtener un bioaceite con un menor contenido de carbono y mayor contenido de oxígeno a partir de la cascarilla de café. Esto implica que este bioaceite debe ser procesado o catalizado para su posterior uso en diversas aplicaciones como combustible.
- Los resultados obtenidos de las propiedades energéticas explican por qué el bioaceite tiene un bajo contenido energético debido a su alto contenido de oxígeno que reduce su capacidad calorífica.
- Este estudio demuestra que la aplicación de la pirólisis asistida por microondas es una técnica eficiente y prometedora para obtener bioaceite a partir de la cascarilla de café. Es importante destacar que la cascarilla de café utilizada como materia prima es un residuo del sector cafetero, lo que contribuye a su valorización y aprovechamiento.

VIII. RECOMENDACIONES

- Realizar un análisis de la caracterización de la cascarilla de café para determinar los contenidos de lignina, celulosa y hemicelulosa. Este enfoque se dirige a los investigadores y profesionales involucrados en este campo de estudio. Para llevar a cabo este análisis, se deben realizar pruebas y ensayos en el laboratorio utilizando técnicas analíticas como la espectroscopia infrarroja (FTIR) y métodos gravimétricos. Este análisis contribuirá a entender el comportamiento de los diferentes compuestos de la materia prima en función de la temperatura, lo que serviría para poder controlar el procesos pirolítico de mejor forma.
- Investigar con otros tipos de biomásas lignocelulósicas diferentes a la cascarilla de café que pueden ser empleados como fuente de materia prima para la pirólisis asistida por microondas. Esta sugerencia se dirige a investigadores y profesionales del campo de estudio, así como a empresas que busquen aprovechar sus residuos de sus procesos productivos. Se debe identificar diferentes fuentes de materia prima, recolectar muestras representativas, analizar su composición, y la realizar experimentos de pirólisis asistida por microondas. Esto contribuirá a diversificar las opciones de valorización de residuos y promover alternativas sostenibles de producción de bioenergía.
- Desarrollar una investigación sobre el efecto de diferentes absorbentes de microondas en el proceso de pirólisis asistida por microondas. Esta alternativa está dirigida a los investigadores y científicos que se encuentren interesados en mejorar tanto el proceso de pirolisis asistida por microondas como las propiedades del bioaceite obtenido a partir de la cascarilla de café. Para implementar esta sugerencia, se debe realizar experimentos en un reactor de pirólisis asistida por microondas utilizando diferentes absorbentes en combinación con la cascarilla de café. Se pueden variar parámetros como la cantidad y el tipo de absorbente utilizado, la relación absorbente/materia prima, y las condiciones del proceso como la temperatura. Esto permitirá mejorar la eficiencia del proceso de pirólisis al optimizar la absorción de la energía de microondas,

lo que puede resultar en una mayor conversión de la cascarilla de café en bioaceite y una reducción de subproductos no deseados. De esta manera, se obtendrá información relevante acerca de los absorbentes más efectivos y su impacto en la calidad del bioaceite.

- Se recomienda la eliminación del oxígeno del bioaceite, mediante la aplicación de procesos catalíticos, ya que esto asegurara una mayor aplicabilidad al bioaceite no solo como biocombustible sino también en la industria química.

IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLENDE, S., BRODIE, G. y JACOB, M. V., 2023. Breakdown of biomass for energy applications using microwave pyrolysis: A technological review. *Environmental Research* [en línea], vol. 226, [consulta: 12 mayo 2023]. ISSN 0013-9351. DOI 10.1016/J.ENVRES.2023.115619. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013935123004115#bib191>.
- AMALINA, F., KRISHNAN, S., ZULARISAM, A.W. y NASRULLAH, M., 2023. Effect of process parameters on bio-oil yield from lignocellulosic biomass through microwave-assisted pyrolysis technology for sustainable energy resources: Current status. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* [en línea], [consulta: 10 mayo 2023]. ISSN 01652370. DOI 10.1016/J.JAAP.2023.105958. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016523702300102X#bib7>.
- AMALIYAH, N. y EKA PUTRA, A.E., 2021. Microwave-assisted pyrolysis of cashew nut shell. *International Journal of Design and Nature and Ecodynamics* [en línea], vol. 16, no. 2, [consulta: 10 mayo 2023]. ISSN 17557445. DOI 10.18280/IJDNE.160213. Disponible en: <https://www.iieta.org/journals/ijdne/paper/10.18280/ijdne.160213>.
- ARIAS GÓMEZ, J., VILLASÍS KEEVER, M.Á. y MIRANDA NOVALES, M.G., 2016. El protocolo de investigación III: la población de estudio. *Revista Alergia México* [en línea], vol. 63, no. 2, [consulta: 11 mayo 2023]. ISSN 0002-5151. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=486755023011>.
- ARISTIZÁBAL HERNÁNDEZ, J.D., 2014. Validación y evaluación comparativa de la eficiencia de una estufa de leña mejorada bajo condiciones controladas y prueba de campo. *Informador técnico, ISSN 0122-056X, ISSN-e 2256-5035, Vol. 78, N°. 1, 2014, págs. 12-24* [en línea], vol. 78, no. 1, [consulta:

- 11 mayo 2023]. ISSN 0122-056X. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4880824>.
- AWOGBEMI, O. y KALLON, D.V. Von, 2023. Application of machine learning technologies in biodiesel production process—A review. *Frontiers in Energy Research*, vol. 11, ISSN 2296598X. DOI 10.3389/FENRG.2023.1122638/BIBTEX.
- AYLLÓN PARIONA, R.E. y LOAYZA INGA, R.E., 2020. *Principales factores que influyen en la exportación del café proveniente del Valle del Monzón en la región Huánuco año 2019* [en línea]. Lima: Universidad San Martín de Porres. [consulta: 30 junio 2023]. Disponible en: <https://repositorio.usmp.edu.pe/handle/20.500.12727/7645>.
- BARAY-GUERRERO, M. del R., PORRAS-FLORES, D.A., HOFFMANN-ESTEVEZ, H.E. y MANJARREZ-DOMINGUEZ, C.B., 2019. Treatment of lignocellulosis biomass through slow and low temperature pyrolysis for the production of biofuels. [en línea], [consulta: 14 junio 2023]. DOI 10.35429/JRE.2019.9.3.1.9. Disponible en: www.ecorfan.org/republicofperu.
- BATISTA JÚNIOR, R., SILVÉRIO, B.C., SOARES, R.R., XAVIER, T.P., LIRA, T.S. y SANTOS, K.G., 2021. Response surface methodology applied to spent coffee residue pyrolysis: effect of temperature and heating rate on product yield and product characterization. *Biomass Conversion and Biorefinery* [en línea], vol. 13, no. 5, [consulta: 10 mayo 2023]. ISSN 21906823. DOI 10.1007/S13399-021-01536-4/METRICS. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13399-021-01536-4>.
- BAZCO MARCO, D., 2021. *Hidrólisis enzimática para la producción de biocombustibles: revisión bibliográfica de procesos* [en línea]. Tesis para obtener grado en biotecnología. Zaragoza: Universidad de Zaragoza. [consulta: 11 mayo 2023]. Disponible en: <https://zaguan.unizar.es/record/110079#>.

- BENEROSO, et al., 2017. Microwave pyrolysis of biomass for bio-oil production: Scalable processing concepts. *Chemical Engineering Journal* [en línea]. United Kingdom: Elsevier, vol. 316, pp. 481-498 [consulta: Julio del 2023]. ISSN: 1385-8947. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1385894717301250>
- BHUVANESHWARI, S., HETTIARACHCHI, H. y MEEGODA, J.N., 2019. Crop Residue Burning in India: Policy Challenges and Potential Solutions. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 2019, Vol. 16, Page 832 [en línea], vol. 16, no. 5, [consulta: 30 junio 2023]. ISSN 1660-4601. DOI 10.3390/IJERPH16050832. Disponible en: <https://www.mdpi.com/1660-4601/16/5/832/htm>.
- BONASSA, G., SCHNEIDER, L.T., CANEVER, V.B., CREMONEZ, P.A., FRIGO, E.P., DIETER, J. y TELEKEN, J.G., 2018. Scenarios and prospects of solid biofuel use in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 82, ISSN 1364-0321. DOI 10.1016/J.RSER.2017.08.075.
- BORGES, F.C., DU, Z., XIE, Q., TRIERWEILER, J.O., CHENG, Y., WAN, Y., LIU, Y., ZHU, R., LIN, X., CHEN, P. y RUAN, R., 2014. Fast microwave assisted pyrolysis of biomass using microwave absorbent. *Bioresource Technology*, vol. 156, ISSN 18732976. DOI 10.1016/J.BIORTECH.2014.01.038.
- BRIDGWATER, A. V. 2012. Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. *Biomass and Bioenergy* [en línea]. UK: Elsevier, vol. 38, pp. 68-94 [consulta: julio del 2023]. ISSN 0961-9534. Diponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953411000638>
- BREWER, C.E. y BROWN, R.C., 2012. Biochar. *Comprehensive Renewable Energy*, DOI 10.1016/B978-0-08-087872-0.00524-2.
- BU, Q., LEI, H., REN, S., WANG, L., ZHANG, Q., TANG, J. y RUAN, R., 2012. Production of phenols and biofuels by catalytic microwave pyrolysis of lignocellulosic biomass. *Bioresource Technology*, vol. 108, ISSN 09608524. DOI 10.1016/J.BIORTECH.2011.12.125.

- BU, Q., MORGAN, H.M., LIANG, J., LEI, H. y RUAN, R., 2016a. Catalytic Microwave Pyrolysis of Lignocellulosic Biomass for Fuels and Chemicals. *Advances in Bioenergy*, vol. 1, ISSN 2468-0125. DOI 10.1016/BS.AIBE.2016.09.002.
- BU, Q., MORGAN, H.M., LIANG, J., LEI, H. y RUAN, R., 2016b. Catalytic Microwave Pyrolysis of Lignocellulosic Biomass for Fuels and Chemicals. *Advances in Bioenergy*, vol. 1, ISSN 2468-0125. DOI 10.1016/BS.AIBE.2016.09.002.
- CALVO-FLORES, F.G. y MARTIN-MARTINEZ, F.J., 2022. Biorefineries: Achievements and challenges for a bio-based economy. *Frontiers in Chemistry*, vol. 10, ISSN 22962646. DOI 10.3389/FCHEM.2022.973417/BIBTEX.
- CASTELLS, X.E. y VELO, E., 2012. *La pirolisis: Tratamiento y valorización energética de residuos - Xavier Elías Castells, Enric Velo García - Google Libros* [en línea]. Madrid: Ediciones Díaz de Santos. [consulta: 11 mayo 2023]. ISBN 978-84-9969-131-2. Disponible en: https://books.google.com.bo/books?id=29VI_0lqInoC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q=principios&f=false.
- CHHABRA, V., BAMBERY, K., BHATTACHARYA, S. y SHASTRI, Y., 2020. Thermal and in situ infrared analysis to characterise the slow pyrolysis of mixed municipal solid waste (MSW) and its components. *Renewable Energy*, vol. 148, ISSN 0960-1481. DOI 10.1016/J.RENENE.2019.10.045.
- CHOUDHARY, S., PANDA, T. y BEHL, A., 2023. Modelling the linkage between fossil fuel usage and organizational sustainability. *Journal of Cleaner Production* [en línea], vol. 413, [consulta: 24 mayo 2023]. ISSN 0959-6526. DOI 10.1016/J.JCLEPRO.2023.137440. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652623015986>.
- COTRINA SAAVEDRA, S.X., 2018. *Aprovechamiento de residuos lignocelulósicos del Saccharum officinarum por pirólisis para la obtención de*

- bio-oil, Chongoyape 2018* [en línea]. Título Profesional. Lima: Universidad César Vallejo. [consulta: 10 mayo 2023]. Disponible en: <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/59908>.
- DAHMAN, Y., SYED, K., BEGUM, S., ROY, P. y MOHTASEBI, B., 2019. Biofuels: Their characteristics and analysis. *Biomass, Biopolymer-Based Materials, and Bioenergy: Construction, Biomedical, and other Industrial Applications*, DOI 10.1016/B978-0-08-102426-3.00014-X.
- DEMIRBAS, 2004. Combustion characteristics of different biomass fuels. *Progress in Energy and Combustion Science* [En línea]. Turtkey: Elsevier, vol. 30, no. 2, pp. 219-230 [consulta: Julio del 2023]. ISSN. 0360-1285. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360128503000789>
- DEZA RIVASPLATA, J.M. y MUÑOZ LEDESMA, S., 2008. *Metodología de la investigación científica*. S.I.: Universidad Alas Peruanas, . ISBN 978-9972-210-45-7.
- DOMINGUEZ et al., 2007. Conventional and microwave induced pyrolysis of coffee hulls for the production of a hydrogen rich fuel gas. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* [en línea]. Portugal: Elsevier. Vol. 79, no. 1-2, pp. 128-135 [consulta: julio del 2023]. ISSN 0165-2370. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165237006000908>
- DORIA SERRANO, Ma. del C., 2009. Química verde: un nuevo enfoque para el cuidado del medio ambiente. *Educación Química* [en línea], vol. 20, no. 4, [consulta: 10 mayo 2023]. ISSN 0187-893X. DOI 10.1016/S0187-893X(18)30044-2. Disponible en: <https://www.elsevier.es/es-revista-educacion-quimica-78-articulo-quimica-verde-un-nuevo-enfoque-S0187893X18300442>.
- DUAN, Y., YUAN, P., HUANG, S., WANG, L., DENG, J., YU, S., XIE, Q. y NIE, Y., 2023. Experimental study on reactor scale-up for microwave-assisted pyrolysis of methyl ricinoleate. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification* [en línea], vol. 184, [consulta: 16 mayo 2023]. ISSN

- 0255-2701. DOI 10.1016/J.CEP.2023.109293. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0255270123000302#bib0010>.
- ELKHALIFA, S., AL-ANSARI, T., MACKEY, H.R. y MCKAY, G., 2019. Food waste to biochars through pyrolysis: A review. *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 144, ISSN 0921-3449. DOI 10.1016/J.RESCONREC.2019.01.024.
- EMMA, A.F., ALANGAR, S. y YADAV, A.K., 2022. Extraction and characterization of coffee husk biodiesel and investigation of its effect on performance, combustion, and emission characteristics in a diesel engine. *Energy Conversion and Management: X*, vol. 14, ISSN 2590-1745. DOI 10.1016/J.ECMX.2022.100214.
- ESPINOZA DURAND, G.A., 2022. *Huella hídrica del cultivo de café en un fundo del Valle de Monzon en Huánuco* [en línea]. Lima: Universidad Cesar Vallejo. [consulta: 30 junio 2023]. Disponible en: https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/105073/Espinoza_DGA-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
- ETHAIB, S., OMAR, R., KAMAL, S.M.M., BIAK, D.R.A. y ZUBAIDI, S.L., 2020. Microwave-Assisted Pyrolysis of Biomass Waste: A Mini Review. *Processes 2020, Vol. 8, Page 1190* [en línea], vol. 8, no. 9, [consulta: 10 mayo 2023]. ISSN 2227-9717. DOI 10.3390/PR8091190. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2227-9717/8/9/1190/htm>.
- FERNÁNDEZ-CORTÉS, Y., SOTTO-RODRÍGUEZ, K.D., VARGAS-MARÍN, L.A., FERNÁNDEZ-CORTÉS, Y., SOTTO-RODRÍGUEZ, K.D. y VARGAS-MARÍN, L.A., 2020. Impactos ambientales de la producción del café, y el aprovechamiento sustentable de los residuos generados. *Producción + Limpia* [en línea], vol. 15, no. 1, [consulta: 30 junio 2023]. ISSN 1909-0455. DOI 10.22507/PML.V15N1A7. Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-04552020000100093&lng=en&nrm=iso&tlng=es.

