

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



“BIOCARBÓN DE CASCARILLA DE CAFÉ GENERADO POR
PIROLISIS ASISTIDA POR MICROONDAS PARA OBTENER
BRIQUETAS A NIVEL LABORATORIO 2023”

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

AUTORES:

RIVAS CURISINCHE MERCEDES CAMILA

TOSCAINO CASAS KATHERINE KELLY

VICENTE HERRERA EMMY JOSSELIN

ASESOR: Mtro. ABNER JOSUÉ VIGO ROLDÁN

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: CIENCIAS DE LA TIERRA Y DEL AMBIENTE

CALLAO, 2023

PERÚ



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° 002-2023 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. 81 ACTA N°002-2023 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 08:50 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
Mtro. Abner Josué Vigo Roldán	: Asesor

Se dio inicio al acto de sustentación de la tesis de los Bachilleres Mercedes Camila Rivas Curisinche, Katherine Kelly Toscaino Casas y Emmy Josselin Vicente Herrera, quienes habiendo cumplido con los requisitos para optar el Título Profesional de Ingeniero Ambiental y de Recursos Naturales, sustentan la tesis titulada: **“BIOCARBÓN DE CASCARILLA DE CAFÉ GENERADO POR PIROLISIS ASISTIDA POR MICROONDAS PARA OBTENER BRIQUETAS A NIVEL LABORATORIO 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 09:40 horas del día sábado 19 de agosto del año en curso.

Presidente

Secretario



Vocal

Asesor

Document Information

Analyzed document	INFORME FINAL DE TESIS_RIVAS CURISINCHE-TOSCAINO CASAS-VICENTE HERRERA.pdf (D172906884)
Submitted	8/17/2023 9:46:00 PM
Submitted by	
Submitter email	fiarn.investigacion@unac.edu.pe
Similarity	1%
Analysis address	unidad.de.investigacion.fiarn.unac@analysis.arkund.com

Sources included in the report

SA	Universidad Nacional del Callao / TESIS_CARMONA MENDEZ-BRUNO GREY_BIOACEITE OBTENIDO DE LA CASCARILLA DE CAFE, MEDIANTE PIROLISIS ASISTIDA POR MICROONDAS, CALLAO 2023..pdf		4
	Document TESIS_CARMONA MENDEZ-BRUNO GREY_BIOACEITE OBTENIDO DE LA CASCARILLA DE CAFE, MEDIANTE PIROLISIS ASISTIDA POR MICROONDAS, CALLAO 2023..pdf (D172859416)		
	Submitted by: fiarn.investigacion@unac.edu.pe		
	Receiver: unidad.de.investigacion.fiarn.unac@analysis.arkund.com		
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		1
	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		

Entire Document

11.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 1.1. Descripción de la realidad problemática En la actualidad, la agroindustria a nivel mundial se enfrenta al desafío de gestionar de manera adecuada sus subproductos y residuos, principalmente los productores de café, que generan grandes cantidades de residuos, como la cascarilla de café, los cuales conllevan a preocupaciones debido a su impacto ambiental negativo ya que no hay un control o manejo adecuado en cuanto a su disposición final. En Centroamérica, durante la campaña de 2018-2019 más de un millón de agricultores centroamericanos produjeron cerca de 16.4 millones de sacos de 100 lb de café, generando miles de toneladas de residuos que, en cada saco, representan cerca del 80% del peso total. (IICA, 2022). Por otro lado, en Colombia, la cascarilla del café es uno de los subproductos agrícolas con mayor producción en el país: alrededor de 13.6 millones de sacos de 60 kilos en 2022, según informó la Federación Nacional de Cafeteros. (FNC, 2022). El Perú representa el séptimo país exportador de café a nivel mundial, y en cuanto a productos agrícolas, el café es el primero en exportación. Aproximadamente 425,416 hectáreas están dedicadas al cultivo de café, las cuales representan 6% del área agrícola nacional. El potencial de crecimiento del café en el país es alrededor de 2 millones de hectáreas (MINAGRI, 2022). Asimismo, según el Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI) en julio del 2021 la producción de café registró 69 mil 139 toneladas, volumen superior en 17,0% a lo obtenido en similar mes del año anterior (INEI, 2021). En el valle del Monzón - Huánuco en el 2019, se produjeron aproximadamente 700 toneladas de café (Andina, 2019), lo que equivaldría a la generación de aproximadamente la misma cantidad de cascarilla de café, representando un problema ambiental para la comunidad pues no cuentan con la infraestructura adecuada para disponer estos residuos.

INFORMACIÓN BÁSICA

FACULTAD:

INGENIERÍA AMBIENTAL Y DE RECURSOS NATURALES

UNIDAD DE INVESTIGACIÓN DE LA FACULTAD DE INGENIERIA
AMBIENTAL Y DE RECURSOS NATURALES

TÍTULO:

“BIOCARBÓN DE CASCARILLA DE CAFÉ GENERADO POR PIROLISIS
ASISTIDA POR MICROONDAS PARA OBTENER BRIQUETAS A NIVEL
LABORATORIO 2023”

AUTORES:

RIVAS CURISINCHE, MERCEDES CAMILA / 0009-0006-5340-4051/ 70812794

TOSCAINO CASAS, KATHERINE KELLY/ 0009-0004-4102-1577/ 46970943

VICENTE HERRERA, EMMY JOSSELIN/ 0009-0002-6517-5584/ 47993715

ASESOR:

Mtro. ABNER JOSUÉ VIGO ROLDÁN / 0000-0002-5611-8011/ 08085074

LUGAR DE EJECUCIÓN:

LABORATORIOS DE LA FACULTAD DE INGENIERIA AMBIENTAL Y DE
RECURSOS NATURALES

UNIDAD DE ANÁLISIS:

BIOCARBÓN DE CASCARILLA DE CAFÉ

TIPO / ENFOQUE / DISEÑO DE INVESTIGACIÓN:

APLICADA / CUANTITATIVO / EXPERIMENTAL

TEMA OCDE: 2.09.03 – BIOCOMBUSTIBLES

DEDICATORIA

Queremos dedicar este logro a todos aquellos que han sido parte fundamental en nuestro camino hacia la culminación de esta tesis.

A nuestras familias, por su constante apoyo, por ser nuestro soporte en los momentos más difíciles y por creer en nuestras capacidades.

A nuestro asesor, por su sabiduría, paciencia y guía invaluable a lo largo de esta investigación. A todas aquellas personas que de alguna manera nos brindaron su colaboración, su tiempo y sus conocimientos, contribuyendo así al éxito de esta investigación. Esta tesis es el resultado del esfuerzo conjunto y dedicación de cada uno de nosotros, pero también es el fruto del apoyo incondicional de todas estas personas que nos rodean. A todos ustedes, nuestro más sincero agradecimiento y gratitud. Sin su apoyo, esta meta no habría sido posible.

ÍNDICE DE CONTENIDO

DEDICATORIA.....	6
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	7
ÍNDICE DE TABLAS	10
ÍNDICE DE FIGURAS	12
ÍNDICE DE ABREVIATURAS	13
RESUMEN	14
ABSTRACT	15
INTRODUCCIÓN	16
I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	18
1.1. Descripción de la realidad problemática	18
1.2. Formulación del problema.....	20
1.2.1. <i>Problema general</i>	20
1.2.2. <i>Problemas específicos</i>	21
1.3. Objetivos	21
1.3.1. <i>Objetivo general</i>	21
1.3.2. <i>Objetivos específicos</i>	21
1.4. Justificación	21
1.5. Delimitantes de la investigación	24
1.5.1. <i>Delimitante teórica</i>	24
1.5.2. <i>Delimitante temporal</i>	24
1.5.3. <i>Delimitante espacial</i>	24
II. MARCO TEÓRICO.....	25
2.1. Antecedentes del estudio.....	25
2.1.1. <i>Internacionales</i>	25
2.1.2. <i>Nacionales</i>	29

2.2.	Bases Teóricas	32
	<i>Pirólisis asistida por microondas</i>	37
	<i>Características de la pirólisis asistida por microondas</i>	37
	<i>Tipos de Biocombustibles</i>	39
	<i>Características Técnicas de las briquetas</i>	40
	Marco normativo	42
2.3.	Marco conceptual	43
	Biocarbón	43
	Briqueta	43
2.4.	Definición de términos básicos	44
III.	HIPÓTESIS Y VARIABLES	47
3.1	Hipótesis	47
3.1.1	Hipótesis General	47
3.1.2	Hipótesis específicas	47
3.1.3	Operacionalización de variables	48
IV.	METODOLOGÍA	49
4.1	Diseño metodológico	49
4.2	Método de investigación	52
4.3	Población y muestra	62
4.3.1.	<i>Población</i>	62
4.3.2.	<i>Muestra</i>	63
4.4	Lugar del estudio.	63
4.5	Técnicas e instrumentos para la recolección de la información.	64
4.5.1.	<i>Técnica</i>	64
4.5.2.	<i>Instrumentos de medición</i>	65
4.6	Análisis y procesamiento de datos	66

4.7	Aspectos éticos de la investigación	66
V.	RESULTADOS	68
5.1	Resultados descriptivos	68
5.1.1	Resultados del primer objetivo específico.....	68
5.1.2	Resultados del segundo objetivo específico	71
5.1.2.	Resultados del tercer objetivo específico.....	86
VI.	DISCUSION DE RESULTADOS	101
6.1	Contrastación y demostración de la hipótesis con los resultados	101
6.2	Contrastación de los resultados con otros estudios similares.....	104
6.3	Responsabilidad ética de acuerdo con los reglamentos vigentes.....	106
VII.	CONCLUSIONES.....	107
VIII.	RECOMENDACIONES.....	109
IX.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS (ISO 690).....	111
X.	ANEXOS.....	121

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. <i>Operacionalización de la variable</i>	48
Tabla 2. <i>Diseño de superficie de respuesta</i>	49
Tabla 3. <i>Diseño Central Compuesto</i>	51
Tabla 4. <i>Corridas experimentales de diseño de superficie de respuesta</i>	52
Tabla 5. <i>Técnicas e instrumentos de los parámetros analizados de la cascarilla de café</i>	55
Tabla 6 <i>Proporciones de BC de CC, aglutinante y agua</i>	59
Tabla 7 <i>Cálculos para la DA</i>	61
Tabla 8. <i>Técnicas para analizar los datos</i>	64
Tabla 9. <i>Instrumentos de medición</i>	65
Tabla 10. <i>Fichas de recolección de datos</i>	65
Tabla 11. <i>Análisis proximal, energética y elemental de la CC y biocarbón de CC</i>	68
Tabla 12. <i>Descripción de las temperaturas en cada experimento</i>	72
Tabla 13. <i>Resultado de rendimiento del biocarbón</i>	81
Tabla 14. <i>Análisis de regresión</i>	82
Tabla 15. <i>Análisis de regresión corregido</i>	82
Tabla 16. <i>Solución de optimización</i>	85
Tabla 17. <i>Análisis proximal de briquetas</i>	86
Tabla 18. <i>Análisis proximal de la CC, Biocarbón de CC y Briquetas de biocarbón de CC</i>	90
Tabla 19. <i>Análisis de los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas</i>	92
Tabla 20. <i>IC (95%) para la media de la humedad</i>	93
Tabla 21. <i>Prueba U Mann de Whitney para el % de humedad</i>	94
Tabla 22. <i>IC (95%) para la media de la materia volátil</i>	94
Tabla 23. <i>T de Student para el % de MV</i>	95
Tabla 24. <i>IC (95%) para la media del contenido de ceniza</i>	95
Tabla 25. <i>T de Student para él % de ceniza</i>	96
Tabla 26. <i>IC (95%) para la media del carbono fijo</i>	97

Tabla 27. <i>T de student para el % de CF</i>	97
Tabla 28. <i>IC (95%) para la media del poder calorífico superior</i>	98
Tabla 29. <i>Prueba U Mann de Whitney para el PCS</i>	99
Tabla 30. <i>IC (95%) para la media de la densidad aparente</i>	99
Tabla 31. <i>Prueba U Mann de Whitney para el DA</i>	100

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. <i>Tipo de briquetas.</i>	41
Figura 2. <i>Modelo analítico.</i>	50
Figura 3. <i>Procedimiento de investigación.</i>	53
Figura 4. <i>Diseño del reactor pirolítico.</i>	56
Figura 5. <i>Procedimiento de elaboración de briquetas.</i>	59
Figura 6. <i>Ubicación del lugar donde se obtuvo la biomasa</i>	64
Figura 7. <i>Análisis proximal de la CC y biocarbón de CC.</i>	69
Figura 8. <i>Análisis elemental de la CC y biocarbón de CC.</i>	71
Figura 9. <i>Graficas de temperaturas vs tiempo</i>	74
Figura 10. <i>Diagrama de Pareto</i>	83
Figura 11. <i>Gráficas de contorno de rendimiento con biocarbón.</i>	83
Figura 12. <i>Gráficas de contorno de rendimiento con SiC.</i>	84
Figura 13. <i>Graficas de superficie de rendimiento con Biocarbón</i>	84
Figura 14. <i>Gráficas de superficie de rendimiento con SiC</i>	85
Figura 15. <i>Contenido de humedad de briquetas de biocarbón de CC</i>	87
Figura 16. <i>Contenido de MV de briquetas de biocarbón de CC.</i>	87
Figura 17. <i>Contenido de ceniza de briquetas de biocarbón de CC.</i>	88
Figura 18. <i>Contenido de carbono fijo de briquetas de biocarbón de CC.</i>	88
Figura 19. <i>Contenido de poder calorífico de briquetas de biocarbón de CC.</i> ..	89
Figura 20. <i>Densidad aparente de briquetas de biocarbón de CC</i>	89

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

ASTM:	Sociedad Americana para Pruebas y Materiales
CC:	Cascarilla de Café
CEN:	Comité Europeo de Normalización
CF:	Carbono Fijo
DA:	Densidad Aparente
IIEA:	Instituto de Investigación de Especialización en Agroindustria
MAP:	Pirolisis asistida por microondas
MV:	Materia volátil
NTC:	Norma Técnica Colombiana
PSI:	Libra por Pulgada Cuadrada
PCS:	Poder calorífico superior
PC:	Poder Calorífico
W:	Watts

RESUMEN

La empresa Aromas de Monzón S.A.C., se enfrenta al desafío de gestionar grandes cantidades de cascarilla de café, un residuo sin aplicación actual. En busca de soluciones sostenibles, la empresa identificó que este residuo puede ser aprovechado para la generación de briquetas y, de esa manera, contribuir a la reducción de la dependencia del uso de leña y carbón en su región. Es por ello que este estudio tuvo como finalidad producir biocarbón de cascarilla de café generado por pirólisis asistida por microondas (MAP) para obtener briquetas a nivel laboratorio. El estudio de enfoque cuantitativo, nivel aplicativo y diseño experimental; se dividió en las siguientes etapas: primero se realizó una caracterización fisicoquímica de la biomasa, para luego determinar aquellas condiciones operativas que logran que el MAP optimice (maximización) el rendimiento del biocarbón de CC, el cual sirvió como insumo principal para la elaboración de briquetas con proporciones de 50/50 y 70/30 (biocarbon/aglutinante); por último, se evaluó las condiciones del proceso de densificación de las briquetas. Los resultados obtenidos demostraron que la mayoría de los parámetros físicos y químico-térmicos evaluados cumplían con los estándares establecidos en la norma técnica colombiana NTC 2060; sin embargo, se observaron desviaciones en el contenido de humedad y materia volátil (MV), los cuales se encontraban por encima de los límites aceptables. Además, se observó que las briquetas elaboradas al porcentaje de 50/50 presentaron un poder calorífico promedio de 17,26 MJ/kg y las briquetas elaboradas al porcentaje de 70/30 presentaron un poder calorífico promedio de 16,11 MJ/kg; las propiedades fisicoquímicas (humedad, ceniza, DA y CF) y térmicas (PCS), no varían con el aumento del contenido de biocarbón en las mezclas, a excepción del contenido de MV, que disminuyó a medida que el porcentaje de biocarbón aumentaba. Se concluye que un insumo como el biocarbón de CC producido por MAP, se configura como una oportunidad para la empresa de elaborar productos densificados (briquetas) que aporten a la sostenibilidad ambiental de la región.

Palabras clave: Biocarbón, briquetas, pirólisis, cascarilla de café.

ABSTRACT

The company Aromas de Monzón S.A.C., faces the challenge of managing large quantities of coffee husks, a waste product with no current application. In search of sustainable solutions, the company identified that this waste can be used to generate briquettes and, in this way, contribute to the reduction of dependence on the use of firewood and charcoal in its region. Therefore, the purpose of this study was to produce biochar from coffee husks generated by microwave-assisted pyrolysis (MAP) to obtain briquettes at the laboratory level. The study, with a quantitative approach, applicative level and experimental design, was divided into the following stages: first, a physicochemical characterization of the biomass was carried out, to then determine those operating conditions that allow the MAP to optimize (maximize) the yield of CC biochar, which served as the main input for the production of briquettes with proportions of 50/50 and 70/30 (biochar/agglutinant); finally, the conditions of the briquette densification process were evaluated. The results obtained showed that most of the physical and chemical-thermal parameters evaluated complied with the standards established in the Colombian technical norm NTC 2060; however, deviations were observed in the moisture and volatile matter (MV) content, which were above the acceptable limits. In addition, it was observed that the briquettes produced at the 50/50 percentage had an average calorific value of 17.26 MJ/kg and the briquettes produced at the 70/30 percentage had an average calorific value of 16.11 MJ/kg; the physicochemical (moisture, ash, DA and CF) and thermal (PCS) properties did not vary with the increase of biochar content in the mixtures, except for the MV content, which decreased as the biochar percentage increased. It is concluded that an input such as CC biochar produced by MAP is an opportunity for the company to produce densified products (briquettes) that contribute to the environmental sustainability of the region.

Key words: Biochar, briquettes, pyrolysis, coffee husk.

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, la generación masiva de residuos sólidos representa uno de los mayores desafíos ambientales a nivel mundial. En este contexto, la industria cafetalera no es ajena a esta problemática, ya que produce grandes cantidades de cascarilla de café como subproducto de su proceso productivo. Estos residuos, si no reciben un adecuado aprovechamiento, se convierten en un residuo sin valor agregado.

En el Perú se producen grandes toneladas métricas de cascarilla de café, la cual actualmente no se utilizan ni en la industria ni en el hogar, desaprovechando de esta forma el potencial que tiene esta biomasa para proveer energía a un bajo costo, especialmente en regiones y zonas cafetaleras como el distrito del Monzón, perteneciente a la provincia de Huamalíes, Huánuco.

Por otro lado, la pirólisis ha demostrado ser una tecnología eficiente para convertir la biomasa en biocombustibles sólidos, el cual puede ser elaborado como una briqueta y ser usado como un combustible de calidad. Así mismo, el proceso de calentamiento pirolítico mejora si se utiliza la energía de microondas, que provee de menores tiempos de termo conversión de la biomasa, lo que implica menores costos de energía, así como productos finales de mejor calidad.

Es por ello que esta investigación de enfoque cuantitativo, nivel aplicativo y diseño experimental tuvo como objetivo elaborar biocarbón de cascarilla de café generado por pirolisis asistida por microondas, con el fin de obtener briquetas a partir del rendimiento del biocarbón, todo ello a través de dos experimentos a nivel laboratorio.

El primer experimento tuvo como finalidad encontrar el mejor rendimiento de biocarbón obtenido a través de la pirólisis de cascarilla de café asistida por microondas, para ello se aplicó un diseño de superficie de respuesta con factores como temperatura de pirolisis (mínimo 350°C – máximo 500°C), % de susceptor (mínimo 10 – máximo 20) y tipo de susceptor (Biocarbón y Carburo de Silicio).

En el segundo experimento, se elaboraron briquetas mezclando el biocarbón obtenido en el proceso anterior con aglutinante (almidón de yuca) en dos

diferentes proporciones (50% y 70%) con el fin de obtener la briqueta con las mejores propiedades físicas y químico - térmicas para ser usadas de manera doméstica en la generación de calor, promoviendo de esta manera la sustitución del uso de leña y carbón.

I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción de la realidad problemática

En la actualidad, la agroindustria a nivel mundial se enfrenta al desafío de gestionar de manera adecuada sus subproductos y residuos, principalmente los productores de café, que generan grandes cantidades de residuos, como la cascarilla de café, los cuales conllevan a preocupaciones debido a su impacto ambiental negativo ya que no hay un control o manejo adecuado en cuanto a su disposición final.