- GIORCELLI, M., DAS, O., SAS, G., FÖRSTH, M. y BARTOLI, M., 2021. A Review of Bio-Oil Production through Microwave-Assisted Pyrolysis. *Processes* 2021, Vol. 9, Page 561 [en línea], vol. 9, no. 3, [consulta: 10 mayo 2023]. ISSN 2227-9717. DOI 10.3390/PR9030561. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2227-9717/9/3/561/htm>.
- GRILLO RAMOS, L., 2019. *Después de la coca: iniciativas estatales en materia de lucha contra las drogas y estrategias de vida en el valle del Monzón* [en línea]. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú. [consulta: 30 junio 2023]. Disponible en: <https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/14227>.
- HERNÁNDEZ SAMPIERI, R., FERNÁNDEZ COLLADO, C., MARÍA DEL PILAR BAPTISTA LUCIO, D. y MÉNDEZ VALENCIA CHRISTIAN PAULINA MENDOZA TORRES, S., 2014. *Metodología de la Investigación*. Sexta Edición. S.I.: s.n. ISBN 978-1-4562-2396-0.
- HU, Y., BASSI, A. y XU, C.C., 2020. Energy From Biomass. *Future Energy: Improved, Sustainable and Clean Options for Our Planet*, DOI 10.1016/B978-0-08-102886-5.00021-9.
- HUANG, Y.F., CHIUEH, P. Te, KUAN, W.H. y LO, S.L., 2016. Microwave pyrolysis of lignocellulosic biomass: Heating performance and reaction kinetics. *Energy*, vol. 100, ISSN 0360-5442. DOI 10.1016/J.ENERGY.2016.01.088.
- HUANG, Y.F., CHIUEH, P. Te y LO, S.L., 2016. A review on microwave pyrolysis of lignocellulosic biomass. *Sustainable Environment Research*, vol. 26, no. 3, ISSN 2468-2039. DOI 10.1016/J.SERJ.2016.04.012.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA), 2022. Renewables 2022. [en línea], [consulta: 12 mayo 2023]. Disponible en: www.iea.org.
- JANSUWAN, K., JUMRAT, S., PUNVICHAI, T., KARRILA, S., SIRIKITPUTTISAK, T., SONGTHONGKAEW, N. y PIANROJ, Y., 2023. Properties of Bio-oil and Bio-char from High-intensity Microwave-assisted

- Pyrolysis of Oil Palm Shell Waste. *BioResources*, vol. 18, no. 1, ISSN 19302126. DOI 10.15376/BIORES.18.1.1420-1435.
- KAMRAN, M., 2023. Energy sources and technologies. *Fundamentals of Smart Grid Systems*, DOI 10.1016/B978-0-323-99560-3.00010-7.
- LAGO, C., HERRERA, I., CALDÉS, N. y LECHÓN, Y., 2019. Nexus Bioenergy–Bioeconomy. *The Role of Bioenergy in the Emerging Bioeconomy: Resources, Technologies, Sustainability and Policy*, DOI 10.1016/B978-0-12-813056-8.00001-7.
- MAHAPATRA, S., KUMAR, D., SINGH, B. y SACHAN, P.K., 2021. Biofuels and their sources of production: A review on cleaner sustainable alternative against conventional fuel, in the framework of the food and energy nexus. *Energy Nexus*, vol. 4, ISSN 2772-4271. DOI 10.1016/J.NEXUS.2021.100036.
- MANALS CUTIÑO, E.M., SALAS TORT, D. y PENEDO MEDINA, M., 2018. Caracterización de la biomasa vegetal «cascarilla de café». *Tecnología Química* [en línea], vol. 38, no. 1, [consulta: 11 mayo 2023]. ISSN 2224-6185. Disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-61852018000100013&lng=es&nrm=iso&tlng=es.
- MENDOZA MARTINEZ, C.L., ALVES ROCHA, E.P., OLIVEIRA CARNEIRO, A. de C., BORGES GOMES, F.J., RIBAS BATALHA, L.A., VAKKILAINEN, E. y CARDOSO, M., 2019. Characterization of residual biomasses from the coffee production chain and assessment the potential for energy purposes. *Biomass and Bioenergy*, vol. 120, ISSN 0961-9534. DOI 10.1016/J.BIOMBIOE.2018.11.003.
- MENÉNDEZ, J.A., ARENILLAS, A., FIDALGO, B., FERNÁNDEZ, Y., ZUBIZARRETA, L., CALVO, E.G. y BERMÚDEZ, J.M., 2010. Microwave heating processes involving carbon materials. *Fuel Processing Technology*, vol. 91, no. 1, ISSN 0378-3820. DOI 10.1016/J.FUPROC.2009.08.021.

- MINISTERIO DE DESARROLLO AGRARIO Y RIEGO, 2023. Reporte anual de gases de efecto invernadero del sector agricultura 2019. [en línea]. Lima: [consulta: 19 junio 2023]. Disponible en: https://infocarbono.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2023/05/Informe-RAGEI-Agricultura-2019_vf.pdf.
- MONG, G.R., CHONG, C.T., CHONG, W.W.F., NG, J.H., ONG, H.C., ASHOKKUMAR, V., TRAN, M.V., KARMAKAR, S., GOH, B.H.H. y MOHD YASIN, M.F., 2022. Progress and challenges in sustainable pyrolysis technology: Reactors, feedstocks and products. *Fuel* [en línea], vol. 324, [consulta: 16 mayo 2023]. ISSN 0016-2361. DOI 10.1016/J.FUEL.2022.124777. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236122016222>.
- PANAIFO-GÓMEZ, C., ÑIQUE-ÁLVAREZ, M. y LEVANO-CRISÓSTOMO, J., 2021. Calidad y uso sustentable del suelo en el Valle del Monzón, Huánuco – Perú. *Revista Latinoamericana de Difusión Científica* [en línea], vol. 3, [consulta: 30 junio 2023]. ISSN 2711-0494. DOI <https://doi.org/10.38186/difcie.35.02>. Disponible en: <http://www.difusioncientifica.info/index.php/difusioncientifica/article/view/28/61>.
- PAREDES, J., PRETELL, V., PILCO, A., RAMOS, W. y UBILLAS, C., 2022. Characterization of Two Lignocellulosic Biomasses Coffea Arabica L. for the production of Biochar. *Education, Research and Leadership in Post-pandemic Engineering: Resilient, Inclusive and Sustainable Actions* [en línea], no. 2, [consulta: 10 mayo 2023]. ISSN 2414-6390. DOI 10.18687/LACCEI2022.1.1.344. Disponible en: <http://dx>.
- PEREZ, B.A., JONNALAGEDDA, V.J.K. y TORAMAN, H.E., 2022. Characterization of SPW pyrolysis oils: Products spectra and opportunities. *Advances in Chemical Engineering*, vol. 60, no. 1, ISSN 0065-2377. DOI 10.1016/BS.ACHE.2022.09.007.

- PÉREZ ROMERO, M.E., AZUARA JIMÉNEZ, J.A., JIMÉNEZ ISLAS, D., VENTURA CRUZ, I. y FLORES ROMERO, M.B., 2022. Análisis de la ventaja comparativa en la producción mundial de biocombustibles. *Inquietud Empresarial*, vol. 22, no. 2, ISSN 0121-1048. DOI 10.19053/01211048.13862.
- POTNURI, R., SURIAPPARAO, D. V., RAO, C.S. y KUMAR, T.H., 2022. Understanding the role of modeling and simulation in pyrolysis of biomass and waste plastics: A review. *Bioresource Technology Reports*, vol. 20, ISSN 2589-014X. DOI 10.1016/J.BITEB.2022.101221.
- RAIHAN, A. y TUSPEKOVA, A., 2022. The nexus between economic growth, renewable energy use, agricultural land expansion, and carbon emissions: New insights from Peru. *Energy Nexus*, vol. 6, ISSN 2772-4271. DOI 10.1016/J.NEXUS.2022.100067.
- RAMÍREZ PINZÓN, F.C. y RIAÑO GALÁN, Y.F., 2022. *Propuesta técnico financiera para la producción de pellets de borra de café utilizando aceite vegetal como aglomerante a nivel planta piloto*. [en línea]. S.l.: s.n. [consulta: 11 mayo 2023]. Disponible en: <https://repository.uamerica.edu.co/handle/20.500.11839/8847>.
- RIVERA BAUTISTA, A.M., 2019. *Estudio de la pirólisis rápida de cisco de café en un horno con calentamiento por inducción magnética* [en línea]. Título de Magister. Medellín: Universidad Nacional de Colombia. [consulta: 30 junio 2023]. Disponible en: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/76580>.
- Rojas, Flores y Lopez, 2019. Prospectivas de aprovechamiento de algunos residuos agroindustriales. *Revista Cubana de Química* [en línea]. Colombia: Scielo, vol. 31, no. 1 [consulta: Julio 2019]. ISSN 2224-5421. Disponible en: <http://scielo.sld.cu/pdf/ind/v31n1/2224-5421-ind-31-01-31.pdf>
- RUBIO GABRIEL, M.N., 2016. *Identificación y análisis de factores que enfrentan los productores del Valle del Monzón, para articularse eficientemente en la cadena productiva del café y cacao. Propuesta de estrategia de articulación comercial* [en línea]. Huánuco: Universidad Nacional Hermilio Valdizán de

Huánuco. [consulta: 30 junio 2023]. Disponible en:
<http://repositorio.unheval.edu.pe/handle/20.500.13080/2147>.

SABOGAL OTÁLORA, A.M., PALOMO HERNÁNDEZ, L.F. y PIÑEROS CASTRO, Y., 2022. Sugar production from husk coffee using combined pretreatments. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, vol. 176, ISSN 0255-2701. DOI 10.1016/J.CEP.2022.108966.

SALEEM, M. y BAIG, N., 2018. Production of bio-oil and bio-char from different biomass wastes. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* [en línea], vol. 458, no. 1, [consulta: 13 junio 2023]. ISSN 1757-899X. DOI 10.1088/1757-899X/458/1/012021. Disponible en:
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/458/1/012021>.

SALEMA, A.A., AFZAL, M.T. y BENNAMOUN, L., 2017. Pyrolysis of corn stalk biomass briquettes in a scaled-up microwave technology. *Bioresource Technology*, vol. 233, ISSN 0960-8524. DOI 10.1016/J.BIORTECH.2017.02.113.

SARDI, B., RACHMAWATI, H., MAULANA, T.F., SETIAWATI, E., INDRAWAN, N. y MAHFUD, M., 2023. Advanced bio-oil production from a mixture of microalgae and low rank coal using microwave assisted pyrolysis. *Bioresource Technology Reports*, vol. 21, ISSN 2589014X. DOI 10.1016/J.BITEB.2023.101367.

SETTER, C., SILVA, F.T.M., ASSIS, M.R., ATAÍDE, C.H., TRUGILHO, P.F. y OLIVEIRA, T.J.P., 2020. Slow pyrolysis of coffee husk briquettes: Characterization of the solid and liquid fractions. *Fuel*, vol. 261, ISSN 0016-2361. DOI 10.1016/J.FUEL.2019.116420.

SOLSOL RAMIREZ, E., 2018. *La recuperación de suelos degradados ex cicales por procesos naturales en periodos de abandono en 5, 10, 15, 20 años en el distrito Mariano Dámaso Beraun - 2018* [en línea]. Tingo María: Universidad Nacional Agraria de la Selva. [consulta: 30 junio 2023]. Disponible en:

https://repositorio.unas.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14292/1468/SRE_2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

- SURIAPPARAO, D. V., TANNERU, H.K. y REDDY, B.R., 2022. A review on the role of susceptors in the recovery of valuable renewable carbon products from microwave-assisted pyrolysis of lignocellulosic and algal biomasses: Prospects and challenges. *Environmental Research*, vol. 215, ISSN 0013-9351. DOI 10.1016/J.ENVRES.2022.114378.
- WU, F. y PFENNINGER, S., 2023. Challenges and opportunities for bioenergy in Europe: National deployment, policy support, and possible future roles. *Bioresource Technology Reports* [en línea], vol. 22, [consulta: 16 mayo 2023]. ISSN 2589-014X. DOI 10.1016/J.BITEB.2023.101430. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2589014X23001019>.
- XIONG, J., ZHANG, S., KE, L., WU, Q., ZHANG, Q., CUI, X., DAI, A., XU, C., COBB, K., LIU, Y., RUAN, R. y WANG, Y., 2023. Research progress on pyrolysis of nitrogen-containing biomass for fuels, materials, and chemicals production. *Science of The Total Environment*, vol. 872, ISSN 0048-9697. DOI 10.1016/J.SCITOTENV.2023.162214.
- YAFETTO, L., ODAMTTEN, G.T. y WIAFE-KWAGYAN, M., 2023. Valorization of agro-industrial wastes into animal feed through microbial fermentation: A review of the global and Ghanaian case. *Heliyon* [en línea], vol. 9, no. 4, [consulta: 13 junio 2023]. ISSN 2405-8440. DOI 10.1016/J.HELİYON.2023.E14814. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844023020212#bib11>.
- YIN, C., 2012. Microwave-assisted pyrolysis of biomass for liquid biofuels production. *Bioresource Technology*, vol. 120, ISSN 0960-8524. DOI 10.1016/J.BIORTECH.2012.06.016.
- YU, B., LIU, X., JI, C. y SUN, H., 2023. Greenhouse gas mitigation strategies and decision support for the utilization of agricultural waste systems: A case

- study of Jiangxi Province, China. *Energy*, vol. 265, ISSN 0360-5442. DOI 10.1016/J.ENERGY.2022.126380.
- YU, F., DENG, S., CHEN, P., LIU, Y., WAN, Y., OLSON, A., KITTELSON, D. y RUAN, R., 2007. Physical and chemical properties of bio-oils from microwave pyrolysis of corn stover. *Applied Biochemistry and Biotechnology* [en línea], vol. 137-140, no. 1-12, [consulta: 24 mayo 2023]. ISSN 02732289. DOI 10.1007/S12010-007-9111-X/METRICS. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12010-007-9111-x>.
- ZHANG, Y., CHEN, P., LIU, S., FAN, L., ZHOU, N., MIN MIN, CHENG, Y., PENG, P., ANDERSON, E., WANG, Y., YIQIN WAN, LIU, Y., LI, B., RUAN, R., ZHANG, Y., CHEN, P., LIU, S., FAN, L., ZHOU, N., MIN MIN, CHENG, Y., PENG, P., ANDERSON, E., WANG, Y., YIQIN WAN, LIU, Y., LI, B. y RUAN, R., 2017. Microwave-Assisted Pyrolysis of Biomass for Bio-Oil Production. *Pyrolysis* [en línea], [consulta: 10 mayo 2023]. DOI 10.5772/67442. Disponible en: <https://www.intechopen.com/chapters/54568>.
- ZHANG, Y., CUI, Y., LIU, S., FAN, L., ZHOU, N., PENG, P., WANG, Y., GUO, F., MIN, M., CHENG, Y., LIU, Y., LEI, H., CHEN, P., LI, B. y RUAN, R., 2020. Fast microwave-assisted pyrolysis of wastes for biofuels production – A review. *Bioresource Technology*, vol. 297, ISSN 0960-8524. DOI 10.1016/J.BIORTECH.2019.122480.
- ZHANG, Y., FAN, S., LIU, T., OMAR, M.M. y LI, B., 2022. Perspectives into intensification for aviation oil production from microwave pyrolysis of organic wastes. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, vol. 176, ISSN 0255-2701. DOI 10.1016/J.CEP.2022.108939.
- ZHAO, L., SUN, Z.F., ZHANG, C.C., NAN, J., REN, N.Q., LEE, D.J. y CHEN, C., 2022. Advances in pretreatment of lignocellulosic biomass for bioenergy production: Challenges and perspectives. *Bioresource Technology*, vol. 343, ISSN 0960-8524. DOI 10.1016/J.BIORTECH.2021.126123.
- ZINLA, D., GBAHA, P., KOFFI, P.M.E. y KOUA, B.K., 2021. Characterization of rice, coffee and cocoa crops residues as fuel of thermal power plant in Côte

d'Ivoire. *Fuel*, vol. 283, ISSN 0016-2361. DOI
10.1016/J.FUEL.2020.119250.