En Centroamérica, durante la campaña de 2018-2019 más de un millón de agricultores centroamericanos produjeron cerca de 16.4 millones de sacos de 100 lb de café, generando miles de toneladas de residuos que, en cada saco, representan cerca del 80% del peso total. (IICA, 2022).

Por otro lado, en Colombia, la cascarilla del café es uno de los subproductos agrícolas con mayor producción en el país: alrededor de 13,6 millones de sacos de 60 kilos en 2022, según informó la Federación Nacional de Cafeteros. (FNC, 2022).

El Perú representa el séptimo país exportador de café a nivel mundial, y en cuanto a productos agrícolas, el café es el primero en exportación. Aproximadamente 425,416 hectáreas están dedicadas al cultivo de café, las cuales representan 6% del área agrícola nacional. El potencial de crecimiento del café en el país es alrededor de 2 millones de hectáreas (MINAGRI, 2022). Asimismo, según el Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI) en julio del 2021 la producción de café registró 69 mil 139 toneladas, volumen superior en 17,0% a lo obtenido en similar mes del año anterior (INEI, 2021).

En el valle del Monzón - Huánuco en el 2019, se produjeron aproximadamente 700 toneladas de café (Andina, 2019), lo que equivaldría a la generación de aproximadamente la misma cantidad de cascarilla de café, representando un problema ambiental para la comunidad pues no cuentan con la infraestructura adecuada para disponer estos residuos.

Actualmente se han realizado estudios que permiten encontrar nuevos procesos y prácticas para el manejo de estos residuos. En dichas investigaciones, se propone como alternativa utilizar estos residuos para la producción de biogás, biodiesel, bioetanol y/o biocarbón como fuente de energía.

De todas las fuentes de energía, la biomasa es el tercer recurso energético más grande del mundo. También es la fuente más dominante de energía para cocinar y calentar para las tres cuartas partes de todas las personas en los países en desarrollo, y representa alrededor del 14% del uso total de energía a nivel mundial. (Sunday Y. et al 2020).

Es por ello que, en los últimos años diversos países han aumentado el interés en aprovechar este tipo de residuos con la finalidad de reducir su impacto ambiental a través de nuevas tecnologías o métodos.

Para reducir las amenazas planteadas por el consumo continuo de combustibles fósiles, el uso y la eliminación ineficientes de la biomasa se plantea la utilización eficaz de los residuos de biomasa convirtiéndolo en briquetas a través de la densificación. Las briquetas se utilizan a nivel doméstico e industrial para la generación de calor y energía. (Sunday Y. et al 2020).

Las técnicas termoquímicas, como la pirólisis, combustión y gasificación, han sido ampliamente estudiadas y utilizadas para la conversión de residuos sólidos en fuentes de energía aprovechables (Sindhu et al., 2019). En este contexto, la tecnología de microondas se destaca como una opción eficiente y prometedora para la pirólisis de biomasa y la producción de biocarbón y biocombustibles.

Además, en comparación con las tecnologías convencionales, la pirólisis por microondas produce carbón de mayor rendimiento. Así mismo, es capaz de lograr un funcionamiento continuo mientras emite menos contaminación. La pirólisis de biomasa por microondas es rentable cuando se consideran el biocarbón, el bioaceite y los gases no condensables. (Vishal Hadiya, et al 2022).

La producción de biocarbón se está desarrollando ampliamente en continentes como América y Europa. India y China son los principales países productores de biocarbón ubicados en el continente asiático (Anon, 2021).

Para el Perú, este tipo de investigaciones es importante ya que aporta una nueva fuente de bioenergía (briquetas) que son obtenidas, a partir, de la mezcla del aglutinante y biocarbón. Esta última, puede ser procesado por distintos sistemas de transferencia de calor. Es por ello, en este estudio se buscó emplear un nuevo método de calentamiento (pirólisis asistida por microondas), donde una de las ventajas de utilizar la microondas a diferencia de otros métodos, es la distribución de temperatura uniforme ya que no depende de una fuente de calor externa (conductancia térmica convencional), lo que resulta un mejor control del proceso de pirólisis y el logro de los productos finales deseados.

Cabe indicar que estas tecnologías no son muy difundidas en el Perú, mucho menos en lugares rurales, donde muchas empresas agroindustriales o afines generan grandes cantidades de residuos de biomasa, lo que implica una pérdida de oportunidades para su aprovechamiento sostenible y la generación de valor agregado.

Si bien existen diferentes tipos de biomasa que podrían ser utilizados en la producción de briquetas, se ha decidido no limitar la investigación a una biomasa en particular.

1.2. Formulación del problema

Un paso fundamental en las investigaciones es como formular las preguntas de investigación a medida que avanzamos en el proceso de investigación; las preguntas de investigación son susceptibles de ser reformuladas durante toda la investigación, permitiendo clarificar la pregunta inicial (Sautu et al., 2005).

1.2.1. Problema general

¿De qué manera el biocarbón de cascarilla de café generado por pirólisis asistida por microondas permite obtener briquetas a nivel laboratorio,2023?

1.2.2. Problemas específicos

¿Cuáles son las propiedades físicas y químico-térmicas del biocarbón de cascarilla de café a nivel laboratorio, 2023?

¿Cuáles son las condiciones de operación del proceso de pirolisis asistida por microondas que influyen en la mejora del rendimiento del biocarbón de cascarilla de café a nivel laboratorio, 2023?

¿Cuál es el porcentaje de biocarbón en la mezcla que mejora las propiedades físicas y químico-térmicas de las briquetas a nivel de laboratorio, 2023?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Elaborar biocarbón de cascarilla de café generado por pirolisis asistida por microondas para obtener briquetas a nivel laboratorio 2023.

1.3.2. Objetivos específicos

- Determinar las propiedades físicas y químico-térmicas del biocarbón de cascarilla de café a nivel de laboratorio, 2023.
- Determinar las condiciones de operación del proceso de pirolisis asistida por microondas que influyen en la mejora del rendimiento de biocarbón de cascarilla de café a nivel laboratorio, 2023.
- Determinar el porcentaje de biocarbón en la mezcla que mejora las propiedades físicas y químico térmicas de las briquetas a nivel laboratorio, 2023.

1.4. Justificación

Justificación ambiental

Esta investigación se enfoca en la gestión adecuada de los residuos de cascarilla de café, evitando su impacto negativo en el medio ambiente. Además, la utilización de briquetas de biocarbón de cascarilla de café promueve la conservación de los bosques al reducir la demanda de leña y carbón vegetal obtenidos de la tala de árboles. De esta manera, la conversión del biocarbon en briquetas ofrece una solución integral para la gestión de residuos.

Justificación normativa

La investigación se basa en la Constitución Política del Perú, que indica en su artículo 2 inc. 22 que toda persona tiene derecho a la paz, a la tranquilidad, al disfrute del tiempo libre y al descanso, así como a gozar de un ambiente equilibrado y adecuado al desarrollo de su vida, en concordancia con ello, esta investigación contribuyó a la sostenibilidad ambiental, dando valor a un residuo, para así sustituir el uso de leña o carbón vegetal, buscando la reducción de la tala de árboles. Además, existe una normativa legal que tiene por finalidad la prevención o minimización de la generación de residuos sólidos en origen, frente a cualquier otra alternativa y prefiere la recuperación y la valorización material y energética de los residuos (D.L N.º 1278). Por otro lado, en el contexto internacional, existe una clasificación (Tipo 2) en la Norma Técnica Colombiana (NTC 2060), que regula las características de las briquetas provenientes de otros materiales distintos al carbón mineral, para su uso doméstico.

Justificación teórica

El estudio del biocarbón de cascarilla de café se justifica desde un punto de vista teórico por las siguientes razones:

Se exploró una nueva técnica de pirólisis asistida por microondas, lo que permitió ampliar los conocimientos sobre este proceso y su aplicabilidad en la obtención de biocarbón de propiedades óptimas.

En el aprovechamiento de residuos, la cascarilla de café es un subproducto generado en grandes cantidades por la industria del café; su disposición inadecuada puede tener impactos ambientales negativos. Mediante este estudio, se buscó aprovechar este residuo de manera eficiente y sostenible, convirtiéndolo en un recurso valioso como materia prima para la producción de briquetas.

En el ámbito del proceso de la elaboración de las briquetas, se utilizó como base a Kpalo et al. (2020), ya que sus estudios se han centrado en la optimización de los parámetros de fabricación de briquetas, como la proporción de materiales de biomasa, el tamaño de las partículas y la humedad, para maximizar la eficiencia de combustión de las briquetas. La investigación está

relacionada con la producción de briquetas a partir de biomasa, y su trabajo contribuye a una mejor comprensión de cómo se pueden aprovechar y valorizar los residuos para producir combustibles sólidos sostenibles y reducir la dependencia de la leña y carbón.

Justificación tecnológica

La investigación se justifica en la necesidad de desarrollar tecnologías económicamente viables, evaluando la factibilidad técnica y económica del proceso y asegurando la disponibilidad de recursos.

La pirólisis asistida por microondas ofrece ventajas en términos de calentamiento rápido y volumétrico de la biomasa generando mayor eficiencia y optimizando el rendimiento del biocarbón a través de sistemas de control adecuados.

Justificación económica

El proceso de pirólisis asistida por microondas es un método limpio (no genera emisiones) que conlleva un ahorro de energía entre el 25% y 75% (Reverte, 2020), lo que implica menorar los costos de operación, generando mayor rentabilidad al momento de producir el biocarbón de cascarilla de café como insumo para la elaboración de briquetas.

Por otro lado, se da valor agregado a la cascarilla de café ya que su transformación a briquetas puede representar oportunidades económicas para los productores de café, aprovechando un residuo que de otra manera sería desechado.

Justificación social

Este estudio se centró en la valorización de residuos agrícolas (CC), un subproducto de la industria cafetera comúnmente desechado, convirtiendo el biocarbón a base de cascarilla de café en briquetas, con el fin de generar un nuevo producto como alternativa accesible para las poblaciones aledañas del Valle del Monzón que siguen utilizando leña o formas rudimentarias para generar calor. Así mismo la empresa generaría más puestos de trabajo en la zona y mejoraría la calidad de vida de los pobladores.

1.5. Delimitantes de la investigación

1.5.1. Delimitante teórica

Este estudio se fundamenta en la termodinámica de materiales, transferencia de calor y por sobre todo al comportamiento de las microondas que generan un campo magnético y eléctrico; este último brinda energía electrocinética a las moléculas de la biomasa y fuerza su rozamiento con otras moléculas dipolares, generándose de esta manera un calentamiento volumétrico. Así mismo la valorización de residuos sustenta esta investigación, pues fundamenta el uso de un residuo para su transformación en productos con un valor agregado.

1.5.2. Delimitante temporal

La recolección de la biomasa se realizó entre los meses de marzo a abril del 2023, a pesar de que la cosecha del café se da a lo largo de todo el año.

Por otro lado, el proceso de caracterización, diseño del reactor y elaboración de las briquetas se llevó a cabo desde mayo de 2023 a julio de 2023.

1.5.3. Delimitante espacial

El diseño del reactor, así como la ejecución de los experimentos del biocarbón, se realizaron en el laboratorio de investigación de la Facultad de Ingeniería Ambiental y Recursos Naturales de la Universidad Nacional del Callao. Y para la obtención de briquetas, se elaboraron en las instalaciones de la Dirección de Producción de Bienes y Servicios de la Universidad Nacional del Callao.

Los análisis de las muestras fueron evaluados según los métodos estandarizados en laboratorios acreditados de la Universidad Nacional Agraria La Molina.

II. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes del estudio

Tal como describe el autor Álvarez Risco (2020) respecto a los antecedentes:

Todos los tipos de investigación necesitan de los antecedentes para revelar el estado del tema seleccionado, se debe tener en cuenta en la elección de los antecedentes las variables de estudio, objetivos y metodologías, o cualquier aspecto que pueda aportar a nuestro tema de estudio, en función a ello se establecieron los siguientes antecedentes.

2.1.1. Internacionales

Setter y Oliveira (2022), en el artículo titulado “Evaluación de las propiedades físico-mecánicas y energéticas de briquetas de cascarilla de café con lignina kraft durante pirólisis lenta” tuvieron como objetivo evaluar las propiedades de briquetas elaboradas con cascarilla de café con adición de lignina kraft para la producción de biocombustibles sólidos de alta calidad físico-mecánica y energética y analizar la factibilidad de convertir estas briquetas en coproductos con mayor valor energético en el proceso de pirólisis. Concluyeron que las propiedades energéticas (CF y PCS) de la cascarilla de café se mejoraron con la adición de lignina kraft, lo que demuestra que la combinación de estos dos residuos agroindustriales tiene un gran potencial para su uso en la producción de bioenergía. Además, el uso de lignina kraft como aditivo demostró ser una alternativa atractiva para mejorar las propiedades físico-mecánicas de las briquetas. Las distribuciones de los productos de pirólisis dependieron de las características del material (proporción de lignina kraft) y de la temperatura final. En esta investigación se utilizó la misma materia prima y un proceso pirolítico convencional para evaluar las propiedades de la briqueta, por lo que ayudará a contrastar si el proceso empleado en el presente estudio tiene un igual o mejor rendimiento.

Workie y Kumar (2022) en su artículo titulado “Producción y Caracterización de Briquetas Combustibles de Cáscara de Café como Fuente Alternativa de Energía”, tuvo como objetivo crear y probar la calidad de las

briquetas de combustible hechas a partir de la cáscara del café. En dicha investigación se construyeron y produjeron un horno de carbón/carbonizador, un sistema de moldeado manual y una estufa de briquetas para quemar las briquetas fabricadas. El carbonizador convierte 15 kg de cascarilla de café cruda en 6 kg de carbón carbonizado en 25 minutos, y la briquetadora manual puede prensar 30 kg por hora. La eficiencia de convertir la cascarilla de café cruda en contenido de carbón carbonizado fue del 40,12%. En el estudio geológico de Etiopía, la dirección del laboratorio geoquímico recibió muestras por triplicado del carbón de briquetas de combustible para su análisis. El contenido de humedad, el contenido de carbono fijo, el contenido de cenizas, el contenido de azufre y el poder calorífico se determinaron utilizando una bomba calorimétrica y un horno de revestimiento cerámico. Las propiedades físicas de las briquetas de combustible oscilaron entre 10,03 % de contenido de humedad, 970 kg/m³ densidad, 81% carbón fijo, 5,15% contenido en cenizas, 0% azufre y 30,54 Kcal/kg poder calorífico superior, según resultados de laboratorio. Concluyeron que las briquetas hechas de cáscara de café tienen muchos potenciales como fuente de energía amigable con el medio ambiente. Reduce la contaminación al mismo tiempo que proporciona una forma segura de deshacerse de los desechos de café. Este estudio implica convertir la cáscara de café en carbón vegetal en un proceso por lotes continuo y respetuoso con el medio ambiente, briquetear el carbón vegetal en forma de combustible sólido y usar una estufa confiable, limpia y fácil de usar diseñada explícitamente para briquetas como combustible. En esta investigación utilizan la misma biomasa para la elaboración de las briquetas, por lo que nos aporta información sobre las propiedades físicas y termoquímicas de las briquetas.

Heredia et al. (2021), en su artículo titulado "Potencial de las cooperativas de agricultores para convertir la cáscara de café en biocarbón y promover la bioeconomía en la Amazonía del norte de Ecuador", tuvo como objetivo analizar la integración de procesos de pirólisis para convertir residuos agrícolas en biocarbón como una forma de implementar la bioeconomía en estas organizaciones (cooperativas de agricultores de la amazonia peruana). Se concluyó que, para estas cooperativas de agricultores, los desechos agrícolas

(es decir, la cascarilla de café) generados en sus centros de procesamiento actualmente tienen poco o ningún valor económico y no son útiles en la agricultura. Las políticas ecuatorianas no restringen la creación de valor de los residuos agrícolas, pero no existen normas o estándares específicos en cuanto a la implementación de procesos de conversión termoquímica como la pirólisis. En Ecuador, que simplemente utilizan residuos agrícolas como combustible. Por lo tanto, no existen normas o reglamentos específicos que puedan utilizarse como referencia para la implementación de procesos de pirólisis para convertir residuos agrícolas en biocarbón. La falta de políticas y estándares para regular los procesos de pirólisis puede interpretarse como una medida del carácter innovador de esta idea. Este estudio justificó la necesidad de aprovechar este tipo de residuos a través de la implementación de una tecnología termoquímica, como la pirólisis.

Pratiwi (2020), en su artículo titulado “Efecto de la temperatura de combustión en la calidad de bioenergía alternativa a partir de residuos de café”, tuvo como propósito principal analizar la influencia de la temperatura pirolítica en la elaboración de briquetas a base de residuos de café. En este estudio para la elaboración de la briqueta se utilizó la pirolisis convencional, teniendo como materia la posos de café, provenientes de restaurante y como aglutinante el almidón tapioca y de yuca. En cuanto al diseño experimental se establecieron dos factores (proporción de aglutinante: 10, 20% y temperatura de pirolisis: 200, 250, 300, 400, 500°C), con el fin de evaluar su efecto en los parámetros del análisis proximal (PCS, MV, CF, % de humedad, % ceniza). Los resultados demuestran que el mayor poder calorífico obtenido, igual a 31.59 MJ/kg se logró a una temperatura pirolítica igual a 300°C y 0% de aglutinante en la mezcla. Esta investigación nos permitió comparar dos tipos de residuos del café que es los pozos de café y la CC.

Setter et al. (2020), en su artículo titulado “Calidad energética de pellets producidos a partir de residuos de café: Caracterización de los productos obtenidos por pirólisis lenta”, tuvo como objetivo producir pellets a partir de residuos de café, evaluar su potencial energético, pirolizar los pellets mediante pirólisis lenta y caracterizar los productos finales del proceso (bioaceite y

biocarbon). Se realizaron análisis de poder calorífico superior (HHV), próximo y de composición química para determinar el potencial energético de la cascarilla de café. Los gránulos se produjeron a partir de las cáscaras de café. Las cascarillas de café se redujeron a partículas en un molino de martillos y, luego, las partículas se clasificaron mediante tamices. Para la peletización se utilizaron las partículas que pasaron por el tamiz con un diámetro de apertura de 1,2 mm. Antes del proceso de peletización, las partículas de cascarilla de café se humedecieron para evitar que la matriz se sobrecalentara debido a la fricción. Los gránulos de cascarilla de café se produjeron utilizando una peletizadora Lippel con una capacidad de producción de 110 kg, canales de compresión de 6 mm de diámetro y un plato matriz con una presión de rodillo de 300 MPa. El proceso se llevó a cabo según la metodología propuesta por Pua et al. (2020). La densidad energética de los gránulos se determinó mediante el producto del poder calorífico neto de la biomasa con la densidad aparente de los gránulos de cascarilla de café. Para el estudio experimental de pirólisis lenta, los gránulos se secaron primero en un horno a 105 °C durante aproximadamente 24 h. La pirólisis lenta se realizó en un horno de mufla, en el que se colocaron aproximadamente 200 g de pellets en una cápsula de acero inoxidable que posteriormente se acopló a la mufla. El procedimiento experimental se realizó a tres temperaturas finales de pirólisis lenta de 400 °C, 450 °C y 500 °C, que se lograron con una velocidad de calentamiento de 10 °C/min. El tiempo de residencia a cada temperatura final fue de 1 h. Al final de cada proceso de pirólisis lenta, se reducía la temperatura interna del horno para recolectar posteriormente el biocarbon. La fracción líquida se recolectó durante todo el proceso y se almacenó en frascos de vidrio. El análisis se realizó por duplicado. Concluyeron que con base en las propiedades energéticas evaluadas para la cascarilla de café se asume que este subproducto de la industria del café puede ser utilizado con fines energéticos. La eficiencia energética en la compactación de la cascarilla de café fue comprobada por la densidad energética, en la que los gránulos presentaron densidad energética estadísticamente superior a la cascarilla de café. Además, la prueba de combustibilidad mostró que la densificación de biomasa promueve un mejor rendimiento energético en

comparación con la biomasa a granel. El estudio confirmó que la temperatura de pirólisis final influye en la distribución y las propiedades del bioaceite y el biocarbon. Este estudio justificó el uso de la cascarilla de café como biocombustible en específico como productos densificados, y además nos advirtió sobre la importancia de la temperatura final para la obtención del biocarbon.