ANEXOS

Anexo 1: Matriz de Consistencia

BIOACEITE OBTENIDO DE LA CASCARILLA DE CAFÉ MEDIANTE PIRÓLISIS ASISTIDA POR MICROONDAS, CALLAO 2023						
PROBLEMA	OBJETIVO	HIPÓTESIS	VARIABLES	DIMENSIONES	INDICADORES	METODOLOGÍA
Problema general	Objetivo general	Hipótesis general			Carbono (C)	Tipo: Aplicada
					Hidrógeno (H)	Nivel: Explicativo
					Nitrógeno (N)	Enfoque: Cuantitativa
					Oxígeno (O)	Diseño: Experimental
				Materia Prima	Azufre (S)	Método: Hipotético-deductivo
					Poder calorífico	Técnicas Observación Documentación
					Contenido de ceniza	
					Humedad	Instrumento: Ficha de recolección de datos
					Materia volátil	
					Carbono fijo	Población: 4 TM de cascarilla de café que se generan en la Empresa Aromas del Monzón S.A.C. anualmente.
				Calentamiento por microondas	Potencia de Microondas	
					Temperatura de pirólisis	Muestra: 0.7425 Kg de cascarilla de café
				Proceso de pirólisis	Dosificación absorbentes	Prueba estadística: Superficie de
Problemas específicos	Objetivos específicos	Hipótesis específicas	(VD): Bioaceite	Propiedades físicas	Humedad	


<p>P1: ¿Es posible caracterizar la cascarilla de café en base a su análisis elemental, proximal y contenido energético?</p>	<p>O1: Caracterizar la cascarilla de café en base a su análisis elemental, proximal y contenido energético.</p>	<p>H1: Los resultados de la caracterización de la cascarilla de café en base a su análisis elemental, proximal y contenido energético se encuentran dentro de los rangos establecidos en la literatura.</p>	<p>Respuesta, Minitab Versión 25.</p>	
<p>P2: ¿Es posible determinar las condiciones del proceso de pirólisis asistida por microondas que mejoran el rendimiento del bioaceite de cascarilla de café?</p>	<p>O2: Determinar las condiciones del proceso de pirólisis asistida por microondas que mejoran el rendimiento del bioaceite de cascarilla de café.</p>	<p>H2: Existen condiciones del proceso de pirólisis asistida por microondas que permiten mejorar el rendimiento del bioaceite de cascarilla de café.</p>		<p>Viscosidad cinemática</p>
<p>P3: ¿Es posible caracterizar las propiedades físicas del bioaceite de cascarilla de café con mejor rendimiento?</p>	<p>O3: Caracterizar las propiedades físicas del bioaceite de cascarilla de café con mejor rendimiento.</p>	<p>H3: Las propiedades físicas del bioaceite de cascarilla de café con mejor rendimiento se encuentran dentro de los rangos establecidos: contenido de humedad entre 15% y 50%, viscosidad cinemática entre 25-1000m²/s, y una acidez entre los valores de 100-200 TAN.</p>		
<p>P4: ¿Es posible caracterizar las propiedades energéticas del bioaceite de cascarilla de café con mejor rendimiento?</p>	<p>O4: Caracterizar las propiedades energéticas del bioaceite de cascarilla de café con mejor rendimiento.</p>	<p>H4: Las propiedades energéticas del bioaceite de cascarilla de café con mejor rendimiento se encuentran dentro de los rangos establecidos: contenido de oxígeno entre 29% y 40%, y poder calorífico entre 15 MJ/kg y 19 MJ/kg.</p>		<p>Propiedades energéticas</p>
			<p>Oxígeno</p>	
			<p>Poder calorífico</p>	

Anexo 2: Ficha de recolección de datos

Titulo	BIOACEITE OBTENIDO DE LA CASCARILLA DE CAFÉ MEDIANTE PIRÓLISIS ASISTIDA POR MICROONDAS, CALLAO 2023				
Objetivo Específico 1	Determinar la caracterización de la cascarilla de café en base a su análisis elemental, proximal y contenido energético.				
Línea de investigación	Ciencias de la Tierra y del Ambiente				
Escuela	Ingeniería Ambiental y Recursos Naturales				
Autor	Bach. Carmona Mendez, Juvenal's Alexander Bach. Bruno Grey, Karen Victoria				
Asesor	Mc. Huapaya Pardavé, Richard Joao				
Fecha			Hora		
DATOS DE RECOLECCIÓN					
Parámetros	M1	Parámetros	M1	Parámetros	M1
ANÁLISIS ELEMENTAL		ANÁLISIS PROXIMAL		ANÁLISIS DE CONTENIDO ENERGÉTICO	
Carbono (%)		Humedad (%)		Poder Calorífico Inferior (MJ/kg) ¹	
Hidrógeno (%)		Material volátil (%)		Poder Calorífico Superior (MJ/kg) ¹	
Nitrógeno (%)		Ceniza (%)			
Oxígeno (%)		Carbono fijo (%)			
Azufre (%)					
					
Nombres y Apellidos: Patiño Tipacti, Julio César CIP: 93947 Grado: Ingeniero Ambiental y RR.NN.					
Especialista					

¹ MJ/kg: Megajoule por kilogramo

Titulo	BIOACEITE OBTENIDO DE LA CASCARILLA DE CAFÉ MEDIANTE PIRÓLISIS ASISTIDA POR MICROONDAS, CALLAO 2023		
Objetivo Específico 2	Determinar las condiciones del proceso de pirólisis asistida por microondas que mejoran el rendimiento del bioaceite de cascarilla de café.		
Línea de investigación	Ciencias de la Tierra y del Ambiente		
Escuela	Ingeniería Ambiental y Recursos Naturales		
Autor	Bach. Carmona Mendez, Juvenal's Alexander		
	Bach. Bruno Grey, Karen Victoria		
Asesor	Mc. Huapaya Pardavé, Richard Joao		
Fecha		Hora	
DATOS DE RECOLECCIÓN			
Tratamientos	CONDICIONES DE OPERACIÓN		
	Temperatura	Dosificación de absorbente	Tipo de absorbente
T1			
T2			
T3			
T4			
T5			
T6			
T7			
T8			
T9			
T10			
T11			
T12			
T13			

Titulo	BIOACEITE OBTENIDO DE LA CASCARILLA DE CAFÉ MEDIANTE PIRÓLISIS ASISTIDA POR MICROONDAS, CALLAO 2023												
Objetivo Específico 3	Determinar las propiedades físicas y energéticas del bioaceite de cascarilla de café con mejor rendimiento.												
Línea de investigación	Ciencias de la Tierra y del Ambiente												
Escuela	Ingeniería Ambiental y Recursos Naturales												
Autor	Bach. Carmona Mendez, Juvenal's Alexander Bach. Bruno Grey, Karen Victoria												
Asesor	Mc. Huapaya Pardavé, Richard Joao												
Fecha							Hora						
DATOS DE RECOLECCIÓN													
Tratamientos	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13
Rendimiento													
Tratamientos	T14	T15	T16	T17	T18	T19	T20	T21	T22	T23	T24	T25	T26
Rendimiento													
PROPIEDADES FÍSICAS – MEJOR RENDIMIENTO							PROPIEDADES ENERGÉTICAS - MEJOR RENDIMIENTO						
pH (unidades)							Oxígeno (%)						
Viscosidad cinemática (cSt ¹)							Poder Calorífico Superior (MJ/kg) ²						
Humedad (%)													
													
Nombres y Apellidos: Patiño Tipacti, Julio César CIP: 93947 Grado: Ingeniero Ambiental y RR.NN.													
Especialista													

¹ cST: centistokes

² MJ/kg: Megajoule por kilogramo

Titulo	BIOACEITE OBTENIDO DE LA CASCARILLA DE CAFÉ MEDIANTE PIRÓLISIS ASISTIDA POR MICROONDAS, CALLAO 2023				
Objetivo Específico 1	Determinar la caracterización de la cascarilla de café en base a su análisis elemental, proximal y contenido energético.				
Línea de investigación	Ciencias de la Tierra y del Ambiente				
Escuela	Ingeniería Ambiental y Recursos Naturales				
Autor	Bach. Carmona Mendez, Juvenal's Alexander Bach. Bruno Grey, Karen Victoria				
Asesor	Mc. Huapaya Pardavé, Richard Joao				
Fecha			Hora		
DATOS DE RECOLECCIÓN					
Parámetros	M1	Parámetros	M1	Parámetros	M1
ANÁLISIS ELEMENTAL		ANÁLISIS PROXIMAL		ANÁLISIS DE CONTENIDO ENERGÉTICO	
Carbono (%)		Humedad (%)		Poder Calorífico Inferior (MJ/kg) ¹	
Hidrógeno (%)		Material volátil (%)		Poder Calorífico Superior (MJ/kg) ¹	
Nitrógeno (%)		Ceniza (%)			
Oxígeno (%)		Carbono fijo (%)			
Azufre (%)					
					
Nombres y Apellidos: Huapaya Pardavé, Richard Joao CIP: 116212 Grado: Ingeniero Ambiental y de RR.NN.					
Especialista					

¹ MJ/kg: Megajoule por kilogramo


Título	BIOACEITE OBTENIDO DE LA CASCARILLA DE CAFÉ MEDIANTE PIRÓLISIS ASISTIDA POR MICROONDAS, CALLAO 2023		
Objetivo Específico 2	Determinar las condiciones del proceso de pirólisis asistida por microondas que mejoran el rendimiento del bioaceite de cascarilla de café.		
Línea de investigación	Ciencias de la Tierra y del Ambiente		
Escuela	Ingeniería Ambiental y Recursos Naturales		
Autor	Bach. Carmona Mendez, Juvenal's Alexander		
	Bach. Bruno Grey, Karen Victoria		
Asesor	Mc. Huapaya Pardavé, Richard Joao		
Fecha		Hora	
DATOS DE RECOLECCIÓN			
Tratamientos	CONDICIONES DE OPERACIÓN		
	Temperatura	Dosificación de absorbente	Tipo de absorbente
T1			
T2			
T3			
T4			
T5			
T6			
T7			
T8			
T9			
T10			
T11			
T12			
T13			

T14			
T15			
T16			
T17			
T18			
T19			
T20			
T21			
T22			
T23			
T24			
T25			
T26			



Nombres y Apellidos: Huapaya Pardavé, Richard Joao
 CIP: 116212
 Grado: Ingeniero Ambiental y de RR.NN.

Especialista

Titulo	BIOACEITE OBTENIDO DE LA CASCARILLA DE CAFÉ MEDIANTE PIRÓLISIS ASISTIDA POR MICROONDAS, CALLAO 2023												
Objetivo Específico 3	Determinar las propiedades físicas y energéticas del bioaceite de cascarilla de café con mejor rendimiento.												
Línea de investigación	Ciencias de la Tierra y del Ambiente												
Escuela	Ingeniería Ambiental y Recursos Naturales												
Autor	Bach. Carmona Mendez, Juvenal's Alexander Bach. Bruno Grey, Karen Victoria												
Asesor	Mc. Huapaya Pardavé, Richard Joao												
Fecha							Hora						
DATOS DE RECOLECCIÓN													
Tratamientos	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13
Rendimiento													
Tratamientos	T14	T15	T16	T17	T18	T19	T20	T21	T22	T23	T24	T25	T26
Rendimiento													
PROPIEDADES FÍSICAS – MEJOR RENDIMIENTO							PROPIEDADES ENERGÉTICAS - MEJOR RENDIMIENTO						
pH (unidades)							Oxígeno (%)						
Viscosidad cinemática (cSt ¹)							Poder Calorífico Superior (MJ/kg) ²						
Humedad (%)													
													
Nombres y Apellidos: Huapaya Pardavé, Richard Joao CIP: 116212 Grado: Ingeniero Ambiental y de RR.NN.													
Especialista													

¹ cST: centistokes

² MJ/kg: Megajoule por kilogramo

Titulo	BIOACEITE OBTENIDO DE LA CASCARILLA DE CAFÉ MEDIANTE PIRÓLISIS ASISTIDA POR MICROONDAS, CALLAO 2023				
Objetivo Especifico 1	Determinar la caracterización de la cascarilla de café en base a su análisis elemental, proximal y contenido energético.				
Línea de investigación	Ciencias de la Tierra y del Ambiente				
Escuela	Ingeniería Ambiental y Recursos Naturales				
Autor	Bach. Carmona Mendez, Juvenal's Alexander Bach. Bruno Grey, Karen Victoria				
Asesor	Mc. Huapaya Pardavé, Richard Joao				
Fecha		Hora			
DATOS DE RECOLECCIÓN					
Parámetros	M1	Parámetros	M1	Parámetros	M1
ANÁLISIS ELEMENTAL		ANÁLISIS PROXIMAL		ANÁLISIS DE CONTENIDO ENERGÉTICO	
Carbono (%)		Humedad (%)		Poder Calorífico Inferior (MJ/kg) ¹	
Hidrógeno (%)		Material volátil (%)		Poder Calorífico Superior (MJ/kg) ¹	
Nitrógeno (%)		Ceniza (%)			
Oxígeno (%)		Carbono fijo (%)			
Azufre (%)					
 <small>RICARDO LUIS QUEVEDO RIVERO Ingeniero Ambiental y de Recursos Naturales CIP Nº 301495</small>					
Nombres y Apellidos: Quevedo Rivero, Ricardo Luis CIP: 301495 Grado: Ingeniero Ambiental y de RR.NN.					
Especialista					

¹ MJ/kg: Megajoule por kilogramo


Titulo	BIOACEITE OBTENIDO DE LA CASCARILLA DE CAFÉ MEDIANTE PIRÓLISIS ASISTIDA POR MICROONDAS, CALLAO 2023		
Objetivo Específico 2	Determinar las condiciones óptimas del proceso de pirólisis que mejoran el rendimiento del bioaceite obtenido.		
Línea de investigación	Ciencias de la Tierra y del Ambiente		
Escuela	Ingeniería Ambiental y Recursos Naturales		
Autor	Bach. Carmona Mendez, Juvenal's Alexander		
	Bach. Bruno Grey, Karen Victoria		
Asesor	Mc. Huapaya Pardavé, Richard Joao		
Fecha		Hora	
DATOS DE RECOLECCIÓN			
Tratamientos	CONDICIONES DE OPERACIÓN		
	Temperatura	Dosificación de absorbente	Tipo de absorbente
T1			
T2			
T3			
T4			
T5			
T6			
T7			
T8			
T9			
T10			
T11			
T12			
T13			

T14			
T15			
T16			
T17			
T18			
T19			
T20			
T21			
T22			
T23			
T24			
T25			
T26			



Nombres y Apellidos: Quevedo Rivero, Ricardo Luis
CIP: 301495
Grado: Ingeniero Ambiental y de RR.NN.

Especialista

Titulo	BIOACEITE OBTENIDO DE LA CASCARILLA DE CAFÉ MEDIANTE PIRÓLISIS ASISTIDA POR MICROONDAS, CALLAO 2023												
Objetivo Específico 3	Determinar las propiedades físicas y energéticas del bioaceite obtenido con mejor rendimiento mediante la pirólisis asistida por microondas.												
Línea de investigación	Ciencias de la Tierra y del Ambiente												
Escuela	Ingeniería Ambiental y Recursos Naturales												
Autor	Bach. Carmona Mendez, Juvenal's Alexander Bach. Bruno Grey, Karen Victoria												
Asesor	Mc. Huapaya Pardavé, Richard Joao												
Fecha							Hora						
DATOS DE RECOLECCIÓN													
Tratamientos	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13
Rendimiento													
Tratamientos	T14	T15	T16	T17	T18	T19	T20	T21	T22	T23	T24	T25	T26
Rendimiento													
PROPIEDADES FÍSICAS – MEJOR RENDIMIENTO							PROPIEDADES ENERGÉTICAS - MEJOR RENDIMIENTO						
pH (unidades)							Oxígeno (%)						
Viscosidad cinemática (cSt ¹)							Poder Calorífico Superior						
Humedad (%)							(MJ/kg) ²						
 <small>RICARDO LUIS QUEVEDO RIVERO Ingeniero Ambiental y de Recursos Naturales CIP N° 301495</small>													
Nombres y Apellidos: Quevedo Rivero, Ricardo Luis CIP: 301495 Grado: Ingeniero Ambiental y de RR.NN.													
Especialista													

¹ cST: centistokes

² MJ/kg: Megajoule por kilogramo

Anexo 3: Validación del Instrumento de Medición

VALIDACIÓN DEL INSTRUMENTO DE MEDICIÓN

I. DATOS GENERALES

- 1.1. Apellidos y Nombres de Experto : Patiño Tipacti, Julio César
 1.2. Cargo e Institución donde labora : Jefe de Asuntos Ambientales / Cia. Minera
 : Chungar
 1.3. Especialidad : Ingeniero Ambiental y RR.NN.
 1.4. Nombre del Instrumento - Motivo de Evaluación : Ficha de registro - Determinar la caracterización de la cascarilla de café.
 1.5. Autores del Instrumento : Bach. Juvenal's Alexander Carmona Mendez
 Bach. Karen Victoria Bruno Grey


II. ASPECTOS DE VALIDACIÓN

Indicadores	Criterios	Deficiente 1-20	Regular 21-40	Buena 41-60	Muy Buena 61-80	Excelente 81-100
1. Claridad	Está formulado con lenguaje apropiado.					X
2. Objetividad	Está expresado en conductas observables.					X
3. Actualidad	Adecuado al avance de la ciencia y la tecnología.					X
4. Organización	Existe una organización lógica entre variables e indicadores.					X
5. Suficiencia	Comprende los aspectos en calidad y cantidad.					X
6. Intencionalidad	Adecuado para valorar aspectos de la inteligencia emocional.					X
7. Consistencia	Consistencia entre la formulación de problema, objetivos e hipótesis.					X
8. Coherencia	De indicadores y dimensiones.					X
9. Metodología	Responde al propósito de la investigación considerando los objetivos planteados.					X
10. Pertinencia	El instrumento es adecuado al tipo de investigación.					X

III. OPCIÓN DE APLICABILIDAD

- El instrumento cumple con los requisitos para su aplicación:
- El instrumento NO cumple con los requisitos para su aplicación:

SI


DNI: 40697628 N° CIP: 93947 Teléfono: 985033202

IV. PROMEDIO DE VALORACIÓN

100

Lima, 25 de mayo del 2023

VALIDACIÓN DEL INSTRUMENTO DE MEDICIÓN

I. DATOS GENERALES

- 1.1. Apellidos y Nombres de Experto : Patiño Tipacti, Julio César
 1.2. Cargo e Institución donde labora : Jefe de Asuntos Ambientales / Cia. Minera
 : Chungar
 1.3. Especialidad : Ingeniero Ambiental y RR.NN.
 1.4. Nombre del Instrumento – Motivo de Evaluación : Ficha de Registro - Determinar las condiciones del proceso de pirólisis asistida por microondas.
 1.5. Autores del Instrumento : Bach. Juvenal's Alexander Carmona Mendez
 Bach. Karen Victoria Bruno Grey

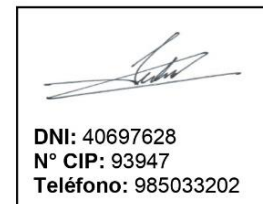
II. ASPECTOS DE VALIDACIÓN

Indicadores	Criterios	Deficiente 1-20	Regular 21-40	Buena 41-60	Muy Buena 61-80	Excelente 81-100
1. Claridad	Está formulado con lenguaje apropiado.					X
2. Objetividad	Está expresado en conductas observables.					X
3. Actualidad	Adecuado al avance de la ciencia y la tecnología.					X
4. Organización	Existe una organización lógica entre variables e indicadores.					X
5. Suficiencia	Comprende los aspectos en calidad y cantidad.					X
6. Intencionalidad	Adecuado para valorar aspectos de la inteligencia emocional.					X
7. Consistencia	Consistencia entre la formulación de problema, objetivos e hipótesis.					X
8. Coherencia	De indicadores y dimensiones.					X
9. Metodología	Responde al propósito de la investigación considerando los objetivos planteados.					X
10. Pertinencia	El instrumento es adecuado al tipo de investigación.					X

III. OPCIÓN DE APLICABILIDAD

- El instrumento cumple con los requisitos para su aplicación:
- El instrumento NO cumple con los requisitos para su aplicación.

SI



IV. PROMEDIO DE VALORACIÓN

100

Lima, 25 de mayo del 2023

VALIDACIÓN DEL INSTRUMENTO DE MEDICIÓN

I. DATOS GENERALES

- 1.1. Apellidos y Nombres de Experto : Patiño Tipacti, Julio César
 1.2. Cargo e Institución donde labora : Jefe de Asuntos Ambientales / Cia. Minera Chungar
 1.3. Especialidad : Ingeniero Ambiental y RR.NN.
 1.4. Nombre del Instrumento – Motivo de Evaluación : Ficha de Registro - Determinar las propiedades físicas y energéticas del bioaceite de cascarilla de café con mejor rendimiento.
 1.5. Autores del Instrumento : Bach. Juvenal's Alexander Carmona Mendez
 Bach. Karen Victoria Bruno Grey


II. ASPECTOS DE VALIDACIÓN

Indicadores	Criterios	Deficiente 1-20	Regular 21-40	Buena 41-60	Muy Buena 61-80	Excelente 81-100
1. Claridad	Está formulado con lenguaje apropiado.					X
2. Objetividad	Está expresado en conductas observables.					X
3. Actualidad	Adecuado al avance de la ciencia y la tecnología.					X
4. Organización	Existe una organización lógica entre variables e indicadores.					X
5. Suficiencia	Comprende los aspectos en calidad y cantidad.					X
6. Intencionalidad	Adecuado para valorar aspectos de la inteligencia emocional.					X
7. Consistencia	Consistencia entre la formulación de problema, objetivos e hipótesis.					X
8. Coherencia	De indicadores y dimensiones.					X
9. Metodología	Responde al propósito de la investigación considerando los objetivos planteados.					X
10. Pertinencia	El instrumento es adecuado al tipo de investigación.					X

III. OPCIÓN DE APLICABILIDAD

- El instrumento cumple con los requisitos para su aplicación:
- El instrumento NO cumple con los requisitos para su aplicación.

SI


DNI: 40697628 N° CIP: 93947 Teléfono: 985033202

IV. PROMEDIO DE VALORACIÓN

100

Lima, 25 de mayo del 2023

VALIDACIÓN DEL INSTRUMENTO DE MEDICIÓN

I. DATOS GENERALES

- 1.1. Apellidos y Nombres de Experto : Huapaya Pardavé, Richard Joao
 1.2. Cargo e Institución donde labora : BanBif
 1.3. Especialidad : Ing. Ambiental y de RR.NN.
 1.4. Nombre del Instrumento - Motivo de Evaluación : Ficha de registro - Determinar la caracterización de la cascarilla de café.
 1.5. Autores del Instrumento : Bach. Juvenal's Alexander Carmona Mendez
 Bach. Karen Victoria Bruno Grey

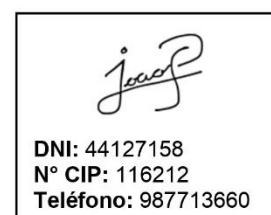
II. ASPECTOS DE VALIDACIÓN

Indicadores	Criterios	Deficiente 1-20	Regular 21-40	Buena 41-60	Muy Buena 61-80	Excelente 81-100
1. Claridad	Está formulado con lenguaje apropiado.					X
2. Objetividad	Está expresado en conductas observables.					X
3. Actualidad	Adecuado al avance de la ciencia y la tecnología.					X
4. Organización	Existe una organización lógica entre variables e indicadores.					X
5. Suficiencia	Comprende los aspectos en calidad y cantidad.					X
6. Intencionalidad	Adecuado para valorar aspectos de la inteligencia emocional.					X
7. Consistencia	Consistencia entre la formulación de problema, objetivos e hipótesis.					X
8. Coherencia	De indicadores y dimensiones.					X
9. Metodología	Responde al propósito de la investigación considerando los objetivos planteados.					X
10. Pertinencia	El instrumento es adecuado al tipo de investigación.					X

III. OPCIÓN DE APLICABILIDAD

- El instrumento cumple con los requisitos para su aplicación:
- El instrumento NO cumple con los requisitos para su aplicación:

SI



IV. PROMEDIO DE VALORACIÓN

100

Lima, 26 de mayo del 2023

VALIDACIÓN DEL INSTRUMENTO DE MEDICIÓN

I. DATOS GENERALES

- 1.1. Apellidos y Nombres de Experto : Huapaya Pardavé, Richard Joao
 1.2. Cargo e Institución donde labora : BanBif
 1.3. Especialidad : Ingeniero Ambiental y de RR.NN.
 1.4. Nombre del Instrumento – Motivo de Evaluación : Ficha de Registro - Determinar las condiciones del proceso de pirólisis asistida por microondas.
 1.5. Autores del Instrumento : Bach. Juvenal's Alexander Carmona Mendez
 Bach. Karen Victoria Bruno Grey


II. ASPECTOS DE VALIDACIÓN

Indicadores	Criterios	Deficiente 1-20	Regular 21-40	Buena 41-60	Muy Buena 61-80	Excelente 81-100
1. Claridad	Está formulado con lenguaje apropiado.					X
2. Objetividad	Está expresado en conductas observables.					X
3. Actualidad	Adecuado al avance de la ciencia y la tecnología.					X
4. Organización	Existe una organización lógica entre variables e indicadores.					X
5. Suficiencia	Comprende los aspectos en calidad y cantidad.					X
6. Intencionalidad	Adecuado para valorar aspectos de la inteligencia emocional.					X
7. Consistencia	Consistencia entre la formulación de problema, objetivos e hipótesis.					X
8. Coherencia	De indicadores y dimensiones.					X
9. Metodología	Responde al propósito de la investigación considerando los objetivos planteados.					X
10. Pertinencia	El instrumento es adecuado al tipo de investigación.					X

III. OPCIÓN DE APLICABILIDAD

- El instrumento cumple con los requisitos para su aplicación:
- El instrumento NO cumple con los requisitos para su aplicación.

SI


DNI: 44127158 N° CIP: 116212 Teléfono: 987713660

IV. PROMEDIO DE VALORACIÓN

100

Lima, 26 de mayo del 2023

VALIDACIÓN DEL INSTRUMENTO DE MEDICIÓN

I. DATOS GENERALES

- 1.1. Apellidos y Nombres de Experto : Huapaya Pardavé, Richard Joao
 1.2. Cargo e Institución donde labora : BanBif
 1.3. Especialidad : Ingeniero Ambiental y de RR.NN.
 1.4. Nombre del Instrumento – Motivo de Evaluación : Ficha de Registro - Determinar las propiedades físicas y energéticas del bioaceite de cascarilla de café con mejor rendimiento.
 1.5. Autores del Instrumento : Bach. Juvenal's Alexander Carmona Mendez
 Bach. Karen Victoria Bruno Grey

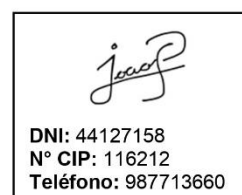
II. ASPECTOS DE VALIDACIÓN

Indicadores	Criterios	Deficiente 1-20	Regular 21-40	Buena 41-60	Muy Buena 61-80	Excelente 81-100
1. Claridad	Está formulado con lenguaje apropiado.					X
2. Objetividad	Está expresado en conductas observables.					X
3. Actualidad	Adecuado al avance de la ciencia y la tecnología.					X
4. Organización	Existe una organización lógica entre variables e indicadores.					X
5. Suficiencia	Comprende los aspectos en calidad y cantidad.					X
6. Intencionalidad	Adecuado para valorar aspectos de la inteligencia emocional.					X
7. Consistencia	Consistencia entre la formulación de problema, objetivos e hipótesis.					X
8. Coherencia	De indicadores y dimensiones.					X
9. Metodología	Responde al propósito de la investigación considerando los objetivos planteados.					X
10. Pertinencia	El instrumento es adecuado al tipo de investigación.					X

III. OPCIÓN DE APLICABILIDAD

- El instrumento cumple con los requisitos para su aplicación:
- El instrumento NO cumple con los requisitos para su aplicación.

SI



IV. PROMEDIO DE VALORACIÓN

100

Lima, 26 de mayo del 2023

VALIDACIÓN DEL INSTRUMENTO DE MEDICIÓN

I. DATOS GENERALES

- 1.1. Apellidos y Nombres de Experto : Quevedo Rivero, Ricardo Luis
 1.2. Cargo e Institución donde labora : Asesor Ambiental
 1.3. Especialidad : Ingeniero Ambiental y de RR.NN.
 1.4. Nombre del Instrumento - Motivo de Evaluación : Ficha de registro - Determinar la caracterización de la cascarilla de café.
 1.5. Autores del Instrumento : Bach. Juvenal's Alexander Carmona Mendez
 Bach. Karen Victoria Bruno Grey

II. ASPECTOS DE VALIDACIÓN

Indicadores	Criterios	Deficiente 1-20	Regular 21-40	Buena 41-60	Muy Buena 61-80	Excelente 81-100
1. Claridad	Está formulado con lenguaje apropiado.					X
2. Objetividad	Está expresado en conductas observables.				X	
3. Actualidad	Adecuado al avance de la ciencia y la tecnología.					X
4. Organización	Existe una organización lógica entre variables e indicadores.					X
5. Suficiencia	Comprende los aspectos en calidad y cantidad.					X
6. Intencionalidad	Adecuado para valorar aspectos de la inteligencia emocional.					X
7. Consistencia	Consistencia entre la formulación de problema, objetivos e hipótesis.					X
8. Coherencia	De indicadores y dimensiones.					X
9. Metodología	Responde al propósito de la investigación considerando los objetivos planteados.				X	
10. Pertinencia	El instrumento es adecuado al tipo de investigación.					X

III. OPCIÓN DE APLICABILIDAD

- El instrumento cumple con los requisitos para su aplicación:
- El instrumento NO cumple con los requisitos para su aplicación:

SI



IV. PROMEDIO DE VALORACIÓN

96

Lima, 26 de mayo del 2023

VALIDACIÓN DEL INSTRUMENTO DE MEDICIÓN

I. DATOS GENERALES

- 1.1. Apellidos y Nombres de Experto : Quevedo Rivero, Ricardo Luis
 1.2. Cargo e Institución donde labora : Asesor Ambiental
 1.3. Especialidad : Ingeniero Ambiental y de RR.NN.
 1.4. Nombre del Instrumento – Motivo de Evaluación : Ficha de Registro - Determinar las condiciones del proceso de pirólisis asistida por microondas.
 1.5. Autores del Instrumento : Bach. Juvenal's Alexander Carmona Mendez
 Bach. Karen Victoria Bruno Grey

II. ASPECTOS DE VALIDACIÓN

Indicadores	Criterios	Deficiente 1-20	Regular 21-40	Buena 41-60	Muy Buena 61-80	Excelente 81-100
1. Claridad	Está formulado con lenguaje apropiado.					X
2. Objetividad	Está expresado en conductas observables.				X	
3. Actualidad	Adecuado al avance de la ciencia y la tecnología.					X
4. Organización	Existe una organización lógica entre variables e indicadores.					X
5. Suficiencia	Comprende los aspectos en calidad y cantidad.					X
6. Intencionalidad	Adecuado para valorar aspectos de la inteligencia emocional.					X
7. Consistencia	Consistencia entre la formulación de problema, objetivos e hipótesis.					X
8. Coherencia	De indicadores y dimensiones.					X
9. Metodología	Responde al propósito de la investigación considerando los objetivos planteados.				X	
10. Pertinencia	El instrumento es adecuado al tipo de investigación.					X

III. OPCIÓN DE APLICABILIDAD

- El instrumento cumple con los requisitos para su aplicación:
- El instrumento NO cumple con los requisitos para su aplicación.