2.1.2. Nacionales

Pérez y Torpoco (2022), en su tesis titulada “Evaluación de la calidad de briquetas como biocombustible sólido, elaboradas a partir del residuo cascarilla café en el Valle del Monzón”, establecieron como propósito principal la evaluación de la calidad de productos densificados (briquetas) a base de CC. Para ello realizaron un pretratamiento a la materia prima, a través de un secado, molienda y tamizado para reducir su tamaño a partículas menores a 1mm. Luego esta materia prima pretratada se mezcló con almidón de yuca en proporciones de CC/Aglutinante iguales a 50/50, 70/30 y 90/10, para densificarlas en un prensa hidráulica a una presión 44.96 PSI. Posteriormente esta briquetas se sometieron a un proceso de sacado en estufa por un periodo de 4 días. Según los resultados a mayor contenido de CC en la briqueta aumenta el poder calorífico, llegando hasta 19.80 MJ/kg, considerado adecuado el poder calorífico de este residuo. En esta investigación se utilizó la misma materia prima al igual que el aglutinante (almidón de yuca), por lo que el presente estudio complementó los resultados obtenidos.

Paredes et al. (2022), en su artículo titulado “Caracterización de dos Biomazas Lignocelulósicas Café Arábica L. para la producción de Biochar”, tuvo como objetivo caracterizar dos biomazas agroindustriales peruanas, pulpa y cascarilla de café para aprovechar estos residuos lignocelulósicos para la producción de biocarbon con fines de remediación ambiental empleando procesos termoquímicos. Para la selección de muestra se obtuvieron dos biomazas residuales: 50kg de pulpa y 60 kg de cascarilla de café adquiridas de la Finca La Ponderosa ubicada en Villa Rica, Oxapampa, Pasco-Perú. Su procedimiento inició con la selección de la muestra, para proceder con su análisis proximal que se realizó de acuerdo con la norma ASTM D7582. Se utilizó el

analizador termogravimétrico TGA 4000 de Perkin Elmer. El cuál se programó con un medio inerte de nitrógeno (70cm³ /min) desde temperatura ambiente hasta 105 °C (a 15 °C/min), para luego continuar a temperatura constante por 80 minutos, posteriormente se empleó una rampa de calentamiento de 30 °C/min para alcanzar los 950 °C, y mantenerla isoterma a 950°C por 7 minutos. La determinación del contenido de ceniza se realizó desde temperatura ambiente hasta 750 °C (a 8 °C/min) con un flujo de oxígeno de 70 cm³ /min. En ambas pruebas se pesó aproximadamente 1mg de biomasa con un tamaño de partícula menor a 250 µm, previamente acondicionada en un desecador por un periodo de 24 horas. Se realizó el ensayo un mínimo de dos veces y se reportó los resultados envase, así como es recibido. El análisis elemental se realizó según las normas ASTM D5373-Método para el contenido de Carbono, Nitrógeno, Oxígeno e Hidrógeno y ASTM D4239 para el contenido de Azufre. Se utilizó analizador elemental de marca LECO, modelo 628 Series y el módulo 628 Series Sulfur Add-On Module. Las muestras con un tamaño de partícula menor a 250 µm fueron previamente secadas y acondicionadas a 105 °C por 24 h, cada uno de los análisis fue realizado tres veces, reportando los resultados en base seca. Finalmente realizaron análisis químico y termogravimétricos. Concluyeron que los valores reportados para el análisis elemental, próximo, químico, poder calorífico y pH concuerdan con los obtenidos en estudios anteriores y son indicadores de un gran potencial para la producción de biocarbón mediante procesos termoquímicos como la pirólisis o gasificación. Finalmente se obtuvieron mayores contenidos de lignina, cenizas y carbono fijo para la pulpa de café, resultando ser un mejor precursor para biocarbón aplicado al acondicionamiento de suelos, a diferencia de la cascarilla de café que debido al menor contenido de cenizas resulta ser un mejor precursor para la obtención de biocombustibles. Esta investigación sustentó el hecho de por qué se utilizó cascarilla de café para combustibles en lugar de otro tipo de residuo proveniente del procesado de café.

Montenegro (2022), en su tesis titulada “Evaluación del poder calorífico de briquetas de biochar obtenido a partir de residuos orgánicos”. Tuvo como objetivo evaluar el poder calorífico de briquetas de biochar a partir de residuos orgánicos

domiciliarios (cascaras). Procedimiento: Las cáscaras fueron sometidos a un secado al aire libre hasta alcanzar una humedad relativa del 12 %, para luego, ser pirolizados en una cocina solar con geometría de un concentrador cilindro parabólico y obtener el biochar. Después, se pulverizó el biochar para luego mezclar con aglomerantes naturales (fécula de yuca y arcilla). La relación de mezcla de 4:1 de materia prima y aglomerante fue agregada agua y dicha mezcla fue compactada en una prensa mecánica manual. Se obtuvo briquetas de forma cilíndricas que fueron secas hasta una humedad 12 %. De ahí, se realizó prueba de encendido, combustión y poder calorífico principalmente. Los resultados determinan que la briqueta de biochar más fécula de yuca se enciende en menor tiempo que la briqueta de biochar más arcilla y el carbón vegetal. Así también, al poder calorífico superior, la briqueta de biochar más fécula de yuca presenta un valor de 4750.75 kcal/kg respecto al 4287.16 kcal/kg de la briqueta de biochar con la arcilla, en consecuencia, poder calorífico útil es mayor. Concluyeron lo siguiente: A lo que respecta al poder calorífico superior, la briqueta de biochar más fécula de yuca y briqueta de biochar más arcilla presentan un valor de 4750.75 kcal/kg y 4287.16 kcal/kg respectivamente, pero, poder calorífico útil es de 3679.60 kcal/kg para la briqueta de biochar más fécula de yuca y 3312.80 kcal/kg para la briqueta de biochar más arcilla. Dichos valores, son similares al poder calorífico del carbón vegetal, por lo que, las briquetas elaboradas en el estudio son una alternativa como combustibles sólidos. Esta investigación aporta información importante con respecto al poder calorífico obtenido.

Huamán et al. (2021), en su tesis titulada “Diseño y elaboración de briquetas ecológicas para la obtención de energía calorífica con residuos agrícolas generados en Masma Chicche, Jauja – 2021”, tenía como objetivo elaborar y analizar las briquetas ecológicas para la obtención de energía calorífica con residuos agrícolas generados en Masma Chicche, Jauja – 2021. Su investigación es inductiva. El tipo de investigación del estudio es de tipo mixto, debido a que “involucra un conjunto de técnicas de recolección, análisis y vinculación de datos cualitativos como también cuantitativos en un mismo estudio, asimismo, porque requiere complementar los procedimientos uno de la otra”. Esta investigación es aplicada, porque da solución a problemas

ambientales a partir de teorías. El nivel de investigación es exploratorio. Concluyeron que se logró identificar el tipo de residuos agrícolas para la elaboración de briquetas, entre ellos se encuentran al bagazo de maíz y paja de cebada, por ser residuos que abundan y se desperdician en la zona. Debido a que una de las características de ambos residuos es su alto poder calorífico superior e inferior, teniendo así al bagazo de maíz con un PCS de 18.4 MJ/kg y PCI de 17.1 MJ/kg (24). Asimismo, la paja de cebada con un PCI de 16.2 MJ/kg. Esta investigación nos aporta información sobre el poder calorífico de otros tipos de biomasa y poder compararlo con la biomasa empleada en nuestra investigación.

2.2. Bases Teóricas

El principio de sostenibilidad ambiental se relaciona con el biocarbón debido a que se genera a partir de la biomasa como la cascarilla de café mediante procesos termoquímicos como la pirólisis asistida por microondas. Este proceso convierte la biomasa en un material con propiedades útiles para la elaboración de briquetas.

El uso de biocarbón tiene beneficios ambientales significativos ya que ayuda a reducir la cantidad de residuos agrícolas, como la cascarilla de café, que de otro modo podrían ser desechados y contribuir a la contaminación.

Biocarbón

Según Escalante et al, (2016), el biocarbón es un subproducto generado en la pirolisis, en donde las bajas temperaturas descomponen los materiales orgánicos de la biomasa.

El biocarbón es el producto procedente de la descomposición de la biomasa a través de procesos termoquímicos con poca o nula presencia de oxígeno (O), algunos de ellos conocidos como pirólisis, gasificación, microgasificación y torrefacción (Présiga et al, 2020)

El biocarbón es el material rico en carbono producido a partir de materia prima orgánica bajo cierta combustión térmica con oxígeno limitado (Wang, 2023).

El biocarbón es un material carbonoso rentable. Tiene abundancia de materia prima, área de superficie alta, microporosidad y capacidad de intercambio iónico (Wang, 2023).

El biocarbón es un bioproducto comercializable que se puede utilizar en la agricultura, la industria y el sector energético. Por lo tanto, la producción de biocarbón puede ayudar a construir suelos y brindar oportunidades de ingresos adicionales (Oni, Oziegbe, & Olawole, 2019).

Condiciones de operación

Las condiciones de operación incluyen variables del proceso como la temperatura de pirólisis, el tipo de materia prima, la masa de la materia prima, la potencia de microondas, el tipo de susceptor, la relación materia prima a susceptor, el tamaño de partícula de la materia prima y la carga del susceptor gobiernan el mecanismo de pirólisis. La variación de estos indicadores condiciona el proceso y la calidad y cantidad de los subproductos (Suriapparao, Tanneru, & Reddy, 2022).

Como base teórica para las briquetas se tomará como referencia el principio de valoración de residuos sólidos según el D.L 1278 donde establece que los residuos sólidos generados en las actividades productivas y de consumo constituyen un potencial recurso económico, por lo tanto, se priorizará su valorización, considerando su utilidad en actividades de: reciclaje de sustancias inorgánicas y metales, generación de energía, producción de compost, fertilizantes u otras transformaciones biológicas, recuperación de componentes, tratamiento o recuperación de suelos, entre otras opciones que eviten su disposición final.

Briqueta

Las Briquetas son un biocombustible sólido que se obtienen a partir de la densificación de un material lignocelulósico u otros materiales, bajo la aplicación de temperatura y presión provocan la auto aglomeración de las partículas, teniendo un mayor uso en la generación de calor o producción de energía, como sustituto de la leña y carbón en estufas, chimeneas, hornos calderas y gasificadores. La forma que adquieren puede ser rectangulares, cilíndricas o

hexagonales, una de sus principales características es su alta densidad. (Fonseca y Tierra, 2011).

Las briquetas o bloques sólidos son combustibles para generar calor utilizados en estufas, chimeneas, salamandras, hornos y calderas. Es un producto 100% ecológico y renovable, ya que están hechas de desperdicios forestales tales como el aserrín, viruta, chips, ramas, restos de poda, raleo fino, etc., catalogada como bio-energía sólida, que viene en forma cilíndrica o de ladrillo, sustituyendo a los combustibles sólidos domésticos más comunes con beneficios, como; PCS, menor temperatura de ignición, densidad elevada, ocupa menos espacio, homogéneas, fácil manipulación, sin olores, humos ni chispas y menor porcentajes de cenizas. (Gallipotili, 2015)

Briqueta es un proceso de compactación o densificación para incrementar la baja densidad aparente de la biomasa a una densidad mayor (de 150-200 kg/m³ a 900 - 1300 kg/m³) (FAO, 2014).

La briqueta es otra forma de combustible que se puede producir a partir de los subproductos del café, que se destina más a los mercados de calderas o estufas domésticas. Las briquetas de cascarilla de café se desarrollaron principalmente en países de América del Sur (Brasil, Costa Rica) (Limousy, Jeguirim, & Labaki, 2017)

Briquetas producidas a partir de residuos lignocelulósicos, a través de un proceso simple y de bajo costo son una excelente fuente de energía barata y ambientalmente correcta, en muchos casos, ideal para reemplazar los combustibles fósiles en uso en la actualidad, con importantes ventajas económicas y ambientales (CH. , Raju, Prem, Sunil, & Srikanth, 2021).

Briqueta es una mezcla sólida combustible de sustancias aglomeradas de forma y tamaño adecuado para uso doméstico. (NTC 2060)

La primera definición contiene las principales propiedades a tenerse en cuenta a la hora de evaluar la calidad de las briquetas, pues las características físicas y mecánicas permiten evaluar cualidades como la resistencia y humedad, mientras que las características químicas y térmicas permiten asegurar su uso como biocombustibles.

Propiedades físicas

Las propiedades físicas de las briquetas que se determinaron fueron el contenido de humedad, la densidad aparente, la resistencia a la rotura y el grado de densificación. (Rosato y Rosato, 2003).

Las propiedades físicas, como la densidad y el contenido de humedad, pueden afectar la eficiencia energética de las briquetas. Una mayor densidad conduce a una mayor energía contenida por unidad de volumen, lo que resulta en una mejor eficiencia durante el proceso de pirólisis asistida por microondas.

El grado de densificación simula la tensión de la compresión de la briqueta, siendo ésta otra propiedad física importante a evaluar. Un alto grado de densificación indica una mayor compactación y una reducción en el volumen de las briquetas en comparación con el material original lo que facilita una mejor eficiencia energética durante la combustión.

Propiedades químico-térmicas

En la producción de briquetas lignocelulósicas deben tenerse en cuenta sus propiedades químicas y térmicas como el poder calorífico, el contenido de cenizas, la densidad energética, el contenido de volátiles o el carbono fijo (Lunguleasa et al., 2021)

Las propiedades químico-térmicas afectan a las briquetas en su desempeño como combustible. Un alto poder calorífico indicará que las briquetas proporcionan una mayor cantidad de energía térmica cuando pasen por el proceso termoquímico, de igual forma con la densidad energética mientras las briquetas contengan más energía por unidad de volumen, facilitará su transporte, almacenamiento y manejo.

En el caso del carbono fijo es el responsable de la liberación de calor y los volátiles son los componentes orgánicos de las briquetas que se evaporan durante el proceso de pirolisis asistida por microondas, y por último las cenizas son los residuos inorgánicos que quedan después de la combustión de las briquetas. Un alto contenido de cenizas puede afectar negativamente la eficiencia de la combustión. Generalmente, se prefiere un bajo contenido de cenizas para obtener una combustión más eficiente.

Los procesos físicos y químicos se diferencian fundamentalmente en los siguientes aspectos:

Los cambios químicos van acompañados por una modificación profunda de las propiedades del cuerpo o cuerpos reaccionantes; los cambios físicos dan lugar a una alteración muy pequeña y muchas veces parcial de las propiedades del cuerpo. (Rivera H., Flores D., 2019)

Pirólisis de biomasa.

La pirólisis es conocida como la descomposición térmica de la materia prima (biomasa) en ausencia de oxígeno, luego de este proceso endotérmico se obtiene como resultado un producto sólido (biocarbón), líquido (bioaceite) y gaseoso (syngas) (Bonasa et al., 2018). Por otro lado, 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 otro lado, la calidad y el rendimiento del material pirolizado dependen de parámetros como la velocidad de calentamiento, la temperatura, el tamaño de partícula, el tiempo de residencia del sólido y la distribución del tiempo de residencia (Bonasa et al., 2018).

a. La pirólisis rápida es aquella pirolisis que se da a temperaturas de 400 a 600 y favorece la conversión de la materia prima en bioaceite o biocombustible sólido (Hu, Bassi y Xu, 2020).

b. La pirólisis lenta por su parte es la pirolisis más utilizada, se caracteriza por velocidades de calentamiento bajas entre 0.1 y °C/s, temperaturas menores a 500°C y tiempo de retención de entre 5 a 30 minutos, este proceso pirolítico favorece la conversión a biocarbón de biomasa. (Elkhalifa et al., 2019).

c. La pirólisis instantánea o flash convierte la biomasa sólida en gaseoso (Chhabra et al., 2020).

Pirólisis asistida por microondas

El principio de calentamiento por microondas se fundamenta en la interacción que tiene el campo magnético con los dipolos moleculares y los iones cargados de los materiales, (Clark y Sutton, 1996 citado por Bu et al., 2016), se genera calor a nivel molecular transformando la energía electromagnética de la irradiación de microondas en calor (Hu, Bassi y Xu, 2020).

Para establecer qué tipo de materiales pueden ser usados en el pirólisis por microondas, estas se clasifican en función de su interacción con el campo de microondas (Mishra y Sharma, 2016).

(1) Aislantes, materiales que son transparentes a las microondas;

(2) Conductores, materiales en donde las microondas se reflejan y no pueden penetrar

(3) Absorbentes, donde los materiales absorben microondas, como el agua y la mayoría de los compuestos orgánicos.

Por otro lado, para elevar la temperatura por microondas generalmente se utilizan dos frecuencias (915 y 2450 MHz), asimismo 2450 MHz es comúnmente elegida para la pirolisis asistida por microondas debido a que esta frecuencia favorece a la profundidad de penetración, ideales para las condiciones de reacción.

Esto se puede explicar debido a que en los hornos de microondas a 2450 MHz oscila un campo de microondas de alta frecuencia que tiene un efecto en la energía vibracional de la molécula de agua y otros dipolos para provocar un calentamiento por fricción (Bu et al., 2016).

Características de la pirolisis asistida por microondas

La pirólisis es un proceso termoquímico que tiene varias propiedades y características, entre las cuales se destacan:

Descomposición térmica: La pirólisis implica la descomposición térmica del material orgánico en ausencia de oxígeno o con una cantidad limitada de oxígeno. La descomposición térmica puede producir carbón, líquidos y gases combustibles, y otras sustancias.

Temperatura y velocidad de calentamiento: La temperatura y la velocidad de calentamiento son factores críticos en la pirólisis. La elección de la temperatura y la velocidad de calentamiento depende del tipo de material que se va a procesar y del producto que se desea obtener.

Ausencia de oxígeno: La pirólisis se lleva a cabo en ausencia de oxígeno para evitar la combustión del material orgánico y maximizar la producción de productos valiosos.

Rendimiento de producto: El rendimiento de producto en la pirólisis varía según el tipo de material y la temperatura y velocidad de calentamiento utilizadas. Los productos pueden incluir carbón, líquidos y gases combustibles, entre otros.

Valor energético: Los productos de la pirólisis tienen un alto valor energético y pueden ser utilizados como combustible o materia prima para la producción de productos químicos y materiales.

Reducción de residuos: La pirólisis también puede ser utilizada como método de tratamiento de residuos, ya que puede reducir el volumen y la toxicidad de ciertos tipos de residuos.

Elementos de la pirólisis

La pirólisis es un proceso termoquímico que se produce cuando se calienta un material orgánico en ausencia de oxígeno. Durante la pirólisis, los enlaces químicos que mantienen unidas las moléculas orgánicas se rompen debido a la alta temperatura, lo que conduce a la formación de productos de pirólisis como gases, líquidos y sólidos carbonosos.

Los principales elementos de la pirólisis son:

Material de alimentación: El material de alimentación es el material orgánico que se somete a pirólisis. Puede ser cualquier cosa, desde biomasa hasta plásticos.

Reactor de pirólisis: El reactor de pirólisis es el equipo utilizado para llevar a cabo la pirólisis. Puede ser un horno, un reactor de lecho fluidizado, un reactor de tornillo, entre otros.

Temperatura: La temperatura es un parámetro importante en la pirólisis. La temperatura utilizada durante la pirólisis puede afectar significativamente la composición y calidad de los productos de pirólisis.

Tiempo de residencia: El tiempo de residencia es el tiempo que el material orgánico pasa dentro del reactor de pirólisis. Puede ser breve o prolongado, dependiendo del tipo de reactor utilizado y del objetivo de la pirólisis.

Productos de pirólisis: Los productos de pirólisis son los productos que se generan durante la pirólisis. Pueden ser gases, líquidos o sólidos carbonosos, dependiendo de las condiciones de pirólisis.

Efluentes: Los efluentes son los gases y líquidos que se producen durante la pirólisis y que no forman parte de los productos de pirólisis. Estos efluentes pueden incluir gases como el dióxido de carbono y el monóxido de carbono, así como líquidos como el alquitrán y el agua.