SI



IV. PROMEDIO DE VALORACIÓN

96

Lima, 26 de mayo del 2023

VALIDACIÓN DEL INSTRUMENTO DE MEDICIÓN

I. DATOS GENERALES

- 1.1. Apellidos y Nombres de Experto : Quevedo Rivero, Ricardo Luis
 1.2. Cargo e Institución donde labora : Asesor Ambiental
 1.3. Especialidad : Ingeniero Ambiental y de RR.NN.
 1.4. Nombre del Instrumento – Motivo de Evaluación : Ficha de Registro - Determinar las propiedades físicas y energéticas del bioaceite de cascarilla de café con mejor rendimiento.
 1.5. Autores del Instrumento : Bach. Juvenal's Alexander Carmona Mendez
 Bach. Karen Victoria Bruno Grey

II. ASPECTOS DE VALIDACIÓN

Indicadores	Criterios	Deficiente 1-20	Regular 21-40	Buena 41-60	Muy Buena 61-80	Excelente 81-100
1. Claridad	Está formulado con lenguaje apropiado.					X
2. Objetividad	Está expresado en conductas observables.				X	
3. Actualidad	Adecuado al avance de la ciencia y la tecnología.					X
4. Organización	Existe una organización lógica entre variables e indicadores.					X
5. Suficiencia	Comprende los aspectos en calidad y cantidad.					X
6. Intencionalidad	Adecuado para valorar aspectos de la inteligencia emocional.					X
7. Consistencia	Consistencia entre la formulación de problema, objetivos e hipótesis.					X
8. Coherencia	De indicadores y dimensiones.					X
9. Metodología	Responde al propósito de la investigación considerando los objetivos planteados.				X	
10. Pertinencia	El instrumento es adecuado al tipo de investigación.					X

III. OPCIÓN DE APLICABILIDAD

- El instrumento cumple con los requisitos para su aplicación:
- El instrumento NO cumple con los requisitos para su aplicación.

SI



IV. PROMEDIO DE VALORACIÓN

96

Lima, 26 de mayo del 2023

Anexo 4: Consentimiento informado

Lima, 17 de abril del 2023

AROMAS DE MONZÓN S.A.C.

Gerente General

Milagros Baylon Mallqui

Otr. Manzana Mza. 1 C.P. Monzón – Monzón – Huánuco

Asunto: Autorización del acceso a la empresa Aromas de Monzón S.A.C. para el uso del residuo cascarilla de café.

Por medio de la presente,

Yo, Milagros Baylon Mallqui, identificada con DNI N° 71561429, Gerente General de la empresa Aromas de Monzón S.A.C. con RUC N° 20607027855, autorizo a los bachilleres Juvenal's Alexander Carmona Mendez y Karen Victoria Bruno Grey, el uso del residuo de cascarilla de café como materia prima para la elaboración de la parte experimental en su Informe de Tesis titulado *"PIRÓLISIS DE BIOMASA LIGNOCELULÓSICA ASISTIDA POR MICROONDAS PARA OBTENER BIOACEITE"*.

Se expide la presente carta de autorización a solicitud de los interesados y para los fines que se estime conveniente.

Sin otro particular, me despido.

Atentamente.



Milagros Baylon Mallqui

Gerente General

AROMAS DE MONZÓN S.A.C.

Anexo 5: Resultados del Laboratorio del Análisis de la cascarilla de café



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

REPORTE DE ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO – TGA (PROXIMAL) LER – BIOMASA 030 - 2023

Solicitante : Bach. Juvenal's Carmona y Bach. Karen Bruno
Tipo de muestra : Cascarilla de café
Procedencia : Lima
Fecha Recepción : 29 / 05 / 2023
Fecha Reporte : 15 / 06 / 2023
Norma : ASTM D7582

N. LABORATORIO	CÓDIGO DE CAMPO	BASE HÚMEDA			
		CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	MATERIA VOLÁTIL (%)	CENIZAS (%)	CARBONO FIJO (%)
UBE-(06/2023)-0081	Cascarilla de Café	12.16	74.36	0.60	12.89

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.


Laboratorio de Energías Renovables


José Calle Maravi, 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 031 - 2023

Solicitante : Bach. Juvenal's Carmona y Bach. Karen Bruno
Tipo de muestra : Cascarilla de café
Procedencia : Lima
Fecha Recepción : 29 / 05 / 2023
Fecha Reporte : 15 / 06 / 2023
Norma : ASTM D5373

N. LABORATORIO	CÓDIGO DE CAMPO	C (%)	H (%)	N (%)	O (%)	S (%)
UBE-(06/2023)-0081	Cascarilla de Café	44.08	6.73	0.20	48.20	0.11

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 DE CONTENIDO ENERGÉTICO
(CALORÍMETRO)
LER – BIOMASA 032 - 2023

Solicitante : Bach. Juvenal's Carmona y Bach. Karen Bruno
Tipo de muestra : Cascarilla de café
Procedencia : Lima
Fecha Recepción : 29 / 05 / 2023
Fecha Reporte : 15 / 06 / 2023
Norma : ASTM D5865

N. LABORATORIO	CÓDIGO DE CAMPO	BASE SECA	BASE HÚMEDA
		PCS (kcal/kg)	PCI (kcal/kg)
UBE-(06/2023)-0081	Cascarilla de Café	4261.82	3743.58

NOTA:

- Análisis de Conductividad Eléctrica (C.E.) con dilución de 1:20 de biochar: agua desionizada.



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

Anexo 6: Resultados del Laboratorio del Análisis del bioaceite



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

REPORTE DE ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICO LER – BIOMASA 041- 2023

Solicitante : Bach. Juvenal's Carmona y Bach. Karen Bruno
Tipo de muestra : Bioaceite
Procedencia : Lima
Fecha Recepción : 26 / 06 / 2023
Fecha Reporte : 21 / 07 / 2023
Norma : Indicada
Identificación : UBE-(06/2023)-0097

N°	TIPO DE ANÁLISIS	NORMA / MÉTODO	RESULTADOS	UNIDADES
			M1	
1	Viscosidad Cinemática a 40°C	ASTM D 445	2.02	mm ² /s
2	Número de Acidez	ASMT-D 664	97.00	mg KOH/g
3	Contenido de Humedad	Karl Fischer	13.73	% (m/m)
4	Carbono	ASTM D5291	12.43	% (m/m)
5	Hidrógeno		7.33	% (m/m)
6	Nitrógeno		0.09	% (m/m)
7	Oxígeno		80.10	% (m/m)
8	Azufre	ASTM D1552	0.04	% (m/m)
9	Poder Calórico Inferior (PCI)	ASTM D 240	214.99	kcal/kg

NOTA:

- 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 Maravi, Ph. D.
Jefe del Laboratorio de
Energías Renovables

Anexo 7: Especificaciones técnicas de los Equipos Método de Análisis

628 Series Elemental Determinators

Specification Sheet

This instrument is now available in either Helium or Argon carrier gas models. The type of carrier gas used may affect some instrument specifications, as indicated below.



Instrument Range*	Helium Model	Argon Model
Carbon:	0.02** to 175 mg	0.02** to 175 mg
Hydrogen:	0.1** to 12 mg	0.1** to 10 mg
Nitrogen:	0.02** to 100 mg	0.06** to 100 mg
Precision Range†		
Carbon:	0.01 mg or 0.5% RSD, whichever is greater	
Hydrogen:	0.05 mg or 1.0% RSD, whichever is greater	
Nitrogen, Helium Model:	0.01 mg or 0.3% RSD, whichever is greater	
Nitrogen, Argon Model:	0.03 mg or 0.6% RSD, whichever is greater	
Sample Mass / Analysis Time (Analyzing EDTA at Nominal Mass)		
N (FP) Helium Model:	Up to 1000 mg, 500 mg nominal / 210 seconds (3.5 minutes)	
N (FP) Argon Model:	Up to 1000 mg, 500 mg nominal / 240 seconds (4.0 minutes)	
CN Model:	Up to 500 mg, 250 mg nominal / 240 seconds (4.0 minutes)	
CHN Model:	Up to 250 mg, 100 nominal mg / 270 seconds (4.5 minutes)	
Detection Method		
Carbon/Hydrogen:	Non-Dispersive Infrared (IR) Absorption	
Nitrogen:	Thermal Conductivity (TC Cell) Detector	
Gases Required		
Carrier, Helium Model:	Helium (99.99% pure) @ 35 psi (2.4 bar) ±10%	
Carrier, Argon Model:	Argon (99.99% pure) @ 35 psi (2.4 bar) ±10%	
Combustion:	Oxygen (99.99% pure) @ 35 psi (2.4 bar) ±10%	
Pneumatic:	Compressed air (source must be oil and water free); @ 40 psi (2.8 bar) ±10%	
Furnace	Resistance furnace; both primary and afterburner; up to 1050°C	
Autoloader	30-position (stackable to 120 samples)	
Environmental Conditions	Operating Temp: 15°C to 35°C (59°F to 95°F) Humidity: 20% to 80%, non-condensing	
Dimensions††	32 in. H x 27.5 in. W x 30 in. D (81 x 70 x 76 cm)	
Weight (approx.)	273 lb. (124 kg)	Shipping Weight (approx.): 324 lb. (147 kg)
Electrical Power Requirements	230 V~ (±10%; at max load), 50/60 Hz, single phase, 12 A; 4,000 BTU/hr†	

Part Numbers - Helium Models		Part Numbers - Argon Models	
CHN628C	CHN Determinator (Helium Model) with loader, PC, and monitor	CHN628ARC	CHN Determinator (Argon Model) with loader, PC, and monitor
CN628C	CN Determinator (Helium Model) with loader, PC, and monitor	CN628ARC	CN Determinator (Argon Model) with loader, PC, and monitor
FP628C	N Determinator (Helium Model) with loader, PC, and monitor	FP628ARC	N Determinator (Argon Model) with loader, PC, and monitor

*Use the following formula to calculate element concentration:

$$\% \text{ element concentration} = \frac{(\text{absolute element mass in mg})}{(\text{sample mass in mg})} \times 100$$

**Lower range is calculated as 2 sigma instrument blank deviation. Method range may differ due to factors such as sample type and method parameters.

†Calculated as 1 sigma instrument blank deviation. Method precision may differ due to sample inhomogeneity or other external factors.

††Allow a 6-inch (15 cm) minimum access area around all units.

†Average output based on nominal operating parameters.

V~ denotes VAC.

LECO
Delivering the Right Results

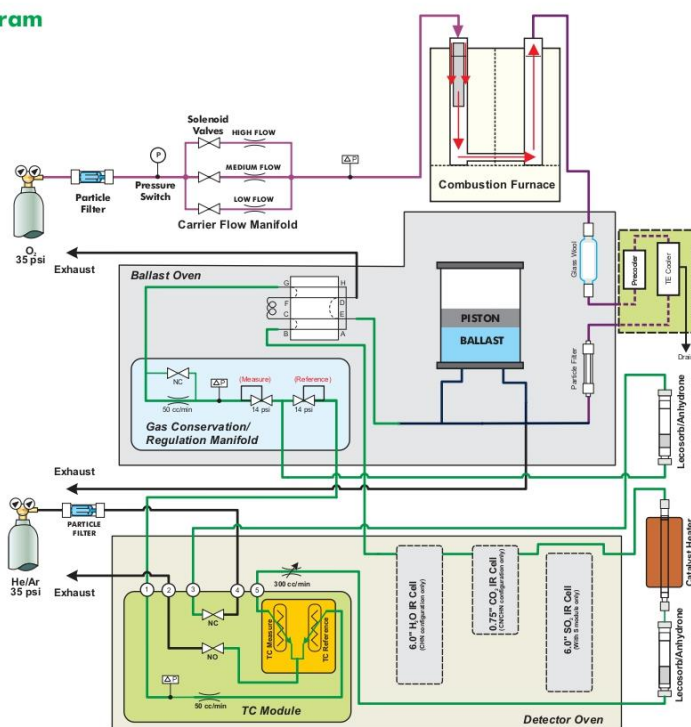
Theory of Operation

The CHN628 Series Elemental Determinator is used to determine nitrogen, carbon/nitrogen, and carbon/hydrogen/nitrogen in organic matrices. The instrument utilizes a combustion technique and provides a result within 4.5 minutes for all the elements being determined. The instrument features custom software operated through an external PC to control the system operation and data management.

A pre-weighed and encapsulated sample is placed in the instrument's loader where the sample will be transferred to the instrument's purge chamber directly above the furnace, eliminating the atmospheric gases from the transfer process. The sample is then introduced to the primary furnace containing only pure oxygen, resulting in a rapid and complete combustion (oxidation) of the sample. Carbon, hydrogen, and nitrogen present in the sample are oxidized to carbon dioxide (CO₂), water (H₂O), and NO, respectively, and are swept by the oxygen carrier through a secondary furnace for further oxidation and particulate removal. In the FP and CN628 models, the combustion gases pass through a pre-cooler and thermoelectric cooler to remove the water vapor. The combination gases are then collected in a vessel known as a ballast for equilibration. The homogenized gases from the ballast are swept through an aliquot loop and then passed into a carrier gas. Separate optimized non-dispersive infrared (NDIR) cells are utilized for the detection of H₂O and CO₂, ensuring the rapid analysis time of the system. The NO_x gases are passed through a reduction tube filled with copper to reduce the gases to N₂ and remove any excess oxygen present from the combustion process. The aliquot gas then passes through Lecosorb and Anhydrene to remove CO₂ and the water generated during the CO₂ trapping process and onto a thermal conductivity cell (TC) utilized to detect the N₂.

The final results are typically displayed in weight percent or parts-per-million but can be displayed in other custom units or conversions such as percent total protein, moisture corrected, and others.

Flow Diagram



Specifications and part numbers may change.
Consult LECO for latest information.

3000 Lakeview Avenue • St. Joseph, MI 49085 • Phone: 800-292-6141 • Fax: 269-982-8977
info@leco.com • www.leco.com • ISO-9001:2008 HQ-Q-994 • LECO is a registered trademark of LECO Corporation.