Tipos de Biocombustibles

Biocombustibles de primera generación

Son biocombustibles generados a base de azúcar, almidón y aceite vegetal, donde los microorganismos generan biocombustibles (etanol, el propanol y el butanol) a través de la fermentación de azúcares y almidones. Sin embargo, no es sostenible la producción de este tipo de biocombustibles pues sus impactos incluso pueden superar los impactos generados por los combustibles fósiles al poner en riesgo la seguridad alimentaria (Dahman, et al., 2019).

Biocombustibles de segunda generación

Este tipo de biocombustibles se desarrollaron para mitigar los impactos que generan los biocombustibles de primera generación, pues son generados de la biomasa lignocelulósica, que incluyen restos alimentarios y subproductos agrícolas (Dahman, et al., 2019). La CC se encuentra clasificado dentro de biocombustibles.

Biocombustibles de tercera generación

Los biocombustibles de tercera generación se basan en algas, las cuales tiene el potencial de revolucionar completamente el mercado de la en energía. Debido a su fácil crecimiento en diversos tipos de ambientes (Dahman, et al., 2019).

Características Técnicas de las briquetas

Densidad: Favorece al transporte, a su almacenamiento y a manipular el producto ya que al obtener mayor densidad ocupará un menor volumen en el transportamiento se igualará a su peso.

Humedad: Son cantidades de agua que posee en la muestra total de cada masa, ya que puede llegar a ser inherente o superficial.

Combustión: Es el resultado de la reacción de un material a una determinada temperatura utilizando como elemento principal el oxígeno.

Cenizas: Su contenido depende del tipo de biomasa que son, ya que algunas especies por lo general tienen la pulpa de madera baja a 0.5%, a diferencia de los cereales y los desechos cuentan con un 20% en la industria agropecuaria.

Figura 1.

Tipo de briquetas.

Tipo de briquetas		Tamaño de briquetas	
	Cilíndricas	Unidad	Dimensiones
		Diámetro (cm)	2 y 20 cm
		Longitud (cm)	15 y 50 cm
		Relación longitud/diámetro	Variable entre 15 y 50 cm
		Lugar y precio de venta pts/kg	España, 16 a 20 pts/kg
	Prisma Hexagonal	Unidad	Dimensiones
		Diámetro (cm)	9,0 cm
		Longitud (cm)	15 cm
		Relación longitud/diámetro	Variable entre los 12 a 18 cm
		Lugar y precio de venta pts/kg	China, 20 pts/kg
	Prisma Rectangular	Unidad	Dimensiones
		Diámetro (cm)	5 cm
		Longitud (cm)	3.6 a 11 cm
		Relación longitud/diámetro	Variable entre los 5 a 11 cm
		Lugar y precio de venta pts/kg	España, 20 pts/kg
	Prisma cuadrado "Comido en las esquinas"	Unidad	Dimensiones
		Diámetro (cm)	Entre 12 y 15 cm
		Longitud (cm)	Entre 6 y 9 cm
		Relación longitud/diámetro	Variable entre 6 y 15 cm
		Lugar y precio de venta pts/kg	España, 18,61 pts/kg
	Prisma ortogonal	Unidad	Dimensiones
		Diámetro (cm)	6,2 cm
		Longitud (cm)	1,5 cm
		Relación longitud/diámetro	Variable entre 1,5/6,2 cm
		Lugar y precio de venta pts/kg	EEUU y Europa, 33,33 pts/kg
	Prisma rectangular "comido en las esquinas"	Unidad	Dimensiones
		Diámetro (cm)	13 cm
		Longitud (cm)	10 cm
		Relación longitud/diámetro	Variable entre 6 y 15 cm
		Lugar y precio de venta pts/kg	España, 18,61 pts/kg
	¼ de cilindro	Unidad	Dimensiones
		Diámetro (cm)	10 cm
		Longitud (cm)	20 cm
		Relación longitud/diámetro	Variable entre 10 y 20 cm
		Lugar y precio de venta pts/kg	Salamanca, 1,563 pts/kg

Nota: Tomada de "Elaboración de las Briquetas de carbón a partir de las hojas del árbol de teca" por Salcedo. 2021, p.32-33.

Marco normativo

- **DECRETO LEGISLATIVO N.º 1278**

El presente Decreto Legislativo establece derechos, obligaciones, atribuciones y responsabilidades de la sociedad en su conjunto, con la finalidad de propender hacia la maximización constante de la eficiencia en el uso de los materiales y asegurar una gestión y manejo de los residuos sólidos económica, sanitaria y ambientalmente adecuada, con sujeción a las obligaciones, principios y lineamientos de este Decreto Legislativo.

- **LEY N.º 28054**

Ley de Promoción del Mercado de Biocombustibles: La presente Ley establece el marco general para promover el desarrollo del mercado de los biocombustibles sobre la base de la libre competencia y el libre acceso a la actividad económica, con el objeto de diversificar el mercado de combustibles, fomentar el desarrollo agropecuario y agroindustrial, generar empleo, disminuir la contaminación ambiental y ofrecer un mercado alternativo en la Lucha contra las Drogas.

Incentivar la aplicación de tecnologías, el desarrollo de proyectos experimentales y la transferencia de tecnología adquirida, que permitan la obtención de biocombustibles mediante la utilización de todos los productos agrícolas o agroindustriales o los residuos de éstos.

- **NORMA TÉCNICA NTC COLOMBIANA 2060**

Esta norma tiene por objeto establecer las características fisicoquímicas que tiene que tener un producto densificado como la briqueta para su uso doméstico.

- **Norma EN 14961-1**

Esta norma europea establece las especificaciones para la calidad de los biocombustibles sólidos, incluyendo las briquetas. La norma establece requisitos de calidad para la producción de briquetas, como

el contenido de humedad, la densidad aparente, el poder calorífico y el contenido de cenizas.

- **Norma ASTM D6866**

Esta norma establece los métodos para determinar la cantidad de biocombustibles renovables en un producto combustible utilizando la técnica de carbono-14. Esta norma se utiliza para verificar la cantidad de materia orgánica renovable en las briquetas.

2.3. Marco conceptual

Biocarbón

El biocarbón es un subproducto pirolítico rico en carbono, que es destinado para su uso en la agricultura y posee propiedades como alta área de superficie, microporosidad y capacidad de intercambio iónico, lo que lo diferencia del carbón utilizado como combustible y del carbón activado. Además, es un bioproducto comercializable con potencial aplicación en la industria y el sector energético, ofreciendo oportunidades de ingresos adicionales y contribuyendo a la mejora de los suelos.

Briqueta

Las briquetas son un tipo de biocombustible sólido obtenido mediante la compactación de materiales lignocelulósicos u otros residuos, aplicando temperatura y presión para que las partículas se auto aglomeren. Estas briquetas se utilizan principalmente para generar calor y energía, reemplazando a la leña y al carbón en diversos dispositivos como estufas, chimeneas, hornos, calderas y gasificadores. Pueden tener diferentes formas, como rectangulares, cilíndricas o hexagonales, pero su característica más notable es su alta densidad. La materia prima para su fabricación suele ser astillas y residuos de madera, aunque también pueden emplearse otros tipos de biomasa residual. Este proceso de compactación incrementa la densidad aparente de la biomasa, transformándola en un combustible más eficiente. Así, las briquetas son una fuente de energía económica y ecológica, con ventajas tanto económicas como ambientales al sustituir a los combustibles fósiles en muchas aplicaciones.

2.4. Definición de términos básicos

Bioenergía: La bioenergía se define como una energía renovable producida a partir de fuentes naturales con la capacidad de sustituir la energía procedente de fuentes fósiles (Lago et al., 2019).

Biomasa: Son materias primas lignocelulósicas utilizadas para la producción de biocombustibles (Bonasa et al., 2018).

El tipo de biomasa afecta en gran medida el proceso de pirólisis. La composición de la biomasa varía según el origen de la planta, la naturaleza del suelo, el entorno de crecimiento y los métodos de cultivo (Suriapparao y Tejasvi, 2022, pp 440).

Briqueta

Las Briquetas son productos sólidos densificados, que se utilizan como biocombustible sólido, cuyas materias primas pueden ser residuos u otros tipos de biomasa (Alarcón, 2017).

Carbono fijo

El carbono fijo es calculado según la suma de los porcentajes de los ensayos de humedad, cenizas y materia volátil se les sustrae a 100. Todos los porcentajes deben estar en la referencia de humedad. (A.S.T.M. D3172).

Cascarilla de café

El pergamino de café, conocido como cascarilla de café, es la capa que cubre el grano directamente después de la capa mucilaginosa. (Manals-Cutiño, Salas-Tort y Penedo-Medina, 2018).

Contenido de volátiles

La materia volátil de un combustible es el vapor condensable y no condensable que se libera cuando se calienta el combustible. Su cantidad depende de la velocidad de calentamiento y la temperatura a la que se calienta. (Prabir Basu, 2010).

Contenido de ceniza

La ceniza representa el remanente inorgánico sólido resultante de la completa combustión del combustible, compuesto principalmente por sílice, aluminio, hierro y calcio; también pueden estar presentes pequeñas cantidades de magnesio, titanio, sodio y potasio. (Prabir Basu, 2010).

Contenido de humedad

El contenido de humedad representa la cantidad de agua en la biomasa, expresada como porcentaje en peso del material. (Pérez et al., 2022).

Densidad aparente

Denota la proporción entre la materia seca y el volumen aparente e influye en el volumen necesario con fines de transporte y de almacenamiento. La densidad aparente es muy variable. (FAO, 2004).

Poder calorífico

El poder calorífico es la máxima cantidad de calor que se puede obtener de un kilogramo de combustible en forma completa. Al realizarse la combustión del combustible se elimina vapor de agua que dependiendo de la temperatura puede mantenerse como tal o puede condensarse. (Martínez, 2016)

Potencia de microondas

Es un parámetro importante para la MAP. Básicamente, cambia las temperaturas de pirólisis para la pirólisis asistida por microondas de una materia prima de biomasa. Cuando aumenta la potencia de microondas, aumenta la densidad de microondas de la cavidad y aumenta la absorción de energía de microondas de la materia prima de biomasa, lo que hace que la interacción entre el campo de microondas y la materia prima de biomasa se vuelva más intensa (Hu, Ma y Chen, 2012 citado en Yaning Zhang, et al., 2017).

Susceptor

Se refiere a aquellos materiales que exhiben una alta pérdida de tangente dieléctrica ($\tan \delta$) (Suriapparao, Kumar y Rajasekhar, 2022, pp. 4).

Tamaño de la partícula de la materia prima

El tamaño de partícula de la materia prima es uno de los parámetros importantes, que gobierna los mecanismos de transporte de calor y masa (Suriapparao y Tejasvi, 2022, pp 441).

III. HIPÓTESIS Y VARIABLES

3.1 Hipótesis

3.1.1 Hipótesis General

El biocarbón de cascarilla de café generado por pirolisis asistida por microondas permite obtener briquetas a nivel de laboratorio, 2023.

3.1.2 Hipótesis específicas

H₁: Las propiedades físicas y químico - térmicas del biocarbón de cascarilla de café presentan mejoras en comparación con la biomasa original.

H₂: Las condiciones de operación del proceso de pirolisis asistida por microondas influyen en la mejora del rendimiento del biocarbón de cascarilla de café a nivel laboratorio, 2023.

H₃: A mayor porcentaje de biocarbón en la mezcla se mejora las propiedades físicas y químico - térmicas de las briquetas a nivel laboratorio, 2023.

3.1.3 Operacionalización de variables

Tabla 1.

Operacionalización de la variable

Variable	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones	Indicador	Unidad	Técnicas, instrumentos
Biocarbón	El biocarbón es el producto procedente de la descomposición de la biomasa a través de procesos termoquímicos con poca o nula presencia de oxígeno(O), algunos de ellos conocidos como pirólisis. (Escalante et al.,2016)	El biocarbón puede presentar diferentes propiedades físicas y químicas en función de las características de la biomasa utilizada y las condiciones de operación empleadas en su producción.	Biomasa	Carbono	%	Técnicas termogravimétricas: C, H, N: según ASTM D5373/ Mét. A S: ASTM D4239 O: ASTM D7582 Instrumento: Mufla, balanza analítica
				Hidrógeno		
			Nitrógeno	Humedad	Materias volátiles	Cenizas
Oxígeno						
Briquetas	Las briquetas son biocombustibles sólidos que se obtienen a partir de la densificación de un material lignocelulósico u otros materiales; bajo la aplicación de temperatura y presión provocan la auto aglomeración de las partículas, teniendo un mayor uso en la generación de calor o producción de energía, como sustituto de la leña y carbón en estufas, chimeneas, hornos, calderas y gasificadores. La forma que adquieren puede ser rectangulares, cilíndricas o hexagonales. Una de sus principales características es su alta densidad. (Fonseca y Tierra, 2011)	Las briquetas pueden ser caracterizadas en base a sus propiedades físicas (contenido de humedad y densidad aparente) y químico-térmicas (poder calorífico, contenido de ceniza, contenido de volátiles y carbono fijo), las mismas que serán medidas a través de técnicas termogravimétricas y calculadas según fórmulas.	Propiedades Físicas	Temperatura de reacción	°C	Técnica: Sensibilidad de temperatura de la diferencia de potencial Instrumento: Termocupla
				Susceptor o absorbente		Técnica: Observacional Instrumento: Balanza analítica
			Contenido de humedad	%	Técnica: ASTM D7582 Instrumento: Estufa, balanza analítica	
Briquetas	Las briquetas son biocombustibles sólidos que se obtienen a partir de la densificación de un material lignocelulósico u otros materiales; bajo la aplicación de temperatura y presión provocan la auto aglomeración de las partículas, teniendo un mayor uso en la generación de calor o producción de energía, como sustituto de la leña y carbón en estufas, chimeneas, hornos, calderas y gasificadores. La forma que adquieren puede ser rectangulares, cilíndricas o hexagonales. Una de sus principales características es su alta densidad. (Fonseca y Tierra, 2011)	Las briquetas pueden ser caracterizadas en base a sus propiedades físicas (contenido de humedad y densidad aparente) y químico-térmicas (poder calorífico, contenido de ceniza, contenido de volátiles y carbono fijo), las mismas que serán medidas a través de técnicas termogravimétricas y calculadas según fórmulas.	Propiedades Físicas	Densidad aparente	g/cm ³	Técnica: Método gravimétrico Instrumento: balanza analítica
				Poder calorífico	MJ/kg	Técnica: ASTM D5865-13 Instrumento: Estufa, balanza analítica
			Propiedades Químico-Térmicas	Contenido de ceniza	%	Técnica: ASTM D7582. Instrumento: Estufa, balanza analítica
				Contenido de volátiles	%	Técnica: ASTM D7582 Instrumento: Estufa, balanza analítica
Carbono fijo		Técnica: Documental Ficha de recolección de datos				

IV. METODOLOGÍA

4.1 Diseño metodológico

Según Esteban, (2020), una investigación aplicada es aquella que basada en conocimientos de la investigación básica busca solucionar un problema en algún proceso, nuestra investigación se enfocó en valorizar un residuo (cascarilla de café) a través de su conversión en biocarbón y posteriormente en productos densificados como briquetas para uso comercial.

Por otro lado, según su enfoque la investigación es cuantitativa, debido al uso de la estadística para procesar indicadores numéricos en esta investigación (Hernández, Fernández y Baptista, 2014), además, el estudio se basa en un diseño experimental, ya que se modifican las variables independientes para observar su impacto en la variable dependiente (Hernández, Fernández y Baptista, 2014), en la siguiente tabla 2 y figura 2 se muestran los experimentos a realizarse para obtener el mejor rendimiento de biocarbón y la briquetas de biocarbón con las mejores propiedades fisicoquímicas.

Tabla 2.

Diseño de superficie de respuesta

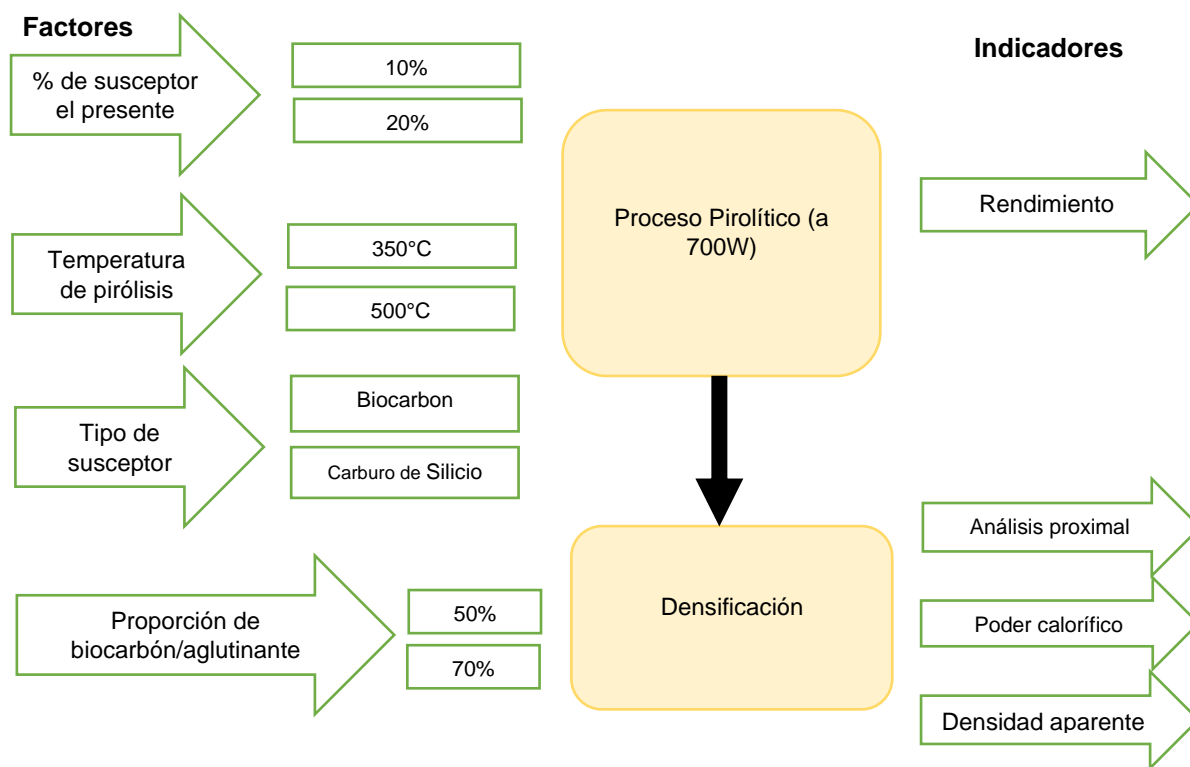
Orden Est.	Orden Corrida	Tipo Pt	Bloques	Temperatura	% de susceptor	Tipo de susceptor
3	1	1	1	350	20	Biocarbón
6	2	-1	1	462,5	15	Biocarbón
1	3	1	1	350	10	Biocarbón
9	4	0	1	425	15	Biocarbón
2	5	1	1	500	10	Biocarbón
17	6	1	1	500	20	SiC
7	7	-1	1	425	12.5	Biocarbón
4	8	1	1	500	20	Biocarbón
11	9	0	1	425	15	Biocarbón
14	10	1	1	350	10	SiC
19	11	-1	1	462,5	15	SiC
18	12	-1	1	387,5	15	SiC
26	13	0	1	425	15	SiC
16	14	1	1	350	20	SiC
15	15	1	1	500	10	SiC
23	16	0	1	425	15	SiC
8	17	-1	1	425	17.5	Biocarbón

25	18	0	1	425	15	SiC
24	19	0	1	425	15	SiC
10	20	0	1	425	15	Biocarbón
20	21	-1	1	425	12.5	SiC
13	22	0	1	425	15	Biocarbón
22	23	0	1	425	15	SiC
12	24	0	1	425	15	Biocarbón
21	25	-1	1	425	17.5	SiC
5	26	-1	1	387,5	15	Biocarbón

El diseño de superficie de respuesta tiene como objetivo establecer las condiciones de temperatura, % de susceptor en la muestra y tipo de susceptor que mejoren el rendimiento del biocarbón.

Figura 2.

Modelo analítico.



En la figura anterior se puede observar dos experimentos, el primer experimento tuvo como objetivo obtener el mejor rendimiento del biocarbón obtenido a partir de la pirólisis asistida por microondas, donde los factores fueron los siguientes; las temperaturas de pirólisis (350°C - 500°C), alcanzadas a un nivel de potencia de microondas de 700 W, el porcentaje de susceptor de

microondas en la mezcla de biocarbón (del 10 al 20%) y el tipo de susceptor de microondas (biocarbón y carburo de silicio).

El segundo experimento tuvo como finalidad elaborar briquetas mediante el proceso de densificación, a base de biocarbón de cascarilla de café que se obtuvo en el proceso anterior, para lo cual se evaluaron diferentes proporciones (50% y 70%) de biocarbón y aglutinante en la mezcla, con 03 réplicas cada proporción. Luego de la densificación se midió en cada briketa sus propiedades físicas y químico-térmicas, como porcentaje de contenido de humedad, contenido de ceniza, carbono fijo, contenido de materia volátil, poder calorífico y densidad aparente.

Por otro lado, en el presente estudio se utilizó la metodología de diseño de respuesta para obtener el rendimiento del biocarbón óptimo. Se tomaron en consideración 3 factores; siendo dos de ellos continuos (temperatura y % de susceptor) y el otro; un factor categórico (tipo de susceptor) y para evaluar la significancia estadística se estimó el valor de alfa igual a 0.5.

Tabla 3.

Diseño Central Compuesto

Factores		Valores		Valor de alfa*	Tipos de puntos		Corridas totales
Continuos	T°	Bajo: 350 Alto: 500		α= 0.5	Cubos	8	26
	% de susceptor	Bajo: 10% Alto:20%			Centrales en el cubo	10	
Categóricos	Tipo de susceptor	Niveles: 2	Biocarbón SiC		Axiales	8	

Nota: Obtenida de software Minitab versión 21.

**Distancia del punto central a los puntos axiales.*

De los valores de la tabla 4 se obtuvo el número total de 26 corridas experimentales, realizados en la presente investigación (Ver tabla 4).

Tabla 4.*Corridas experimentales de diseño de superficie de respuesta*

Orden Est.	Orden Corrida	Tipo Pt	Bloques	T°	% de susceptible	Tipo de susceptible
3	1	1	1	350	20	Biocarbón
6	2	-1	1	462,5	15	Biocarbón
1	3	1	1	350	10	Biocarbón
9	4	0	1	425	15	Biocarbón
2	5	1	1	500	10	Biocarbón
17	6	1	1	500	20	SiC
7	7	-1	1	425	12.5	Biocarbón
4	8	1	1	500	20	Biocarbón
11	9	0	1	425	15	Biocarbón
14	10	1	1	350	10	SiC
19	11	-1	1	462,5	15	SiC
18	12	-1	1	387,5	15	SiC
26	13	0	1	425	15	SiC
16	14	1	1	350	20	SiC
15	15	1	1	500	10	SiC
23	16	0	1	425	15	SiC
8	17	-1	1	425	17.5	Biocarbón
25	18	0	1	425	15	SiC
24	19	0	1	425	15	SiC
10	20	0	1	425	15	Biocarbón
20	21	-1	1	425	12.5	SiC
13	22	0	1	425	15	Biocarbón
22	23	0	1	425	15	SiC
12	24	0	1	425	15	Biocarbón
21	25	-1	1	425	17.5	SiC
5	26	-1	1	387,5	15	Biocarbón

Nota: Obtenida de software Minitab versión 21.

4.2 Método de investigación

El método de investigación es inductivo, ya que a través de premisas particulares se generarán conclusiones generales (Cortés, 2004).

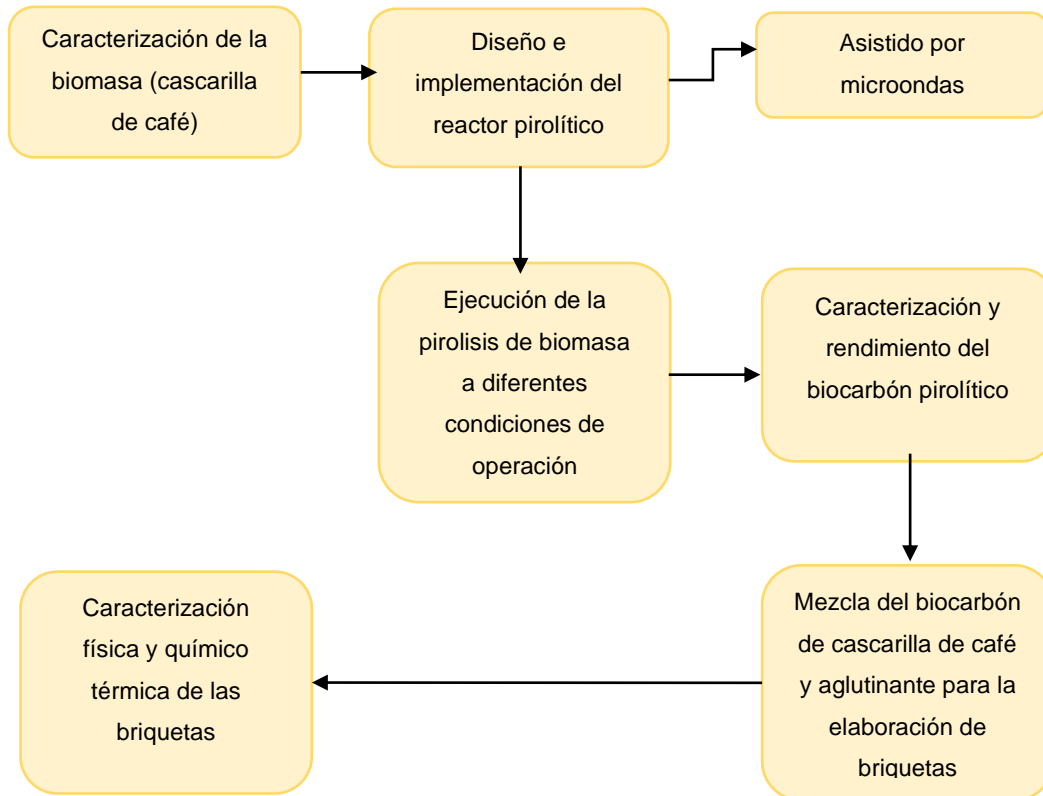
En la investigación cuantitativa, el método inductivo puede utilizar datos numéricos y observaciones empíricas para responder hipótesis y generar teorías. Además, comprende realizar una secuencia lógica de pasos para llegar a conclusiones generales a partir de datos específicos.

Procedimiento

En la Figura 3, se presenta el procedimiento que se realizó en la investigación a través de 6 fases.

Figura 3.

Procedimiento de investigación.



Primera fase: Caracterización fisicoquímica de la biomasa de la cascarilla de café

Para determinar las características fisicoquímicas de la biomasa de cascarilla del café se realizó el análisis proximal y análisis elemental de la cascarilla de café (CC) y energético. Las características de estos análisis se describen a continuación:

- El análisis elemental determina de forma cuantitativa la composición elemental (carbono, hidrógeno, nitrógeno, oxígeno y azufre) en

muestras orgánicas e inorgánicas, sólidas, líquidas y viscosas, homogéneas o de fácil homogeneización.

- El análisis proximal se utiliza en materiales que se usarán como fuente de proteína o de energía, como un control para verificar que cumplan con las especificaciones o requerimientos establecidos durante la formulación. Estos análisis indicarán el contenido de humedad, proteína cruda (nitrógeno total), ceniza y extracto libre de nitrógeno en la muestra (FAO, 2023).
- El análisis Térmico estudia el cambio de una propiedad física de una sustancia en relación con la temperatura. Cuando un material se calienta o se enfría, su estructura cristalina y su composición química pueden sufrir cambios importantes como la fusión, sublimación o transiciones cristalinas. También pueden tener lugar reacciones de oxidación o descomposición, y cambios texturales como la sinterización o la recristalización (SCAI, 2023).

En la presente investigación, el análisis proximal se determinó el contenido de humedad, de ceniza, de carbono fijo, y de materia volátil; así mismo para el análisis elemental se evaluó el contenido de oxígeno, nitrógeno, carbono, hidrogeno y azufre, finalmente para el análisis térmico, se determinó el poder calorífico superior. Estos análisis se realizaron por encargo a laboratorios acreditados y a través de técnicas e instrumentos utilizados en cada parámetro de caracterización, los cuales se describen a continuación:

Tabla 5.*Técnicas e instrumentos de los parámetros analizados de la cascarilla de café*

Parámetro	Instrumento	Técnica
Análisis proximal		
Humedad		ASTM D7582
Materia volátil	Analizador	ASTM D7582
Ceniza	termogravimétrico	ASTM D7582
Carbono fijo		ASTM D7582
Análisis elemental		
Carbono		ASTM D5373/Met A
Hidrogeno	Célula de conductividad térmica	ASTM D5373/Met A
Nitrógeno		ASTM D5373/Met A
Azufre		ASTM D4239
Oxígeno		ASTM D7582
Análisis térmico		
Poder calorífico superior	Calorímetro de bomba de oxígeno adiabático	ASTM D5865

Por otro lado, para complementar la información de caracterización también se incluyó el índice de combustibilidad y las relaciones atómicas H/C y O/C, tal y como se describe en las siguientes ecuaciones.

El índice de combustibilidad (IC) se determina por el cociente entre el porcentaje en masa de materia volátil (MV) y el porcentaje en masa de carbono fijo (CF).

$$IC = \frac{MV}{CF} \quad (1)$$

Mientras que la relación H/C, se calcula:

$$\frac{H}{C} = \frac{(\%H/M_H)}{(\%C/M_C)} \quad (2)$$

Asimismo, la relación O/C, se calcula.

$$\frac{O}{C} = \frac{(\%O/M_O)}{(\%C/M_C)} \quad (3)$$

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.

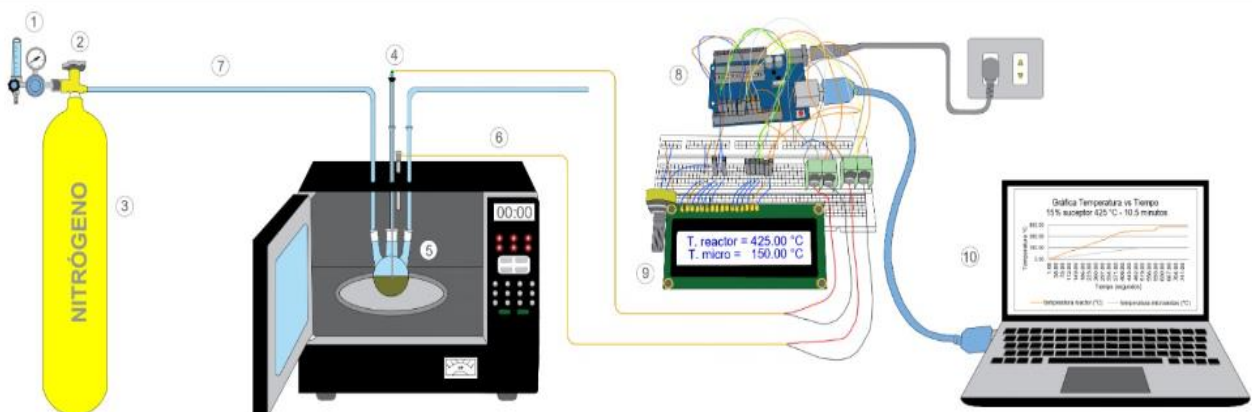
Segunda fase: Diseño e implementación del reactor pirolítico

El reactor pirolítico refiere a un equipo utilizado en el proceso de pirolisis, que es una técnica de descomposición térmica de materiales orgánicos en ausencia de oxígeno. La pirolisis se puede utilizar para convertir materiales como biomasa, plásticos u otros residuos en productos útiles como biochar, biogás, aceites, entre otros. Para este estudio, el reactor será diseñado con la tarea de convertir la biomasa del café en biochar o también conocido como biocarbón.

Para ello, se diseñó un reactor pirolítico asistido por microondas, tal como se muestra en la Figura 4, basado en el diseño de Salema et al., (2017). Cabe precisar, que en el diseño de estos autores es aconsejable situar el termopar en proximidad con la muestra de biomasa para lograr una medición precisa de la temperatura.

Figura 4.

Diseño del reactor pirolítico.



El diseño tuvo los siguientes componentes:

1. Manómetro
2. Válvula
3. Balón de nitrógeno
4. 2 termopares
5. Matraz de vidrio borosilicato
6. Horno microondas
7. Manguera flexible
8. Arduino
9. Display
10. Laptop

Tercera fase: Ejecución de la pirolisis

Antes de ingresar la biomasa al reactor, la cascarilla de café se pasó por un tamiz menor a 1.2 mm (Setter *et al.*, 2021), luego se condicionó el reactor a temperaturas entre el rango de 350°C a 500°C, para ello se trabajó con un nivel de potencia establecido de 700 W, así mismo se varió el porcentaje de susceptor en la biomasa (entre el 10 al 20%) y el tipo de susceptor (Biocarbón y carburo de silicio); el tiempo de retención establecido es de 7 a 12 minutos o hasta llegar a la temperatura requerida, luego se mantuvo la temperatura por un tiempo de hasta 5 minutos regulando la potencia de microondas alrededor de 100W, la frecuencia de trabajo de la microondas será de 2450MHz (potencia establecida por el fabricante (2450MHz para hornos microondas domésticos)

Equipos

- Reactor Pirolítico asistido por microondas

Susceptor

- SiC
- Biocarbón

Materiales

- Licuadora doméstica
- Tamiz

Cuarta fase: Caracterización y rendimiento del biocarbón

En esta etapa se calculó a través de la siguiente ecuación, el rendimiento del biocarbón, luego se analizó los mismos parámetros del análisis proximal de la primera fase.

$$\text{Rendimiento del Biocarbón} = \frac{\text{Masa del Biocarbon} - \text{Masa del absorbente}}{\text{Masa de la Biomasa}} \quad (4)$$

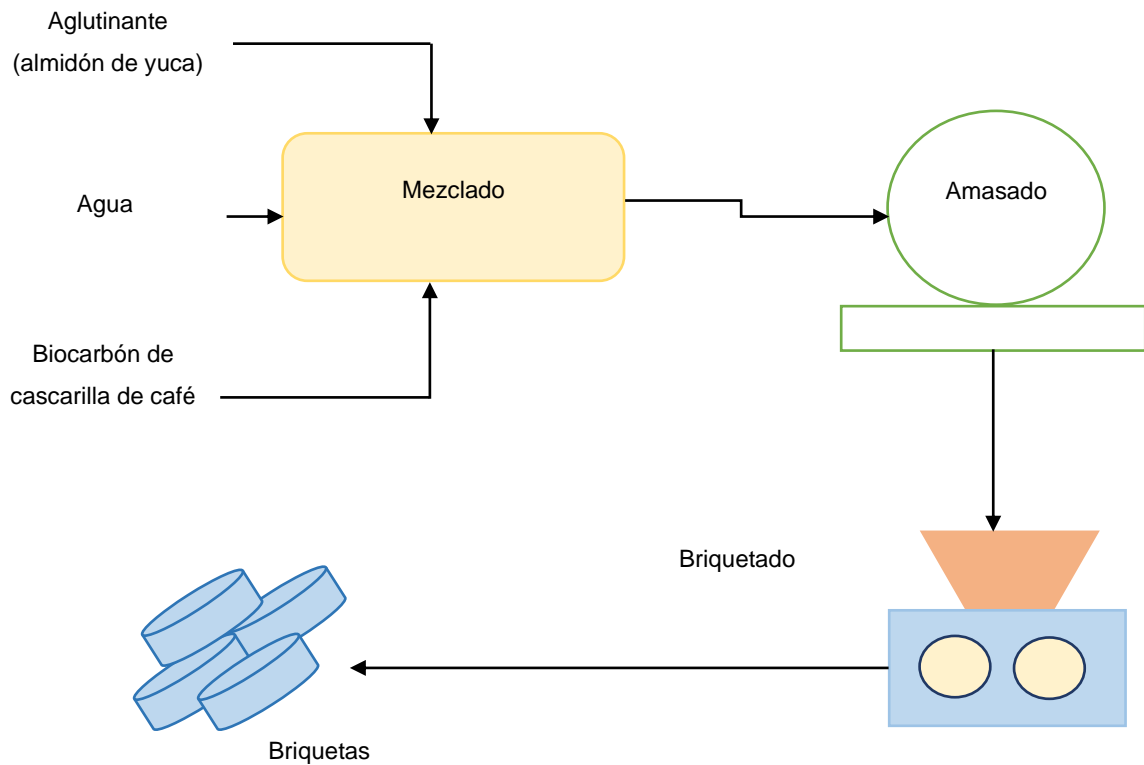
Dónde: masa del absorbentes es aquel material dieléctrico que ayudó a mejorar el proceso pirolítico en el reactor, en este caso un catalizador, el cual es una sustancia que acelera o retarda una reacción química sin participar en él.

Quinta fase: Mezcla del biocarbón de cascarilla de café y aglutinante para la elaboración de briquetas

La mezcla de diferentes proporciones de biocarbón proveniente de la cascarilla de café y aglutinante (almidón de yuca) da como resultado la obtención de briquetas. Este proceso implica también el mezclado, prensado, amasado y briquetado, con un posterior secado, tal y como se muestra en la Figura 5.

Figura 5.

Procedimiento de elaboración de briquetas.



En base a la figura anterior, se describe los siguientes pasos:

- a) Se realizó una mezcla entre el aglutinante, el biocarbón obtenido de la cáscara de café y agua (entre 70 y 100°C) en las siguientes proporciones, como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 6.

Proporciones de BC de CC, aglutinante y agua

Proporción	Biocarbón de CC (g)	Aglutinante (g)	Total (g)	Agua (ml), entre 70 y 100°C
50/50	75	75	150	115
70/30	105	45	150	125

Cabe resaltar que el agua a las temperaturas indicadas, aseguran una mejor dilución del aglutinante evitando la formación de cúmulos.

- b) Seguidamente pasó al amasado por unos minutos para obtener una mezcla homogénea.
- c) Posterior al amasado, se procedió a llevar a cabo el proceso de briquetado utilizando una presión de compresión constante de 44.96 PSI, con el objetivo de dar forma cilíndrica a la mezcla y crear briquetas. En este proceso, se tomó como guía la NTC 2060, que establece dimensiones mínimas iguales o superiores a 3 cm en su extensión más pequeña.
- d) Por último, se llevó a cabo la evaluación física y químico térmicas de las briquetas en un laboratorio certificado, donde se contrastaron los resultados con los parámetros definidos en la norma NTC 2060 para las briquetas categorizadas como tipo 2. Esto permitió determinar la composición ideal de la mezcla.

Asimismo, a continuación, se describe los equipos, materiales y otros elementos utilizados durante el proceso de briquetado.

Equipos

- Briquetadora: prensa que permite compactar la mezcla de biomasa a una forma o dimensiones requeridas, este equipo permite elevar la fuerza de presión sobre la mezcla, aportándole densidad y firmeza
- Estufa de secado
- Balanza analítica OHAUS Pioneer de 310 g de capacidad x 0,001 de lectura mínima.
- Cronómetro
- Flexómetro

Materiales

- Moldes metálicos de acero: compartimientos elaborados de metal, que permiten aportar dimensiones específicas a la mezcla, así como el escurrimiento del agua en la formación de briquetas.
- Ollas de cocina de 2,5 litros de capacidad
- Ollas de cocina de 2 litros de capacidad

- Taper
- Termocupla
- Prensa hidráulica con manómetro incorporado
- Bandejas metálicas para laboratorio
- Probeta de 100ml
- Cuchara espátula de laboratorio

Insumos

- Almidón de yuca
- Biocarbón
- Agua de grifo de 70°C a 100°C

Sexta fase: Propiedades físicas y químico-térmicas de las briquetas

Se sometió a las briquetas a un análisis en un laboratorio acreditado, evaluando los factores del análisis proximal, tales como humedad, material volátil, contenido de ceniza y carbono fijo. Estas medidas se llevaron a cabo siguiendo los procedimientos descritos en la Tabla 9, que se encuentran en la sección 4.5 (técnicas e instrumentos para la recopilación de datos).

Con respecto a la densidad aparente, se consideró las dimensiones de los moldes, calculando la altura, volumen y el peso de la briqueta después de la densificación, tal y como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 7.