LECO Corporation 
Delivering the Right Results

Form No. 209-218-001

1/16-REV5

© 2016 LECO Corporation

628 Series Sulfur Add-On Module Specification Sheet



Instrument Range*	0.01 to 20 mg Sulfur
Precision (Sulfur)	0.005 mg or 1% RSD (whichever is greater)
Nominal Sample Weight	up to 350 mg, 250 mg nominal
Analysis Time	60 to 120 seconds (typical)
Detection Method	Infrared absorption
Chemical Reagents	Magnesium Perchlorate (Anhydrous)
Gas Requirements	Oxygen, 99.5% pure, 40 psi (2.8 bar) \pm 10%
Furnace	600 to 1450°C \pm 1% of setpoint; Horizontal resistance-type
Operational Control	Windows®-based software for PC on CHN628
Environmental Conditions	Operating Temp: 15°C to 30°C (59°F to 86°F) Humidity: 20% to 80%, non-condensing
Physical Dimensions†	31 in H x 13 in W x 26 in D (79 x 33 x 66 cm)
Weight (approx.)	147 lb. (67 kg) Shipping Weight (approx.): 198 lb. (543 kg)
Electrical Requirements	230 V~ (\pm 10%; at max load), 50/60 Hz, single phase, 25 A; 19,700 BTU/hr [‡]

Part Numbers

FP628SC	FP628 System for Nitrogen and Sulfur Determination; Includes PC, Monitor, Windows®-based software, module, and host system
FP628SLC	Same as FP628SC above, with Sulfur Module Autoloader
CN628SC	CN628 System for Carbon, Nitrogen, and Sulfur Determination; Includes PC, Monitor, Windows®-based software, module, and host system
CN628SLC	Same as CN628SC above, with Sulfur Module Autoloader
CHN628SC	CHN628 System for Carbon, Hydrogen, Nitrogen, and Sulfur Determination; Includes PC, Monitor, Windows®-based software, module, and host system
CHN628SLC	Same as CHN628SC above, with Sulfur Module Autoloader
628SADD	628 Series Sulfur Add-On Module for upgrading 628 Systems; Includes Windows®-based software, module, and necessary components for mating module to an existing system, (no PC or Monitor)
628SADDL	Same as 628SADD above, with Sulfur Module Autoloader

Optional Accessories

621-192	Dual Monitor Add-On Kit
528-203-250	Combustion Boats

*Adjusting sample size may extend instrument range.
 †Average output based on nominal operating parameters.
 ‡Allow a 6-inch (15 cm) minimum access area around all units.
 V~ denotes VAC.

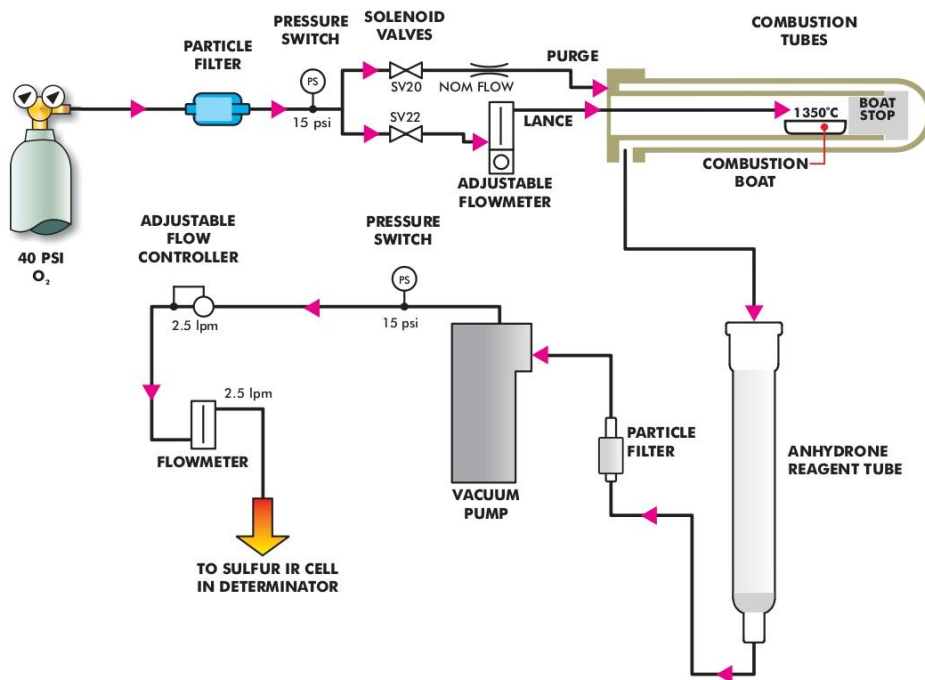
Theory of Operation

LECO offers a Sulfur Add-On Module for the 628 Series of Elemental Determinators. The add-on module provides sulfur analysis for any element combination of the 628 Series—FP (N), CN, or CHN. The 628 S module is specifically designed to determine the sulfur content in a wide variety of organic materials such as coal, coke, and fuel oils, as well as some inorganic materials such as soil, cement, and limestone.

Analysis begins as a sample is weighed into a combustion boat and placed in the furnace with pure oxygen typically regulated at 1350°C. Sulfur within the sample is evolved from the sample and forms SO₂. The sample gases exiting the furnace are first swept through the boat stop to the back of the inner combustion tube, then forward between the inner and outer combustion tubes. This allows the sample gases to remain in the high-temperature zone for a longer period and permit efficient oxidation. From the combustion system, the gases flow through an anhydrous tube to remove moisture, and through a flow controller that sets the flow of sample gases through the sulfur infrared detection cell within the 628 Series instrument.

While the 628 Series instrument and sulfur add-on module can be loading/analyzing/operating completely independent of each other, the module requires the detection capabilities and PC offered within the 628 Series instrument system in order to complete the analysis.

Flow Diagram



Specifications and part numbers may change.
Consult LECO for latest information.

3000 Lakeview Avenue • St. Joseph, MI 49085 • Phone: 800-292-6141 • Fax: 269-982-8977
info@leco.com • www.leco.com • ISO-9001:2008 HQ-Q-994 • LECO is a registered trademark of LECO Corporation.

LECO Corporation 

Delivering the Right Results

209-218-004

9/14-REV3

© 2014 LECO Corporation

Gross Heat in Fuel Oils and Biomass

LECO Corporation; Saint Joseph, Michigan USA

Instrument: AC600



Introduction

The gross calorific value of Biomass materials is most often used when calculating the total calorific value for a quantity of Biomass materials being used for fuel purposes. Gross calorific value of fuel oils and other liquid hydrocarbon fuels are used in calculating the thermal efficiency of equipment and calculating the mass and or volumetric heat of combustion for the fuel.

Sample Preparation

A representative, uniform sample is required.

Accessories

774-204 Crucible, Syringe & Needle, pressure sensitive tape (cellophane tape 38 mm or 1.5 inch wide that is sulfur and chlorine free), disposable eyedroppers, LECO 502-815 Mineral Oil for spiking Biomass sample, 776-978 Glass Scoop.

Calibration Samples

Benzoic acid pellets made from NIST 39j, or LECO 774-208 Benzoic Acid Pellets.

Method Parameters

Method TruSpeed™
Standard Mode ASTM D5865-13

Thermochemical Corrections

Titrant Energy Value	0.0039683 Btu/ml
Sulfur Correction	23.861 Btu/lb
Calculation Mode	TruSpeed
Analysis Time	4.75 minutes
Equilibrate Time	1.5 minutes
Pre-Fire Time	0.5 minutes
Main Time	2.75 minutes
Stir Speed	13.0

System Parameters - Database

Fuse Type	Cotton
Fuse Length	10 cm
Fuse Combustion Heat	0.006255562 Btu/cm
Significant Digits	5
Result Units	Btu/lb
Sleep Timeout	90 minutes
Water Temperature	25°C
Auto Increment Sample Name	Disable
Alarm	Yes

Procedure

1. Prepare instrument for operation as outlined in the operator's instruction manual.
2. Choose the TruSpeed method for analysis.
3. Condition the system by analyzing one LECO 774-208 Benzoic Acid Pellet.
4. Calibration
 - a) Calibrate the instrument using a minimum of five analyses of 1 gram Benzoic Acid Pellets, following the procedure outlined in the operator's instruction manual.
5. Analyze Samples: Residual, Mineral, and Bio-Oil
 - a) Place 774-204 Crucible on balance and tare.
 - b) Weigh ~0.6 g sample into crucible using a disposable eyedropper.
 - c) Enter mass and sample identification into Sample Login (F3).
 - d) Place crucible in "crucible holder" and tie cotton thread fuse to the igniter wire, making sure the cotton thread fuse contacts the oil sample.
 - e) Assemble the combustion vessel and pressurize following the procedure outlined in the operator's instruction manual.
 - f) Transfer combustion vessel to instrument and analyze.
 - g) Perform the appropriate corrections for sulfur and nitrogen.
6. Analyze Samples: Diesel Fuel, Kerosene, Jet Fuel, and Gasoline

Note: This group of highly volatile fluids requires the use of cellophane tape to reduce sample loss during weighing and analysis. It is recommended to prevent damage to the vessel to analyze lower amounts of tape than the ASTM method due to the varying calorific values of cellophane tape. Refer to ASTM D240 for additional details.

- a) Place 774-204 Crucible on balance and tare.
- b) Determine the calorific value of the pressure sensitive (Scotch) tape by analyzing 0.6 g of tape in crucible.
- c) Repeat step 6b three to five times and use the average as the "spike value".
- d) Enter spike value (Btu/lb) in Method Parameters.
- e) Place 774-204 Crucible on balance and tare.
- f) Remove crucible from balance and place a piece of pressure sensitive (Scotch) tape across the top of crucible. Trim around edge with razor blade or scissors and seal tightly. See photos on page 2.

LECO

Organic Application Note

- g) Place a approximate 3 x 12 mm strip of tape creased in the middle and sealed by one edge in the center of the tape disk to create a flap on top of the crucible.
- h) Place crucible on balance, record weight of tape and tare.
- i) Enter weight of tape as "spike weight".
- j) Using a syringe and needle, add ~0.6 g sample to the crucible by inserting the needle through the tape disk at a point so that the flap of tape will cover the puncture upon removal of needle. Seal down flap by pressing lightly.
Note: Take care throughout weighing and filling operation to avoid contacting the tape or crucible with bare fingers.
- k) Enter mass of sample and sample identification into Sample Login (F3).
- l) Place crucible in the "crucible holder"; tie cotton thread fuse to igniter wire, and arrange cotton thread fuse to contact/lie on top of the center of the tape disk.
- m) Assemble the combustion vessel and pressurize following the procedure outlined in the operator's instruction manual.
- n) Transfer the combustion vessel to the instrument and analyze.
- o) Perform appropriate corrections for sulfur and nitrogen.

7. Analyze samples: Biomass

Note: Biomass samples require the addition of a combustion aid (spiking agent) such as mineral oil. LECO 502-815 mineral oil has an assigned calorific value and can be used for this purpose. Other mineral oils may be used; however, the calorific value of the oil must be determined (refer to step 5 for analysis of mineral oil).

- a) Place 774-204 Crucible on balance and tare.
- b) Weigh ~0.2 to 0.4 g biomass sample into crucible.
- c) Enter mass and sample identification in sample login (F3)
- d) Tare crucible and add ~0.2 to 0.4 g 502-815 mineral oil as a spike using a disposable eyedropper.
Note: Ratio of sample/spike is dependant on sample density (Total mass should be ~0.6 g).
- e) Enter mass of mineral oil added in 7d as "Spike Weight".
- f) Let stand for 3 to 5 minutes or until oil is completely absorbed in sample.
- g) Enter spike value (Btu/lb of mineral oil) in Method Parameters.
- h) Place crucible in the "crucible holder", and tie cotton thread fuse to the igniter wire making sure the cotton thread fuse contacts the sample.
- i) Assemble combustion vessel and pressurize following the procedure outlined in the operator's instruction manual.
- j) Transfer the combustion vessel to the instrument and analyze.
- k) Perform appropriate corrections for sulfur, nitrogen, and moisture.



Step 6f



Step 6f



Step 6g



Step 6j

Typical Results

Sample	Mass g	Btu/lb
Mineral Oil	0.6087	19800
	0.6052	19819
	0.6089	19809
	0.6098	19806
	0.6059	19812
	X =	19809
	s =	7
Bio Oil	0.6103	7445
	0.6056	7403
	0.6061	7369
	0.6047	7442
	0.6057	7419
	X =	7416
	s =	31
No. 2 Diesel Fuel	0.6201	19540
	0.6111	19531
	0.6078	19533
	0.6325	19514
	0.6282	19532
	X =	19530
	s =	10
No. 2 Diesel Fuel	0.6296	19409
	0.5763	19406
	0.6125	19406
	0.6168	19401
	0.6235	19423
	X =	19409
	s =	8
Wood Chip (Biomass) #1	0.2233	6697
	0.2292	6742
	0.2265	6753
	0.2267	6747
		X =
	s =	26
Wood Chip (Biomass) #2	0.2221	8084
	0.2291	8110
	0.2283	8050
	0.2219	8107
		X =
	s =	28

LECO Corporation | 3000 Lakeview Avenue | St. Joseph, MI 49085 | 800-292-6141 | Phone: 269-985-5496
 info@leco.com • www.leco.com • ISO-9001:2008 HQ-Q-994 • LECO is a registered trademark of LECO Corporation.



AC600 Semi-Automated Calorimeter

Specification Sheet



Method	Isoperibol	
Range		
Joules/Charge:	14,000 ¹ to 35,000 ^{1†} (14,000 ¹ to 35,000 ^{1†} kJ/kg for a 1 gram sample)	
Calories/Charge:	3,300 ¹ to 8,300 ^{1†} (3,300 ¹ to 8,300 ^{1†} kcal/kg for a 1 gram sample)	
BTU/Charge:	13 ¹ to 33 ^{1†} (6,000 ¹ to 15,000 ^{1†} BTU/lb for a 1 gram sample)	
Precision	0.10% RSD*	
Analysis Time	TruSpeed® Mode: 5 minutes	Delta T Mode: 9 minutes
Corrections	Nitrogen, sulfur, fuse wire, moisture, spike, and ash	
User-Selectable Ignition	String or wire-fuse	
Temperature Measuring Resolution	0.0001°C	
Gas Requirements	Analytical: Oxygen 450 psi (31.0 bar) max; 99.5% purity Pneumatic: Compressed Air; 12 psi (0.8 bar); source must be oil and water free	
Electrical Requirements	90 to 127 V~/180 to 260 V~(at max load), 50/60 Hz, single phase, 5 A, 2,000 BTU/hr	
Water Requirements		
Recirculating Water Chiller ² Nominal Temp:	15°C (59°F)	
Cooling Capacity (at 15°C):	Single AC600: 680 BTU/hr	Dual AC600: 1,400 BTU/hr
Type:	Distilled Water <i>NOTE: Do NOT use deionized water</i>	
pH:	6-8	
Dissolved Solids:	0.5 to 100 ppm	
Resistivity:	50 kΩ•cm to 2 MΩ•cm (0.5 μs/cm to 20 μs/cm)	
Pressure:	4 to 15 psi (0.3 to 1.0 bars)	
Volume:	Single AC600: 3 gallons (12 liters) for initial setup	Dual AC600: 9 gallons (35 liters) for initial setup
Required Work Space**	15 in. W x 21 in. D x 18 in. H (38 cm x 53 cm x 46 cm)	
Weight (approx.)	135 lb. (61 kg)	Shipping Weight (approx.): 148 lb. (67 kg)
Environmental Conditions	Operating Temp: 15° to 35°C (59° to 95°F)	Humidity: 20 to 80%, non-condensing
	General: Area should be free of drafts, and shielded from sunlight and other radiation sources	

Part Numbers

AC600SC	AC600 Semi-Automatic Calorimeter with standard vessel; vessel preparation station; external PC
AC600SHC	AC600 Semi-Automatic Calorimeter with halogen-resistant vessel; vessel preparation station; external PC
AC600DC	AC600 Dual Semi-Automatic Calorimeter with two standard vessels; vessel preparation station; external PC
AC600DHC	AC600 Dual Semi-Automatic Calorimeter with two halogen-resistant vessels; vessel preparation station; external PC

¹Based on analysis of benzoic acid at 1 gram; n = 7.