Cálculos para la DA

Muestra	Proporción 50/50 (BC/Agl)			proporción 70/30 (BC/Agl)		
	R1	R2	R3	R1	R2	R3
Peso (g)	190.8	190.8	190.8	198	198	198
Diámetro (cm)	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5
Altura (cm)	4.48	4.51	4.6	4.75	4.72	4.69
Área (cm²)	33.18	33.18	33.18	33.18	33.18	33.18
Volumen (cm³)	148.66	149.66	152.64	157.62	156.62	155.63
Densidad Aparente (g/cm³)	1.28	1.27	1.25	1.26	1.26	1.27

a) Densidad aparente (DA): La densidad aparente de la briqueta se expresa como la relación entre la masa de la briqueta y el volumen de la briqueta:

$$DA = \frac{m}{v} \% \quad (5)$$

Dónde:

DA = densidad aparente de la briqueta, en %

m= masa de muestra de briquetas, en g

v = volumen de muestra de briquetas, en cc

b) Poder Calorífico (PC): El poder calorífico de la briqueta se medió usando un calorímetro de bomba de oxígeno adiabático Parr (1241) de la siguiente manera.

$$PC = \frac{\Delta T^f * 2420 - (wire\ brun * 2.3 + tritratión + sulfuro^g)}{w_s} \quad (6)$$

Dónde:

PC = poder calorífico, en cal

ΔT^f = cambio final de temperatura, °C

w_s = peso de la muestra de briquetas, en g.

4.3 Población y muestra

4.3.1. Población

La población está constituida por un conjunto de sujetos, objetos o hechos, que presentan características similares, que son medibles y que constituyen la unidad de investigación (Ñaupas et al., 2014).

Por lo tanto, en la presente investigación se consideró que la población esté conformada por 18 briquetas, obtenidas a partir del biocarbón de cascarilla de café, esta biomasa es generada en la empresa Aromas de Monzón, ubicada en

la Provincia de Humalíes, Huánuco. Además, se tuvo en consideración que dichas briquetas deben ser de forma regular, compactas y no quebradizas.

4.3.2. Muestra

Para el presente estudio, se utilizó el muestreo no probabilístico por conveniencia.

El muestreo no probabilístico interviene el criterio del investigador para seleccionar a las unidades muestrales, de acuerdo con ciertas características que requiera la naturaleza de la investigación que se quiera desarrollar (Ñaupas et al., 2014).

Es por ello, que se trabajó con una muestra compuesta por 6 briquetas elaboradas a base de biocarbón. La determinación del tamaño de la muestra se realizó considerando la cantidad de réplicas necesarias para identificar diferencias significativas entre los grupos evaluados. Se estableció un mínimo de 3 réplicas para cada uno de los grupos de briquetas, los cuales fueron definidos en base a diferentes proporciones de biocarbón y aglutinante, respectivamente: 50/50 y 70/30.

4.4 Lugar del estudio.

El lugar donde se realizó la parte experimental fue en el laboratorio de investigación de la Facultad de Ingeniería Ambiental y Recursos Naturales de la Universidad Nacional del Callao y en las instalaciones de la Dirección de Producción de Bienes y Servicios de la Universidad Nacional del Callao.

Los análisis fisicoquímicos fueron realizados en laboratorios externos acreditados de la Universidad Agraria de la Molina.

Por otro lado, la cascarilla de café proviene de los procesos realizados por la MIPE Aromas de Monzón SAC, ubicada en la ciudad del Monzón, Valle del Monzón, Huánuco.

Figura 6.

Ubicación del lugar donde se obtuvo la biomasa



Nota: tomado Google Earth

4.5 Técnicas e instrumentos para la recolección de la información.

4.5.1. Técnica

La técnica usada en esta investigación es la observación, las mismas que fueron aplicadas por laboratorios acreditados y miden los siguientes parámetros:

Tabla 8.

Técnicas para analizar los datos

Parámetro	Técnica
Humedad	ASTM D7582
Materia volátil	ASTM D7582
Ceniza	ASTM D7582
Carbono fijo	ASTM D7582
Oxígeno	ASTM D7582
Carbono	ASTM D5373/Met A
Hidrogeno	ASTM D5373/Met A
Nitrógeno	ASTM D5373/Met A
Azufre	ASTM D4239
Poder calorífico superior	ASTM D5865
Densidad aparente	Método gravimétrico
Tamaño de partícula de la materia	Tamizado
Potencia de microondas	Observacional
Absorbentes de microondas	Observacional
Temperatura de reacción	Sensibilidad de T° de la diferencia de potencial
Biomasa	Método termogravimétrico

Asimismo, se utilizó la técnica de diseño de superficie de respuesta para obtener datos sobre el mejor rendimiento de biocarbón y las briquetas de biocarbón con las mejores propiedades fisicoquímicas.

4.5.2. Instrumentos de medición

En la siguiente tabla se muestran los instrumentos utilizados para analizar los parámetros mencionados en la sección anterior:

Tabla 9.

Instrumentos de medición

Indicador	Materiales	Técnica o método analítico	Instrumento
(Contenido de humedad, contenido de volátiles, contenido de ceniza, carbono fijo)	Estufa, balanza analítica	ASTM D7582	Analizador termogravimétrico
Carbono, hidrogeno, Nitrógeno	Célula de conductividad térmica	ASTM D5373/Met A	Célula de conductividad térmica
Poder calorífico superior	-	Calculo	$PC = 354.3 (CF) + 170(MV)$

Por otro lado, en la siguiente tabla se muestran las fichas de recolección de datos que se utilizaron en el presente estudio.

Tabla 10.

Fichas de recolección de datos

Ficha de recolección de datos	Descripción
Ficha de recolección de datos para caracterización de biomasa y biocarbón de cascarilla de café	Este instrumento registra los datos de laboratorio obtenidos después de la caracterización fisicoquímica de la biomasa y biocarbón de cascarilla de café (Ficha 1 y 3; Anexo 3)
Ficha de recolección del rendimiento del biocarbón	Este instrumento compila los datos de rendimiento a las diferentes condiciones de operación del proceso pirolítico asistido por microondas (Ficha 2; Anexo 3)

Ficha de recolección de datos	Descripción
Ficha de recolección de datos de las características de las briquetas a base de biocarbón	Esta ficha de recolección de datos tiene como objetivo registrar los valores de los parámetros físicas y químicos-térmicas de las briquetas elaboradas a base de biocarbón de cascarilla de café (Ficha 4, Anexo 3)

4.6 Análisis y procesamiento de datos

Para la presente investigación se utilizó la estadística descriptiva e inferencial. En la parte descriptiva los datos se representaron a través de diagramas de frecuencias y medidas de tendencia central. En la parte inferencial para obtener el rendimiento óptimo se utilizó un análisis de superficie de respuesta donde se establecieron factores como la temperatura, porcentaje de susceptor en la biomasa y tipo de susceptor; todo ello con ayuda del software estadístico Minitab versión 21. Por otro lado, para establecer diferencias significativas de contenido de MV, ceniza y CF entre los dos tipos de briquetas a diferentes proporciones de BC en la mezcla se utilizó la prueba estadística paramétrica, T de Student para muestras independientes, debido a que los datos cumplieron con los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas, mientras que para parámetros como % de humedad, DA y PCS se utilizó una prueba no paramétrica, la U Mann de Whitney.

4.7 Aspectos éticos de la investigación

El presente estudio fue redactado con base y cumplimiento a la Directiva 004-2022-R “Directiva para la elaboración de proyecto o informe final de investigación de pregrado, posgrado, equipos, centros e institutos de investigación de la Universidad Nacional del Callao”. VIII. Disposiciones específicas donde se establece aspectos generales a tener en consideración durante la redacción y estructura del presente estudio.

Además, en la redacción se aseguró que la información presentada sea clara, precisa y respetuosa de los derechos y la privacidad de los autores señalados. Asimismo, los autores adoptan todas las medidas establecidas en las normas de

ética de la UNAC. Adicionalmente, la investigación contó con el consentimiento de la empresa Aromas de Monzón S.A.C. para el acceso y uso de residuos de cascarilla de café que generan.

V. RESULTADOS

5.1 Resultados descriptivos

5.1.1 Resultados del primer objetivo específico

En el siguiente cuadro se presentan los resultados de la caracterización de la materia prima cascarilla de café y del biocarbón obtenido por pirolisis asistida por microondas producido a partir de dicha biomasa.

Tabla 11.

Análisis proximal, energética y elemental de la CC y biocarbón de CC

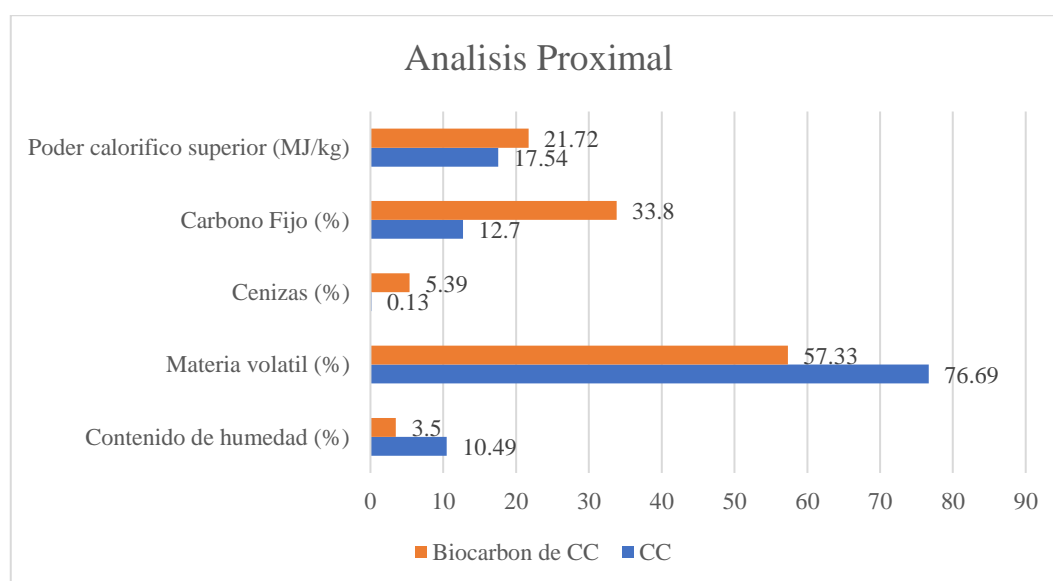
Tipo de análisis	Parámetro	CC	Biocarbón de CC
Análisis Proximal	Contenido de humedad (%)	10.49	3.5
	Materia volátil (%)	76.69	57.33
	Cenizas (%)	0.13	5.39
	Carbono Fijo (%)	12.7	33.8
Análisis Energético	Poder calorífico superior (MJ/kg)*	17.54	21.72
	IC (índice de combustibilidad)*	6.04	1.7
Análisis elemental	C (%)	45.22	47.31
	H (%)	6.62	3.06
	N (%)	0.2	0.36
	O (%)	47.64	-
	S (%)	0.11	0.06
	H/C*	1.74	0.77
	O/C*	0.79	-

Nota: Datos recolectados de los informes de laboratorio

*Datos calculados por fórmula

El **contenido de humedad** afecta de manera negativa al poder calorífico de una materia prima, debido al gasto de energía requerido para evaporar el agua, es recomendable tener materias primas con un % de humedad menor a 8% (Rojas, Flores y López, 2019). Por otro lado, contenidos de **ceniza** superiores al 5%, no son recomendables como combustibles, debido a que afectan el poder calorífico (Demirbas, 2010; citado por Rojas, Flores y López, 2019). En cuanto a la **materia volátil** está relacionado con la temperatura de ignición de la biomasa, pues un alto contenido de MV, reduce la su temperatura de ignición, lo que quiere promueve un fácil encendido, mantener el frente de llama y alta reactividad (Rojas, Flores y López, 2019). El contenido de **carbón fijo** (parte solida combustible de la biomasa), indica que la biomasa tiene un mejor poder calorífico. El **poder calorífico** por su parte representa la energía contenida en el residuo y depende directamente del contenido de MV Y CF (Rojas, Flores y López, 2019).

Figura 7.
Análisis proximal de la CC y biocarbón de CC



Nota. Datos obtenidos del informe de laboratorio de Energías Renovables de la UNALM

Según lo descrito anteriormente y analizando los resultados de la Tabla 11 y Figura 7, se puede establecer que el biocarbón tiene menor contenido de humedad que su biomasa predecesora, lo que explicaría el mayor poder calorífico del biocarbón de CC, sin embargo el contenido de ceniza aumenta

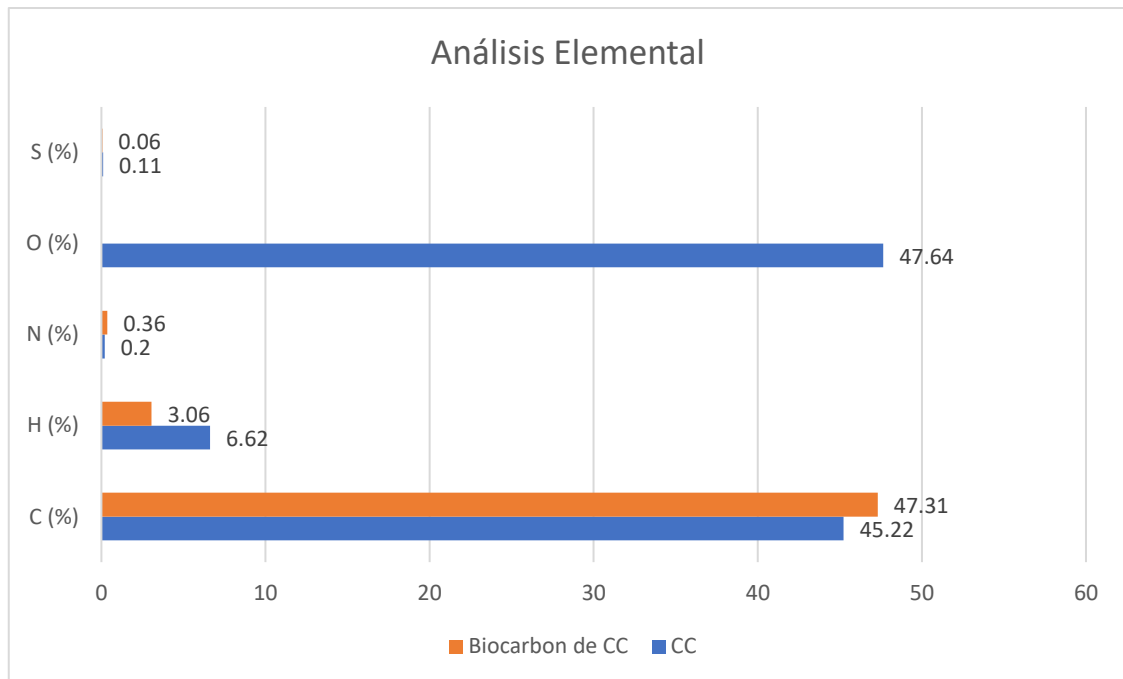
significativamente y sobre el %5 recomendado líneas arriba, lo que implicaría una repercusión en su contenido energético (PC); por otro lado el % de MV del biocarbón disminuyó en comparación de la CC, aumentando de esta forma el punto de ignición de encendido, en cuanto al CF, el biocarbón triplica el contenido de CF en la biomasa inicial, lo que explicaría por que aún con un menor % de MV, el biocarbón tiene un mayor contenido energético de la CC.

El **índice de combustibilidad**, un número adimensional, que determina la capacidad que tiene el material para mantener o no el proceso de combustión en determinadas condiciones (Rojas y Flores 2019). En términos generales, al comparar tipos de materias primas, a mayor IC mayor será la combustión. En la tabla anterior se puede observar que el índice de combustibilidad de la cascarilla de café es muy superior al del biocarbón por lo que se asume que la CC tendrá una mayor combustión que el biocarbón de CC.

En cuanto al análisis elemental se considera que el contenido de **carbono** está directamente relacionado con el poder calorífico de la biomasa, de la misma forma el contenido de **hidrogeno** se relaciona con el contenido de MV, sin embargo, el contenido de **oxígeno** no contribuye al poder calórico. En cuanto al contenido de **nitrógeno** y **azufre**, se conoce que contribuyen a la producción de emisiones de tipo NOx y SOx, por lo que su concentración en la materia prima debe de ser evaluada. Por otro lado, los porcentajes de C, H y O son utilizados para determinar las relaciones atómicas (**H/C** y **O/C**), donde una mayor relación O/C perjudica el contenido energético de la materia prima. Asimismo, si la relación H/C es mayor a O/C, la biomasa es óptima para usarla como combustible. En la siguiente figura se establece los resultados del análisis elemental de la CC y del biocarbón procedente de esta materia prima.

Figura 8.

Análisis elemental de la CC y biocarbón de CC



Fuente: Datos obtenidos del informe de laboratorio de Energías Renovables de la UNALM

En la figura 8 se puede observar que el contenido de carbono en la muestra de biocarbón es mayor que la CC, lo que explicaría su mayor poder calorífico, de la misma forma se demuestra que a menor contenido de hidrogeno menor contenido de compuestos volátiles en la muestra. Tanto para el contenido total de azufre y nitrógeno estos se encuentran en proporciones menores al 2%, lo que implica una emisión mínima de compuestos nocivos (NO_x y SO_x). En cuanto a la relación atómica H/C y O/C, de la tabla anterior, se puede establecer qué relación H/C es mayor que O/C, lo que garantiza su uso como combustible; esta interpretación no se pudo realizar al biocarbón de CC, pues no se obtuvo la relación O/C.

5.1.2 Resultados del segundo objetivo específico

Este objetivo tuvo como propósito evaluar las mejores condiciones de temperatura, % de susceptor en la biomasa y tipo de susceptor en la biomasa que maximizan en el rendimiento del biocarbón.

Para ello fue indispensable llegar a la temperatura establecida en los diseños experimentales de superficie de respuesta, los cuales se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 12.

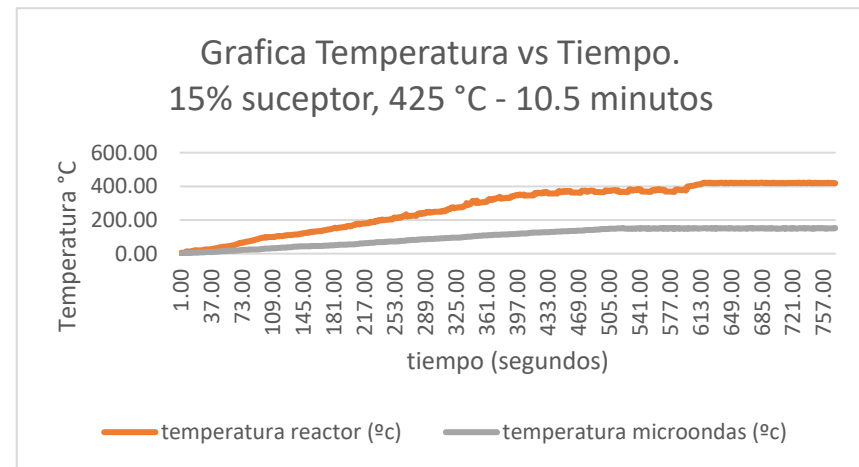
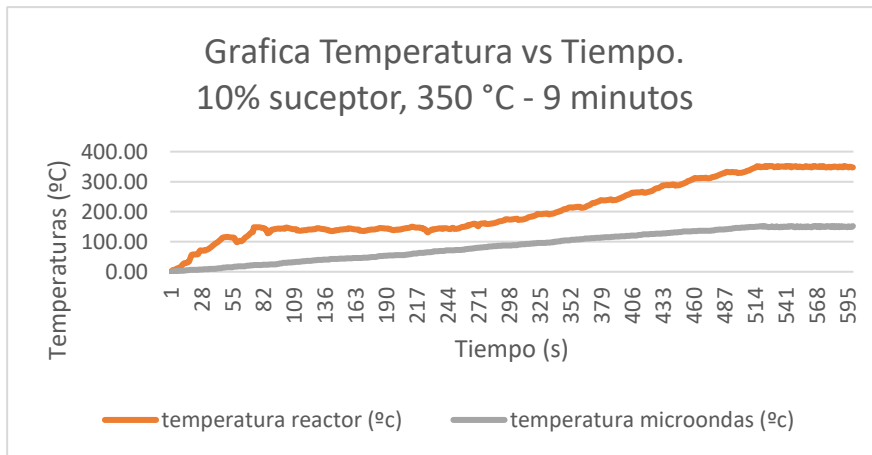
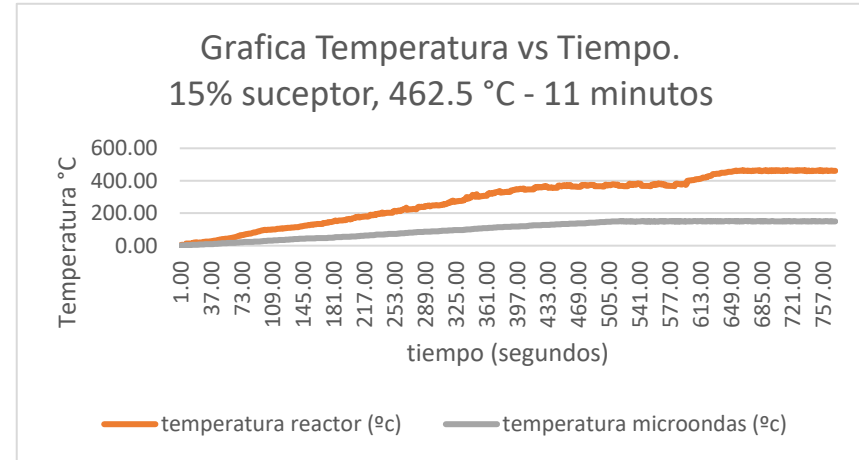
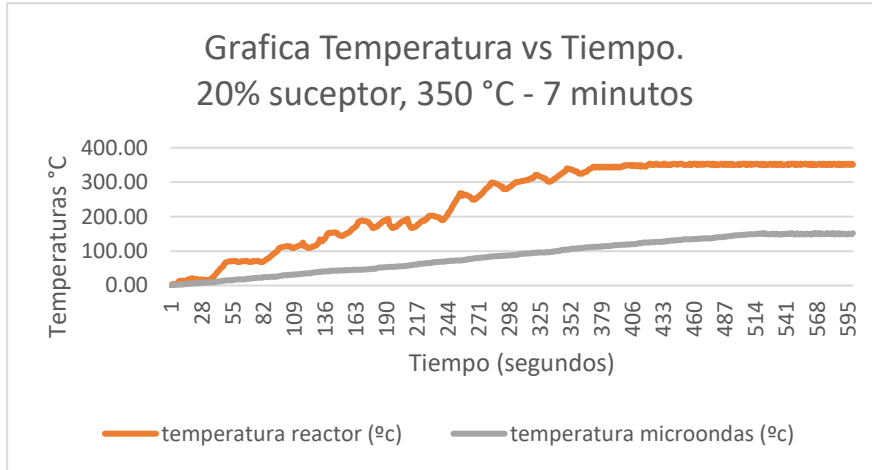
Descripción de las temperaturas en cada experimento

Orden Corrida	Temperatura objetivo	% de susceptor	Tipo de susceptor	Tiempo para alcanzar la T objetivo (min)
1	350	20	Biocarbón	7 min
2	462,5	15	Biocarbón	11 min
3	350	10	Biocarbón	9 min
4	425	15	Biocarbón	10.5 min
5	500	10	Biocarbón	12 min
6	500	20	SiC	7 min
7	425	12.5	Biocarbón	11.5 min
8	500	20	Biocarbón	8 min
9	425	15	Biocarbón	10.3 min
10	350	10	SiC	7.5 min
11	462,5	15	SiC	10 min
12	387,5	15	SiC	8 min
13	425	15	SiC	9.3 min
14	350	20	SiC	6 min
15	500	10	SiC	11 min
16	425	15	SiC	9.2 min
17	425	17.5	Biocarbón	9.5 min
18	425	15	SiC	9.3 min
19	425	15	SiC	9.2 min
20	425	15	Biocarbón	10.3 min
21	425	12.5	SiC	10.5 min
22	425	15	Biocarbón	10.5 min
23	425	15	SiC	9.3 min
24	425	15	Biocarbón	10.4 min
25	425	17.5	SiC	8.5 min
26	387,5	15	Biocarbón	9 min

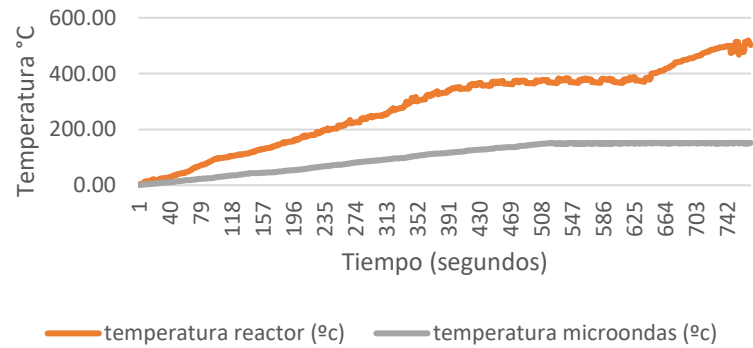
Tener en cuenta que luego de alcanzado la temperatura objetivo, esta se mantuvo regulando la potencia a un 10% o 20% de la máxima potencia aplicada del microondas (700 W) durante aproximadamente 5 minutos o hasta que los COV redujeran su emisión, así mismo tener en cuenta que el registro de temperatura comienza en 0°C debido a la purga inicial del reactor con nitrógeno,

a continuación en la siguiente figura se presenta gráficamente el comportamiento de la temperatura del reactor y de la cavidad del microondas en cada experimento.

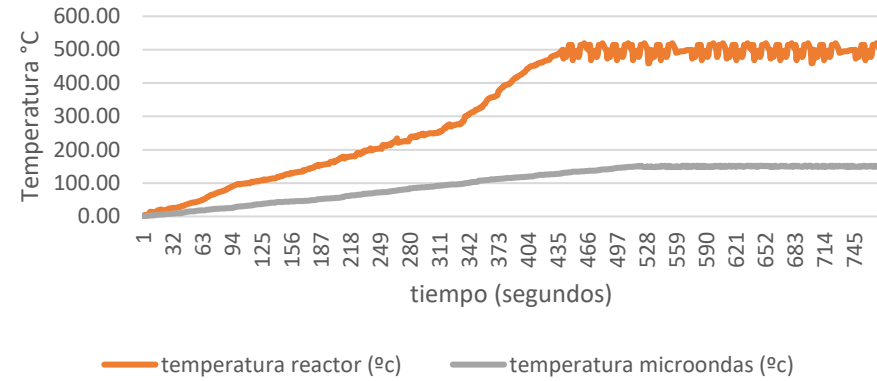
Figura 9.
Graficas de temperaturas vs tiempo



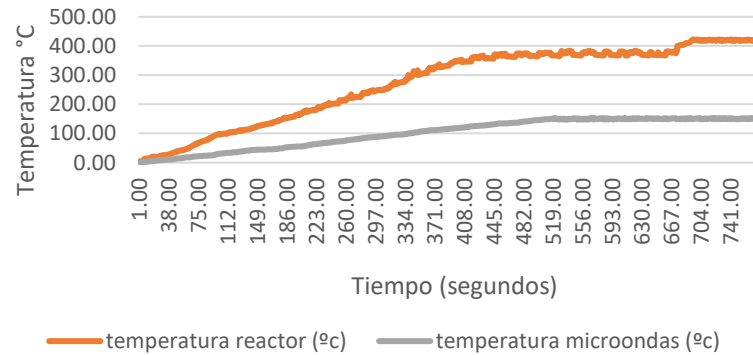
Grafica Temperatura vs Tiempo.
10% suceptor, 500 °C - 12 minutos



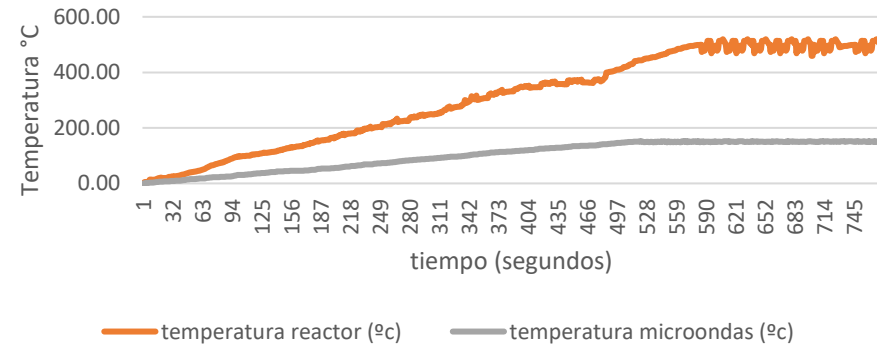
Grafica Temperatura vs Tiempo.
20% suceptor Sic, 500 °C - 7 minutos



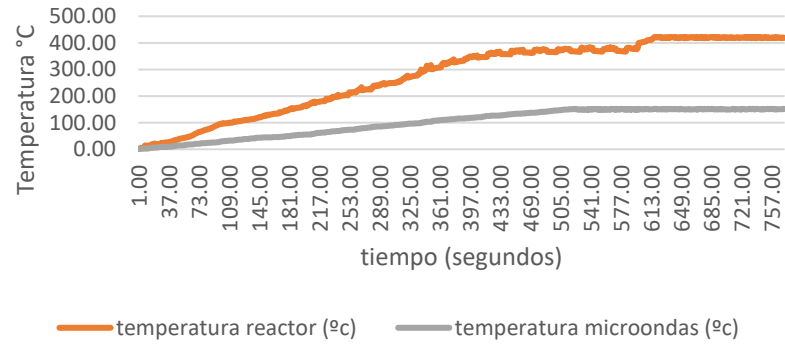
Grafica Temperatura vs Tiempo.
12.5% suceptor, 425 °C - 11.5 minutos



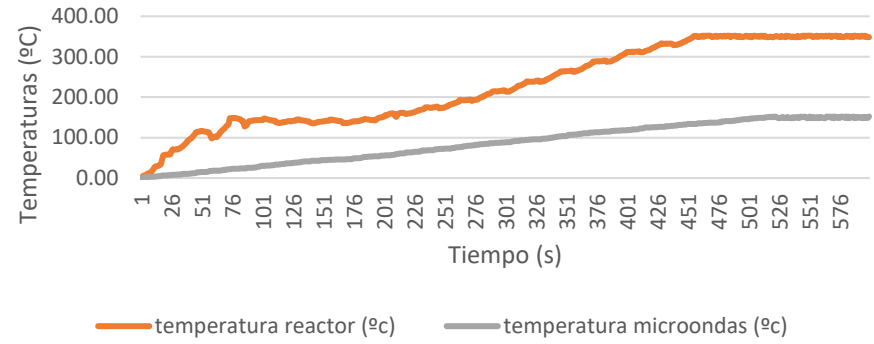
Grafica Temperatura vs Tiempo.
20% suceptor, 500 °C - 8 minutos



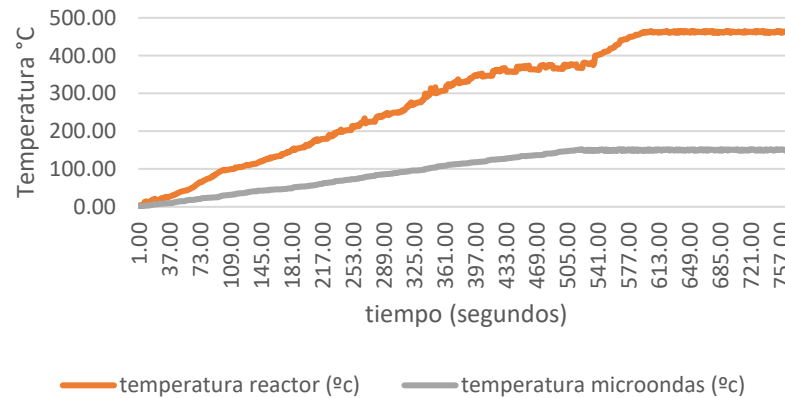
Grafica Temperatura vs Tiempo.
15% suceptor, 425 °C - 10.3 minutos



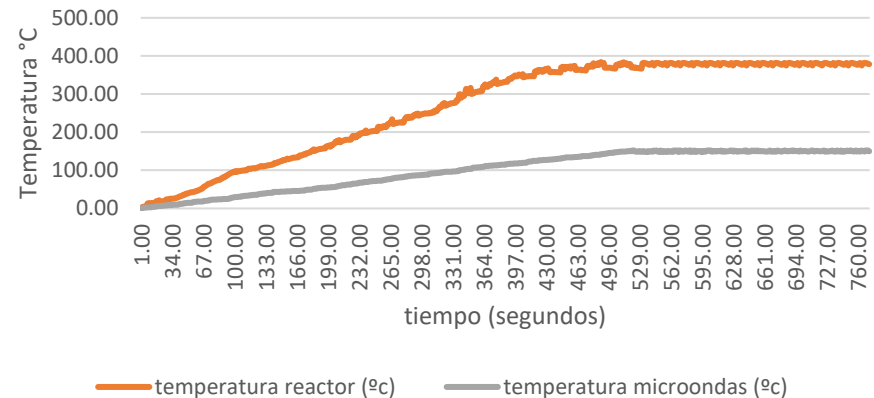
Grafica Temperatura vs Tiempo.
10% suceptor sic, 350 °C - 7.5 minutos



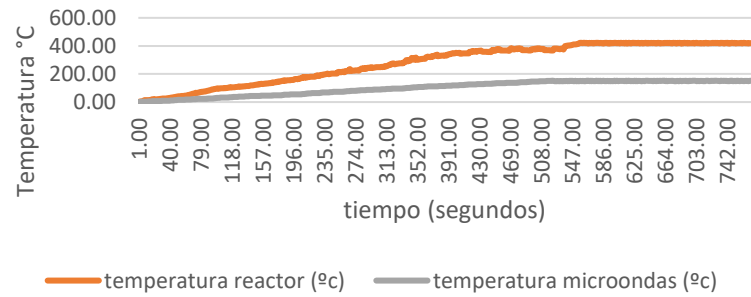
Grafica Temperatura vs Tiempo.
15% suceptor SiC, 460 °C - 10 minutos



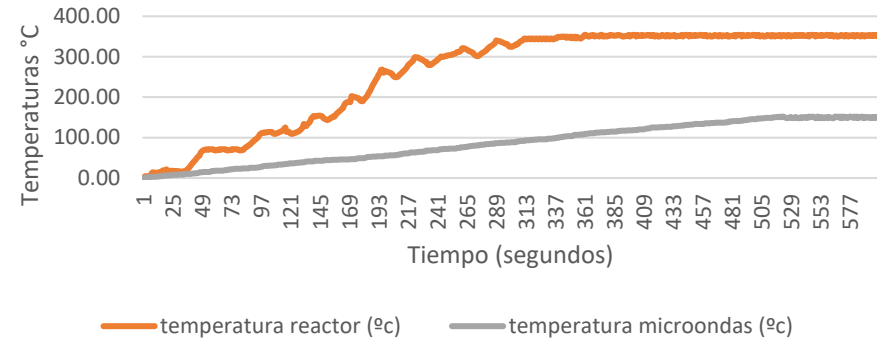
Grafica Temperatura vs Tiempo.
15% suceptor Sic, 387 °C - 8 minutos



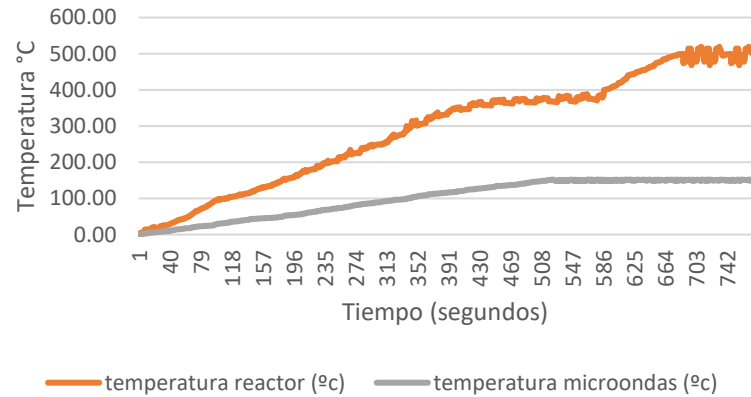
Grafica Temperatura vs Tiempo.
15% suceptor SiC, 425 °C - 9.3 minutos



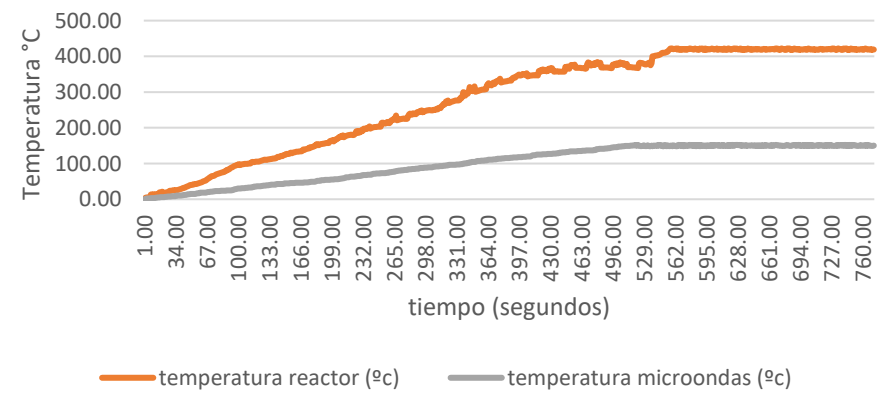
Grafica Temperatura vs Tiempo.
20% suceptor SiC, 350 °C - 6 minutos



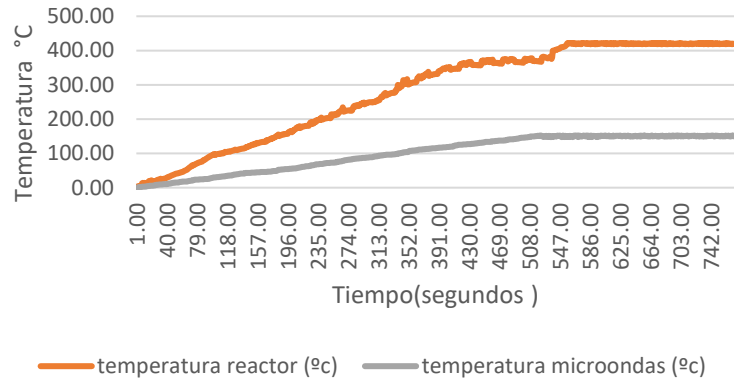
Grafica Temperatura vs Tiempo.
10% suceptor SiC, 500 °C - 11 minutos



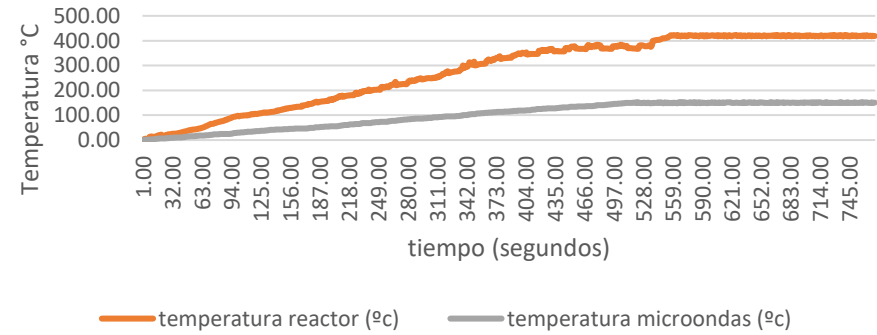
Grafica Temperatura vs Tiempo.
15% suceptor SiC, 425 °C - 9.2 minutos



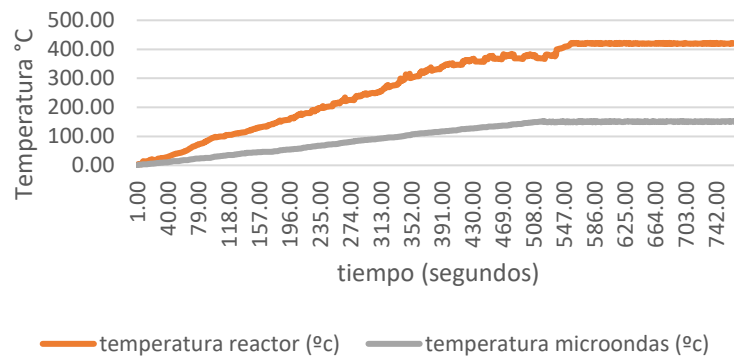
Grafica Temperatura vs Tiempo.
17.5% suceptor, 425 °C - 9.5 minutos