²Allow a 6-inch (15 cm) minimum access area around instrument.

[†]Lower values can be measured by spiking samples that are not completely combusting.

[‡]This is the combustion vessel safety limit. Do NOT exceed this limit. Exceeding this limit could result in vessel failure causing death, serious personal injury, and/or property damage.

[§]Chiller must be capable of operating continuously with flow stopped to the AC600.

V – denotes VAC.

LECO[®]
Delivering the Right Results

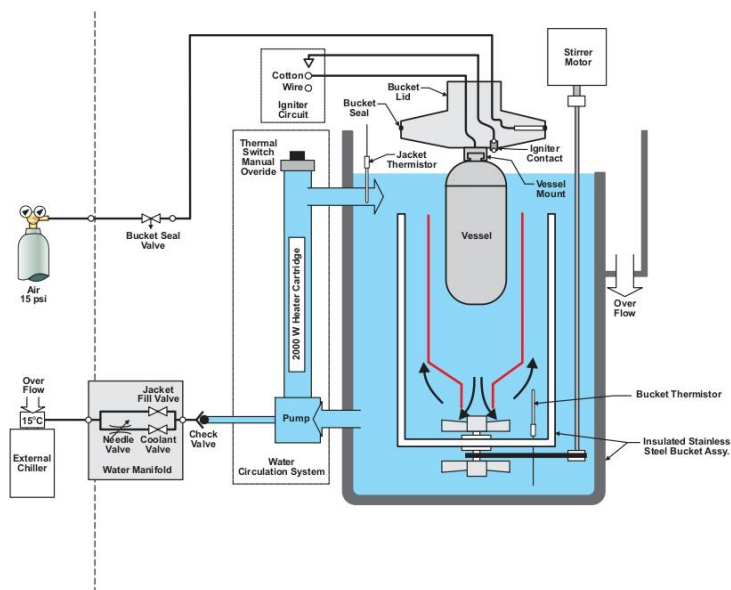
Theory of Operation

The LECO AC600 semi-automatic calorimeter is a Windows®-based instrument developed to measure the calorific content of various organic materials such as coal, coke, and fuel oil.

The calorific value of a sample is determined by precisely measuring the heat released after combustion of the sample in a controlled environment. The heat released is proportional to the calorific value of the substance.

The sample is placed into a combustion vessel, which is pressurized with oxygen. The combustion vessel is automatically lowered into a water bath within the instrument known as a bucket. The bucket is sealed using an inflatable bladder. The cavity surrounding the bucket is known as the jacket and is also filled with water. The water temperature in the jacket is closely controlled at a precise set temperature (isoperibol calorimeter system). The sample is ignited and the temperature of the bucket and jacket water is measured by an electrical thermometer with a resolution of 0.0001 of a degree. A measurement of the water temperature inside the bucket and jacket is collected every second. The results can be corrected within the software for any spiking, nitrogen, sulfur, moisture, and ash content if necessary. Two options for analyzing data are available. A simple temperature difference may be chosen by the user (Delta T mode), in which calorific values are determined by a simple maximum temperature rise of the bucket. The user may also choose to use a thermodynamic model (TruSpeed mode) that has been developed by LECO to model heat exchange within the AC600 system. The TruSpeed mode takes into account heat capacities of the system's components along with corrections for energy transfer within the system. The TruSpeed mode enables the AC600 to attain rapid 5 minute analysis times without compromising the accuracy or precision of the calorific result.

Flow Diagram



Specifications and part numbers may change.
Consult LECO for latest information.

LECO, TruSpeed are registered trademarks of LECO Corporation.
Microsoft, Windows are registered trademarks of Microsoft Corporation.

3000 Lakeview Avenue • St. Joseph, MI 49085 • Phone: 800-292-6141 • Fax: 269-982-8977
info@leco.com • www.leco.com • ISO-9001:2008 HQ-Q-994

LECO Corporation
Delivering the Right Results
© 2015 LECO Corporation

Form No. 209-192-001

7/15-REV8

Carbon, Hydrogen, and Nitrogen in Coal

LECO Corporation; Saint Joseph, Michigan USA

Instrument: CHN628

Introduction

Carbon, Hydrogen, and Nitrogen determination is part of the ultimate analysis of the coal fuel material, helping to characterize the materials and providing information that can be utilized in calculating material/energy balances and efficiencies, as well as emissions potentials for the coal fuel. The Carbon, Hydrogen and Nitrogen results for a coal material are also utilized to evaluate the reactivity potential for coal materials use in a liquefaction or gasification process.

The LECO CHN628 is a combustion elemental carbon, hydrogen, and nitrogen instrument that utilizes only pure oxygen in the furnace, ensuring complete combustion and superior recovery of the elements of interest. A combustion gas collection and handling system lowers the overall cost-per-analysis and extends reagent lifetimes. Helium carrier gas sweeps the combustion gas to separate infrared thermal cells for the detection of H₂O and CO₂, while a thermal conductivity cell is used for the detection of nitrogen.

Method Reference **ASTM D 5373**

Sampling and Sample Preparation

A representative, uniform sample is required. Samples should be prepared in accordance to ASTM D2013. Coal reference materials such as those offered by LECO and NIST are properly prepared.

Accessories 502-186 Tin Foil Cup

Calibration

LECO 502-642 Phenylalanine, 502-092 EDTA, or other suitable pure compound

Note: ASTM Method D 5373-08 requires pure compounds be used for calibration.

Analysis Parameters

Combustion Furnace Temperature 950°C
Afterburner Temperature 850°C

Element Parameters

	Nitrogen	Carbon	Hydrogen
Analyze	Yes	Yes	Yes
Baseline Delay Time	10	0	0
Minimum Analysis Time	40	20	40
Comparator Level	100.00	100.00	100.00
Endline Time	2	1	1
Conversion Factor	1.00	1.00	1.00
Significant Digits	5	5	5

IR Baseline Time 1
TC Baseline Time 10

Burn Profile

Burn Steps	Time	Furnace Flow
1	30	High
2	180	Medium
3	30	High

Macro Ballast Parameters

Ballast
Equilibrate Time 30
Not Filled Timeout 600



Aliquot Loop
Equilibrate Pressure Time 8
Fill Pressure Drop 250

Procedure

1. Prepare instrument for operation as outlined in the operator's instruction manual.
2. Determine Blank
 - a. Enter 1.0000 g mass into Sample Login (F3) using Blank as the sample name.
 - b. Select 10 replicates.
 - c. Initiate the analysis sequence (F5).
 - d. Set blank using the last 5 results following the procedure outlined in the operator's instruction manual. Note: blank precision should be <0.001%.
3. Calibrate
 - a. Weigh ~0.1 g of pure compound calibration sample (EDTA, Phenylalanine, BBOT, etc.) into a 502-186 Tin Foil Cup and seal.
 - b. Enter sample mass and identification into Sample Login (F3).
 - c. Transfer sample to the appropriate position of the sample carousel.
 - d. Repeat steps 3a through 3c a minimum of five times.
 - e. Initiate the analysis sequence (F5).
 - f. Calibrate the instrument using single standard calibration (fixed at origin) following the procedure outlined in the operator's instruction manual.
 - g. Verify the calibration by analyzing ~0.1 g of a pure compound different than the material used for calibration. For example, if Phenylalanine was used for calibration, verify the calibration using EDTA or BBOT.

Note: Multi-point (fractional weight or multiple calibration samples) may be used to calibrate if desired. Typically single-point calibration using a pure compound provides a suitable and cost-effective calibration. Refer to the operator's instruction manual for details regarding multi-point calibration.

4. Analyze Sample
 - a. Weigh ~0.08 to 0.1 g of coal sample into 502-186 Tin Foil Cup and seal.
 - b. Enter sample mass and identification into Sample Login (F3).
 - c. Transfer sample to the appropriate position on the sample carousel.
 - d. Initiate the analysis sequence (F5).

Note: Coal should be analyzed "as received". Analytical values are corrected for moisture after analysis. Moisture should be determined within the same day the coal is analyzed.

LECO

Organic Application Note

Typical Results

(Based on single standard calibration with 0.1 g of 502-642 Phenylalanine)

Sample	Mass (g)	Carbon	Hydrogen	Nitrogen
LECO 502-092	0.1010	41.09	5.63	9.58
EDTA Lot 1055	0.1070	41.06	5.58	9.57
41.06 ±0.09% C	0.1027	41.08	5.56	9.58
5.55 ±0.03% H	0.1004	41.11	5.57	9.58
9.56 ±0.03% N	0.1010	41.05	5.56	9.57
	X =	41.08	5.58	9.58
	s =	0.02	0.03	0.01
LECO 502-680	0.0851	80.57	4.07	1.06
lvb Coal*	0.0868	80.68	4.04	1.07
81.4 ±2.3% C	0.0857	80.60	4.00	1.07
4.06 ±0.26% H	0.0859	80.62	4.02	1.07
1.10 ±0.15% N	0.0860	80.49	3.98	1.07
	X =	80.59	4.02	1.07
	s =	0.07	0.04	0.003
LECO 502-681	0.0852	77.79	4.92	1.46
hvAb Coal**	0.0859	77.70	4.93	1.46
78.4 ±0.9% C	0.0859	77.82	4.92	1.46
4.98 ± 0.14% H	0.0861	77.84	4.94	1.46
1.46% ±0.08% N	0.0856	77.81	4.91	1.46
	X =	77.81	4.92	1.46
	s =	0.07	0.01	0.001

*Low Volatile Bituminous Coal, Alberta Canada.
 **High Volatile A Bituminous Coal, West Virginia, USA.

LECO Corporation

3000 Lakeview Avenue • St. Joseph, MI 49085 • Phone: 800-292-6141 • Fax: 269-982-8977
 info@leco.com • www.leco.com • ISO-9001:2008 HQ-Q-994 • LECO is a registered trademark of LECO Corporation.

Determination of Moisture, Volatile Matter, and Ash in Biomass/Plant Tissue

LECO Corporation; Saint Joseph, Michigan USA

Instrument: TGA701



Introduction

Moisture, volatile matter, and ash are important constituents for the quality characterization of fuel materials. Moisture, as determined by this instrument, is used for calculating analytical results of the fuel to a dry basis. The ash determination is typically used to calculate ash yields for the fuel and other calculations involving the material balance for ash handling and disposal requirements for the fuel utilization. Volatile matter is a primary constituent of solid fuels used in assessing the combustion characteristics.

Sample Preparation

Samples must be of uniform consistency to produce suitable results. Typically, samples should be ground to a fineness of <0.5 mm.

Accessories

621-331 Ceramic Crucibles, 529-048 Ceramic Covers, 611-844 Spoon

Sample Mass ~1.0 g

Analysis Time ~4.5 hours

Method General Parameters

Crucible Type	Ceramic
Crucible Density	3.00
Cover Density	3.00
Sample Type	Biomass
Sample Density	1.50

System

Significant Digits	F6
Barometric Pressure	760
Cover Open Half	800
Cover Open Full	450
Furnace Over Temp.	1200
Increment Sample Names	Disable
Crucible Locations	Auto Find
Temperature Check	False
Alarm On Errors	True
Cover Option	Half Open
Carousel Option	Weigh Position
Batch Mode	False
Enable Lid Dispenser	False

Balance

Readability	4
Balance Environment	Stable
Balance Constancy	Absolute Weight (g)
Minimum Weight	0.8 g
Maximum Weight	1.2 g
Zero Deviation	0.0005
Retake Initial Weights	False

Method Step Parameters

Parameter	Moisture	Volatile	Ash
Covers	No	Yes	No
Start Temp. °C	25	107	600
End Temp. °C	107	950	750
Ramp Rate	6	50	3
Ramp Time (h:m)	0:13	0:16	0:50
Hold Time (h:m)	0:15	0:07	0:00
Total Time (h:m)	0:28	0:23	0:50
Max Time (h:m)	0:00	0:00	0:00
Atmosphere	Nitrogen	Nitrogen	Oxygen
Flow Rate	High	High	Low
Window	3	0	3
Comparator	0.0005 g*	100.0000 g	0.0005 g*

Final Weight At Constancy At End of Step At Constancy

*Balance constancy set for Absolute Weight (grams)

Method Equation Parameters

Moisture	$\frac{([Initial\ Mass] - [Moisture\ Mass])}{[Initial\ Mass]} * 100$
Volatile	$\frac{([Moisture\ Mass] - [Volatile\ Mass])}{[Initial\ Mass]} * 100$
Ash	$\frac{[Ash\ Mass]}{[Initial\ Mass]} * 100$
Volatile Dry	$[Volatile] * \frac{100}{(100 - [Moisture])}$
Ash Dry	$[Ash] * \frac{100}{(100 - [Moisture])}$

Procedure

1. Create and/or select a method using the parameters described above following the procedure in the TGA701 Instruction Manual.
2. Login and load samples following the procedure outlined in the TGA701 Instruction Manual.

Typical Results

Sample	Mass(g)	% Moisture	% Volatile Matter Dry	% Ash Dry
Biomass	1.0093	5.44	83.4	0.48
Wood Pulp #1	1.0115	5.38	83.5	0.47
	1.0081	5.39	83.3	0.46
	1.0197	5.39	83.1	0.49
	1.0108	5.37	83.4	0.48
	Avg. =	5.39	83.3	0.47
	s =	0.03	0.14	0.01
Biomass	1.0308	3.32	83.3	0.34
Wood Pulp #2	1.0151	3.35	83.5	0.35
	1.0366	3.31	82.8	0.36
	1.0389	3.32	83.2	0.34
	1.0475	3.32	83.5	0.38
	Avg. =	3.32	83.3	0.36
	s =	0.01	0.28	0.02
Plant Tissue	1.0072	6.04	76.5	8.69
Alfalfa	1.0371	6.13	76.7	8.75
	1.0170	6.04	76.9	8.63
	1.0368	6.06	76.8	8.72
	1.0027	6.21	76.5	8.77
	Avg. =	6.09	76.7	8.71
	s =	0.07	0.16	0.05
Plant Tissue	1.0052	9.17	79.3	2.13
Barley	1.0104	9.22	79.2	2.28
	1.0051	9.12	79.3	2.27
	1.0028	9.14	79.9	2.25
	1.0057	9.17	79.2	2.59
	Avg. =	9.17	79.4	2.30
	s =	0.04	0.31	0.17

Note: LECO recommends a calibration of $y=1x+0$ to be used for volatile matter determination in biomass.



LECO Corporation | 3000 Lakeview Avenue | St. Joseph, MI 49085 | 800-292-6141 | Phone: 269-985-5496
 info@leco.com • www.leco.com | ISO-9001:2008 HQ-Q-994 | LECO is a registered trademark of LECO Corporation.

TGA701 Thermogravimetric Analyzer

Specification Sheet



Sample Mass	1 gram (nominal)		
Number of Samples	19 (+1 reference)		
Precision	0.02% RSD (1.0, 1 g inert sample)		
Balance	Resolution 0.0001 g		
Oven Temperature	Ambient (minimum)		
Temperature Control	Minimum: 100°C Maximum: 1000°C Accuracy: 2% of setpoint, or $\pm 2^\circ\text{C}$; whichever is greater Stability: 2% of setpoint, or $\pm 2^\circ\text{C}$; whichever is greater		
Maximum Ramp Rate	Ambient to 104°C (219°F) 15°C/minute (59°F/minute) 104°C to 1000°C (219°F to 832°F) 50°C/minute (122°F/minute)		
Gas Flow Rate	Low: 3.5 lpm	Medium Low: 5.0 lpm	Medium: 7.0 lpm
	Medium High: 8.5 lpm	High: 10.0 lpm	
Gas Pressure	Air: 45 psi (3.1 bar)	Nitrogen: 35 psi (2.4 bar)	Oxygen: 35 psi (2.4 bar)
*Air Ventilation Requirements	70 to 160 CFM adjustable (33 to 75 lps)		
*Duct Size	4 inch (10 cm)		
	<i>*Note: The TGA701 must be vented to an external exhaust. For moisture-only applications in which the furnace temperature does not exceed 150°C, and the distance from the right side of the TGA701 to the external exhaust is less than 10 feet (3 meters), a passive connection to a 3-inch (75 cm) duct is acceptable.</i>		
Environmental Conditions	Operating Temp: 15°C to 35°C (59°F to 95°F) Humidity: 20% to 80% non-condensing		
Minimum Gas Purity	Air: Dry, oil-free	Nitrogen: 99.9%	Oxygen: 99.5%
Electrical Power Requirements	230V~ ($\pm 10\%$; at max load), 50/60 Hz, single phase, 25 A; 19,700 BTU/hr [†]		
Dimensions	20.5 in H x 24 in W x 22 in D (52 x 61 x 56 cm)		
Weight (approx.)	195 lb. (88 kg)	Shipping Weight (approx.): 246 lb. (112 kg)	
Optional External Blower			
Part Numbers:	621-225 (115 V)	621-263 (230 V)	
Flow:	140 cfm (65 l/s)		
Power:	115 V~ ($\pm 10\%$), single phase, 60 Hz, 1.6 A 230 V~ ($\pm 10\%$), single phase, 50/60 Hz, 0.6/0.8 A		
Part Numbers			
TGA701S4C	TGA701 with PC tower, Windows®-based operating software, and flat panel monitor		
TGA701D4C	TGA701 Dual Furnace Configuration with PC tower, Windows-based operating software, and flat panel monitor		

V~ denotes VAC.
[†]Average output based on nominal operating parameters.

LECO[®]
 Delivering the Right Results

Theory of Operation

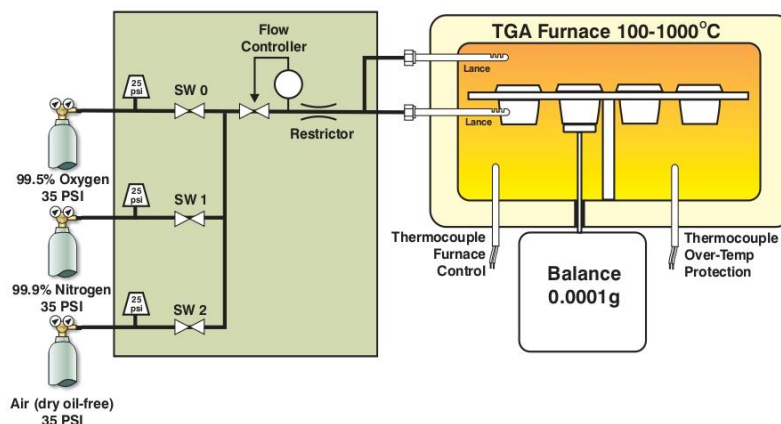
The TGA701 Thermogravimetric Analyzer is used to determine the composition of organic, inorganic, and synthetic materials. It measures weight loss as a function of temperature in a controlled environment. The instrument consists of a computer and a multiple sample furnace that allows up to 19 samples to be analyzed simultaneously.

After an analysis method has been selected, empty crucibles are loaded into the furnace carousel. The analysis method controls the carousel, furnace, and balance operation. On completion of crucible tare, each crucible is presented to the operator for sample loading. The starting sample weight is measured and stored automatically. Once all the crucibles have been loaded, analysis begins. The weight loss of each sample is monitored and the furnace temperature is controlled according to the selected analysis method. The percent weight loss for each sample is reported at the end of each analysis step.

The instrument contains an easy-to-follow menu-driven Windows-based software program that allows analysis methods to be tailored to satisfy most analytical applications. Temperature, temperature ramp rate, and atmosphere are selectable for each step. Analysis methods can be entered to perform moisture, volatile, ash, or combinations of these three stages. Other menus allow on-screen plotting of sample weight loss with hard copy selection after the screen review. Built-in diagnostic functions can be performed via menu selections.

The key to the automated analysis capability is the LECO multiple sample furnace. The 19-position sample carousel and balance pedestal are located in the furnace. The samples are automatically indexed to the position above the balance pan. The carousel is lowered to place a sample crucible onto the pedestal and the weight is recorded. The cycle continues throughout the entire program. All weighing is performed automatically.

Flow Diagram



*Specifications and part numbers may change.
Consult LECO for latest information.
Windows® is a registered trademark of Microsoft Corporation.*

3000 Lakeview Avenue • St. Joseph, MI 49085 • Phone: 800-292-6141 • Fax: 269-982-8977
info@leco.com • www.leco.com • ISO-9001:2008 HQ-Q-994 • LECO is a registered trademark of LECO Corporation.

LECO Corporation
LECO
Delivering the Right Results

Form No. 209-149-001


1/15-REV6

© 2014 LECO Corporation

CHN628 Series Micro Oxygen Add-On Module

Specification Sheet



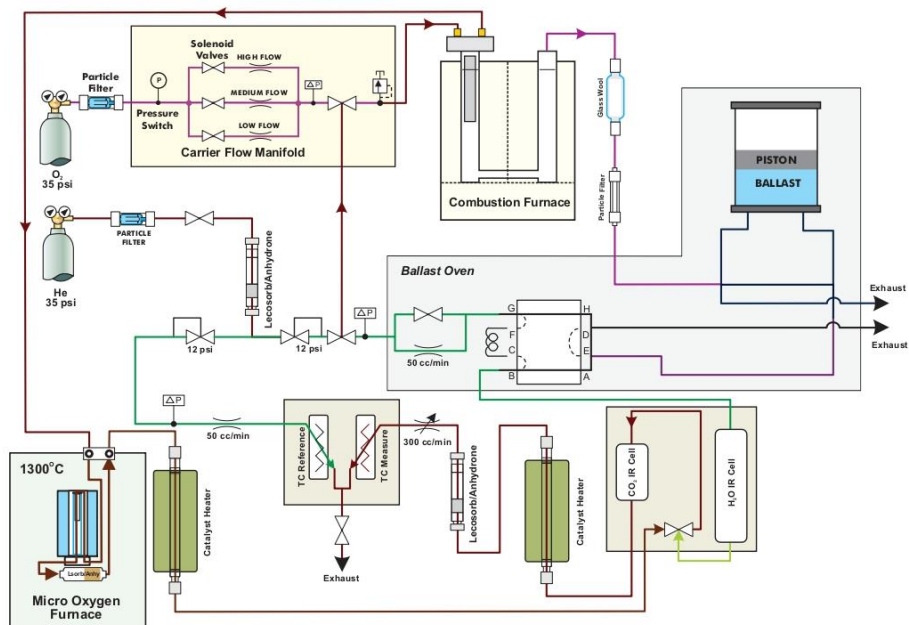
Instrument Range*	Oxygen: 0.0008 to 2 mg
Precision Range	Oxygen: 0.0004 mg or <1% RSD (whichever is greater)
Analysis Time	Oxygen: 80 seconds
Nominal Sample Weight	2 mg 
Detection Method	Oxygen: Optimized, low-noise, non-dispersive Infrared (IR) absorption
Gas Requirements	Carrier: Helium (99.99% pure) @ 35 psi (2.4 bar) ±10% Pneumatic: Compressed air (source must be oil and water free); 40 psi (2.8 bar) ±10%
Furnace	Resistance pyrolysis furnace up to 1300°C
Autoloader	30-position (stackable to 120 samples)
Instrument Requirements	CHN628 Model
Operational Control	CHN628 Series Software
Electrical Requirements	230 V~ (±10%; at max load), 50/60 Hz, single phase, 24A; 14,126 BTU/hr**
Environmental Conditions	Operating Temp: 15°C to 30°C (59°F to 86°F) Humidity: 20% to 80%, non-condensing
Physical Dimensions†	15 in. H x 12 in. W x 22 in. D (38 x 30 x 56 cm)
Weight (approx.)	91 lb. (41 kg) Shipping Weight (approx.): 142 lb. (64 kg)
Part Numbers	
CHN628OC	CHN628 with 628 Micro Oxygen Module Instrument Package
628OADD	628 Micro Oxygen Add-On Module; Compatible with the CHN628 Model
628OTRSM	628 Micro Oxygen Add-On Module; Compatible with the Micro TruSpec CHN/CHNS Models
628OTRS	628 Micro Oxygen Add-On Module; Compatible with the TruSpec CHN Models
Optional Accessories	
751-600-120	Six-Place Electronic Micro-Balance Kit

*Adjusting sample size may extend instrument range.
 **Average output based on nominal operating parameters.
 †Allow a 6-inch (15 cm) minimum access area around all units.
 V~ denotes VAC.

Theory of Operation

The optional micro oxygen add-on module enables the CHN628 Series to determine oxygen content in organic matrices. Samples being analyzed for oxygen are placed into the autoloader of the micro oxygen add-on module and automatically dropped into a high-temperature pyrolysis furnace operating at 1300°C. The oxygen released during pyrolysis of the sample reacts with a carbon-rich environment in the furnace to form CO. The CO is swept from the furnace and converted to CO₂ before measurement via infrared detector (approximately 1 minute analysis time).

Flow Diagram



Specifications and part numbers may change.
Consult LECO for latest information.

3000 Lakeview Avenue • St. Joseph, MI 49085 • Phone: 800-292-6141 • Fax: 269-982-8977
info@leco.com • www.leco.com • ISO-9001:2008 HQ-Q-994 • LECO is a registered trademark of LECO Corporation.

LECO Corporation 
Delivering the Right Results

Form No. 209-218-006

8/15-REV4

© 2015 LECO Corporation

Anexo 8: Registro fotográfico

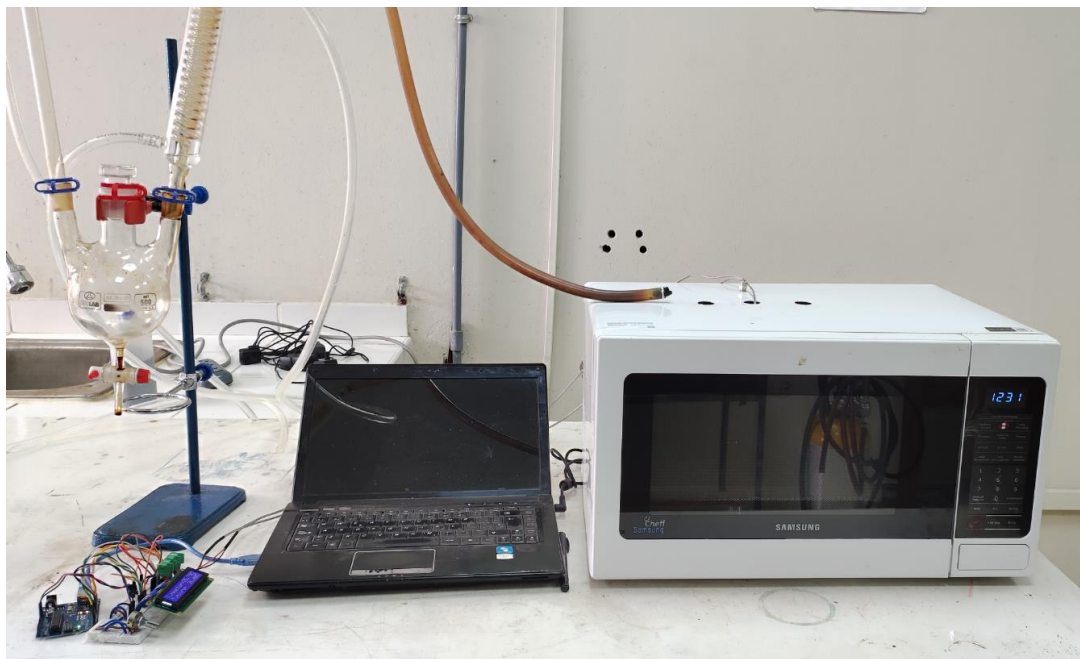
Fotografía 1

Reactor de pirólisis asistida por microondas y tanque de nitrógeno



Fotografía 2

Pirólisis asistida por microondas



Fotografía 3

Muestra de cascarilla de café



Fotografía 4

Muestras de cascarilla de café y carburo de silicio para experimentos



Fotografía 5

Matraz de tres bocas con cascarilla de café



Fotografía 6

Reactor de pirólisis asistida por microondas y condensadores



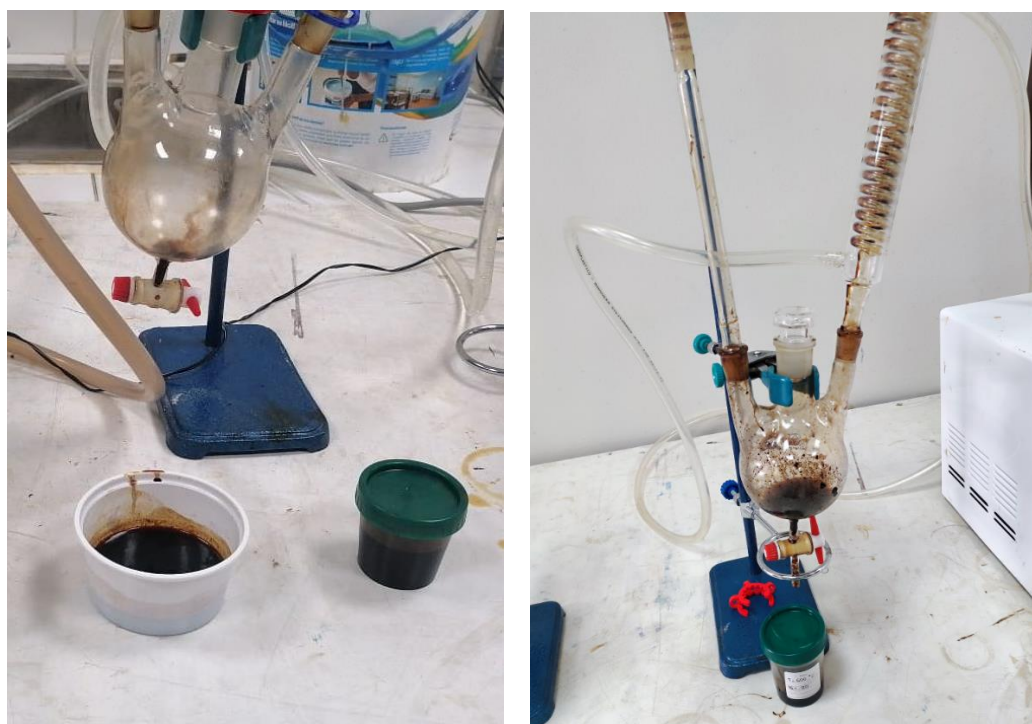
Fotografía 7

Pirólisis asistida por microondas de cascarilla de café



Fotografía 8

Recolección de bioaceite de cascarilla de café



Fotografía 9

Muestras de bioaceite de cascarilla de café



Fotografía 10

Reactor de pirólisis asistida por microondas de cascarilla de café