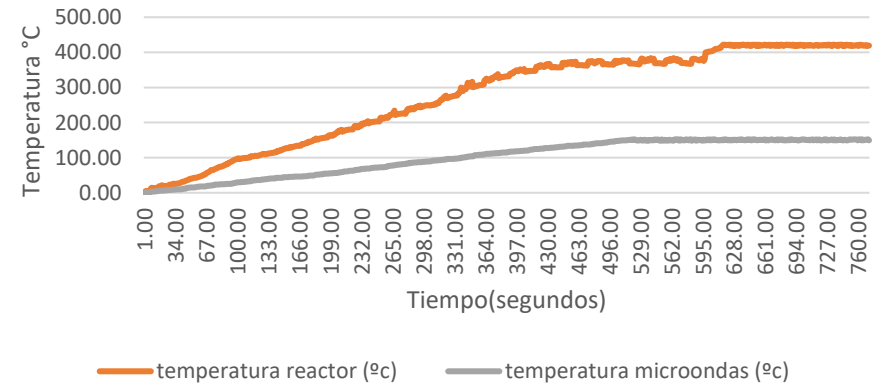
Grafica Temperatura vs Tiempo.
15% suceptor SiC, 425 °C - 9.3 minutos



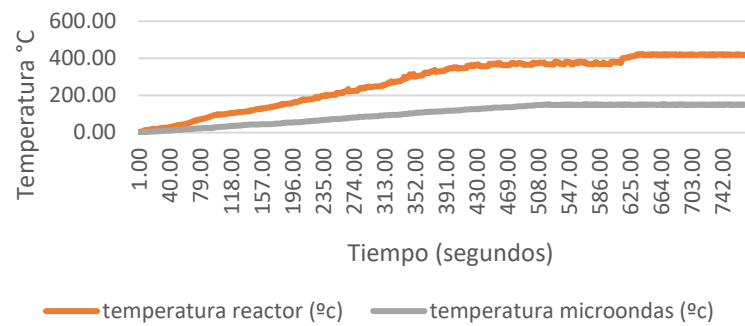
Grafica Temperatura vs Tiempo.
15% suceptor SiC, 425 °C - 9.2 minutos



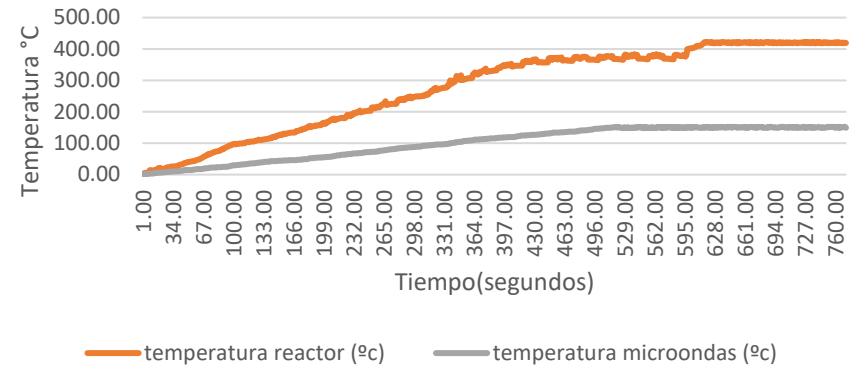
Grafica Temperatura vs Tiempo.
15% suceptor, 425 °C - 10.3 minutos



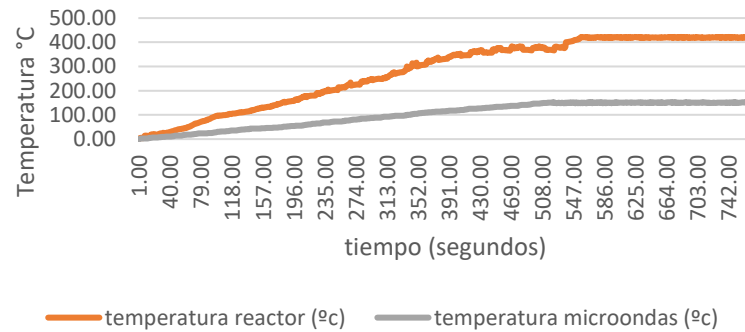
Grafica Temperatura vs Tiempo.
12.5% suceptor SiC, 425 °C - 10.5 minutos



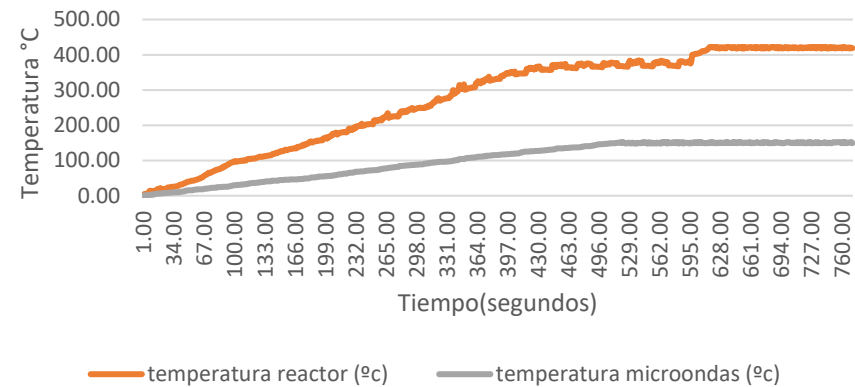
Grafica Temperatura vs Tiempo.
15% suceptor, 425 °C - 10.5 minutos



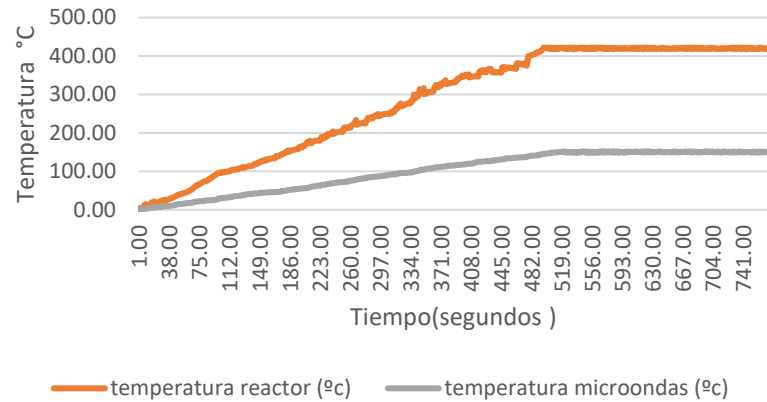
Grafica Temperatura vs Tiempo.
15% suceptor SiC, 425 °C - 9.3 minutos



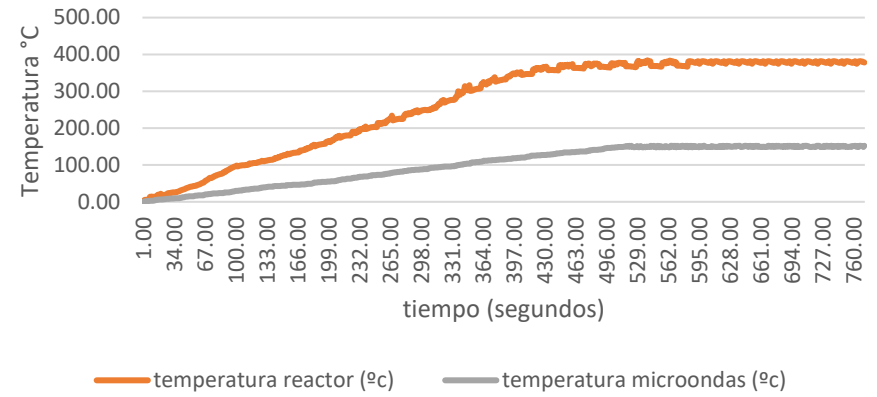
Grafica Temperatura vs Tiempo.
15% suceptor, 425 °C - 10.4 minutos



Grafica Temperatura vs Tiempo.
17.5% suceptor SiC, 425 °C - 8.5 minutos



Grafica Temperatura vs Tiempo.
15% suceptor, 387 °C - 9 minutos



5.2.1. Resultados inferenciales del segundo objetivo

En esta sección se presentan los resultados inferenciales que nos permitirán obtener las condiciones óptimas de los procesos pirolítico asistida por microondas para maximizar el rendimiento del biocarbón.

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos a través de la ecuación de rendimiento:

$$\text{Rendimiento del Biocarbón} = \frac{\text{Masa del Biocarbon} - \text{Masa del absorbente}}{\text{Masa de la Biomasa}} = \quad (7)$$

Tabla 13.

Resultado de rendimiento del biocarbón

Orden Est.	Orden Corrida	Tipo Pt	Bloques	T°	% de susceptible	Tipo de susceptor	Rendimiento
3	1	1	1	350	20	Biocarbón	41,26
6	2	-1	1	462,5	15	Biocarbón	59,32
1	3	1	1	350	10	Biocarbón	27,52
9	4	0	1	425	15	Biocarbón	42,12
2	5	1	1	500	10	Biocarbón	61,23
17	6	1	1	500	20	SiC	70,21
7	7	-1	1	425	12.5	Biocarbón	39,81
4	8	1	1	500	20	Biocarbón	67,2
11	9	0	1	425	15	Biocarbón	41,13
14	10	1	1	350	10	SiC	29,13
19	11	-1	1	462,5	15	SiC	60,1
18	12	-1	1	387,5	15	SiC	55,3
26	13	0	1	425	15	SiC	46,53
16	14	1	1	350	20	SiC	45,5
15	15	1	1	500	10	SiC	65,2
23	16	0	1	425	15	SiC	44,13
8	17	-1	1	425	17.5	Biocarbón	42,9
25	18	0	1	425	15	SiC	46,21
24	19	0	1	425	15	SiC	45,38
10	20	0	1	425	15	Biocarbón	41,7
20	21	-1	1	425	12.5	SiC	41,13
13	22	0	1	425	15	Biocarbón	40,23
22	23	0	1	425	15	SiC	44,15
12	24	0	1	425	15	Biocarbón	41,12
21	25	-1	1	425	17.5	SiC	47,12
5	26	-1	1	387,5	15	Biocarbón	50,18

Nota: Obtenida del software Minitab versión 21

A partir de estos resultados se establece un análisis de regresión donde se consideran todos los posibles términos del modelo cuadrático completo.

Tabla 14.

Análisis de regresión

Término	Coef	EE del coef.	Valor T	p valor	FIV
Constante	28.198	0.670	42.09	0.000	
Temperatura	4.517	0.894	5.05	0.000	1.00
% de susceptor	-1.749	0.894	-1.96	0.067	1.00
tipo de susceptor	0.428	0.526	0.81	0.427	1.00
Temperatura*Temperatura	-8.49	3.84	-2.21	0.041	10.53
% de susceptor*% de susceptor	-0.05	3.84	-0.01	0.990	10.53
Temperatura*% de susceptor	1.998	0.948	2.11	0.050	1.00
Temperatura*tipo de susceptor	-1.726	0.894	-1.93	0.070	1.00
% de susceptor*tipo de susceptor	1.772	0.894	1.98	0.064	1.00

De la tabla anterior se puede observar que existen términos que no son significativos en el modelo (>0.05), en el siguiente cuadro se presenta un análisis de regresión considerando solo aquellos términos que son significativos (≤ 0.05):

Tabla 15.

Análisis de regresión corregido

Término	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante	28.197	0.643	43.86	0.000	
Temperatura	4.517	0.862	5.24	0.000	1.00
% de susceptor	-1.749	0.862	-2.03	0.057	1.00
Temperatura*Temperatura	-8.54	1.14	-7.48	0.000	1.00
Temperatura*% de susceptor	1.998	0.914	2.18	0.042	1.00
Temperatura*tipo de susceptor	-1.726	0.862	-2.00	0.060	1.00
% de susceptor*tipo de susceptor	1.772	0.862	2.06	0.054	1.00

En la tabla anterior se pueden observar que todos los términos de la ecuación se encuentran cerca de 0.05; lo que quiere decir que son términos significativos del modelo.

Así mismo en el diagrama de Pareto, en la Figura 10, se puede representar la significancia de cada término. Por otro lado, para establecer el comportamiento del rendimiento en función de la temperatura, % de susceptor y tipo de susceptor se presentan las gráficas de contorno y graficas de superficie según el tipo de susceptor (biocarbón o SiC) utilizado en la biomasa.

Figura 10.

Diagrama de Pareto

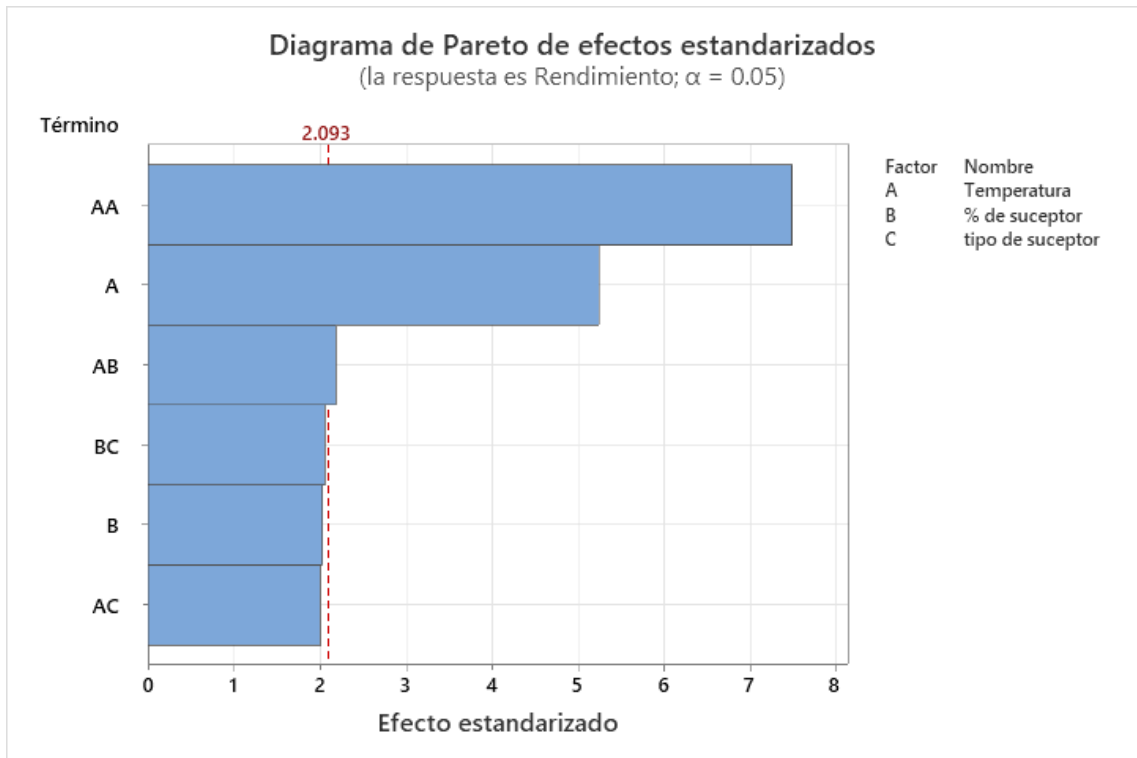


Figura 11.

Gráficas de contorno de rendimiento con biocarbón

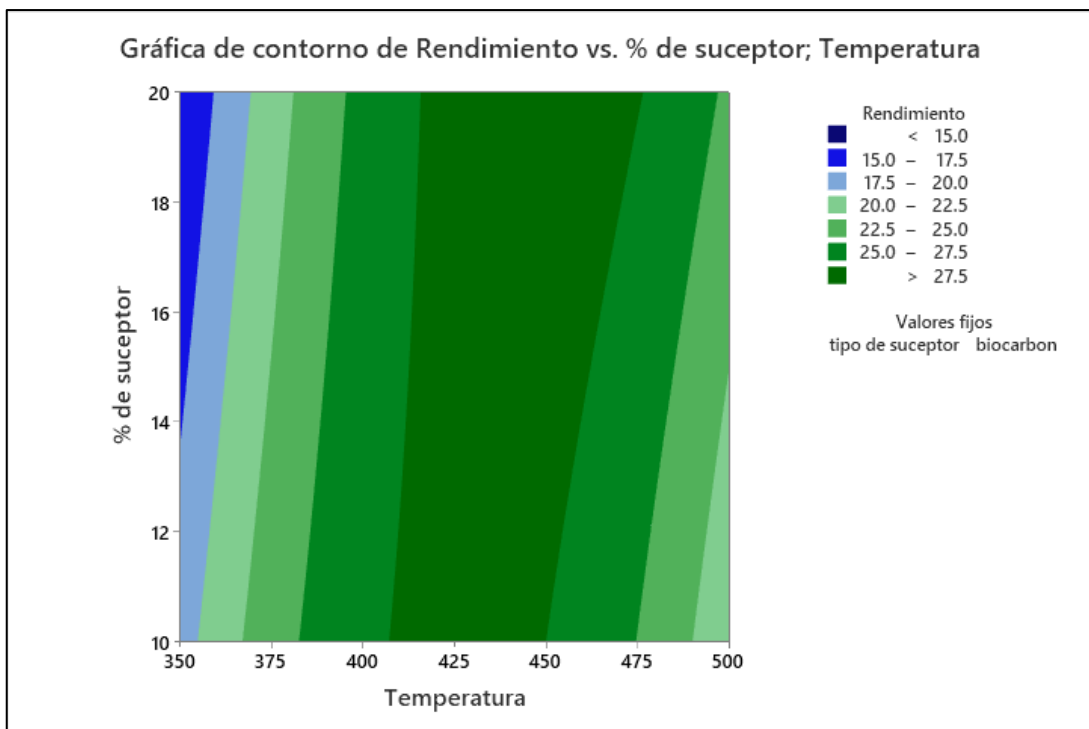


Figura 12.
Gráficas de contorno de rendimiento con SiC

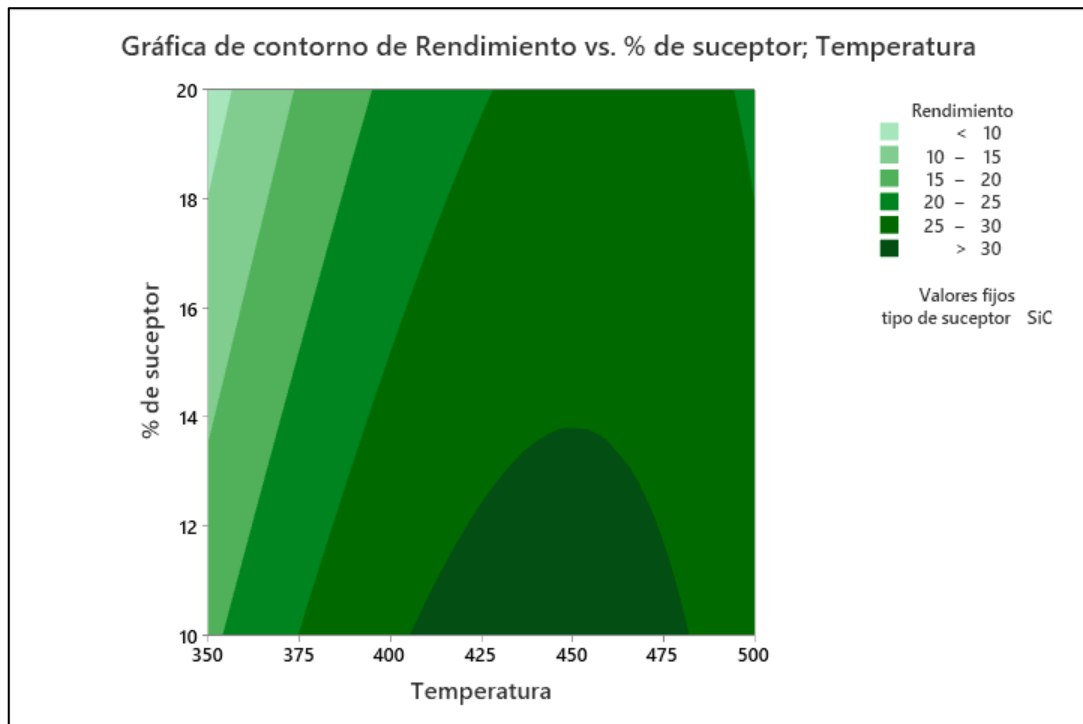


Figura 13.
Gráficas de superficie de rendimiento con Biocarbón

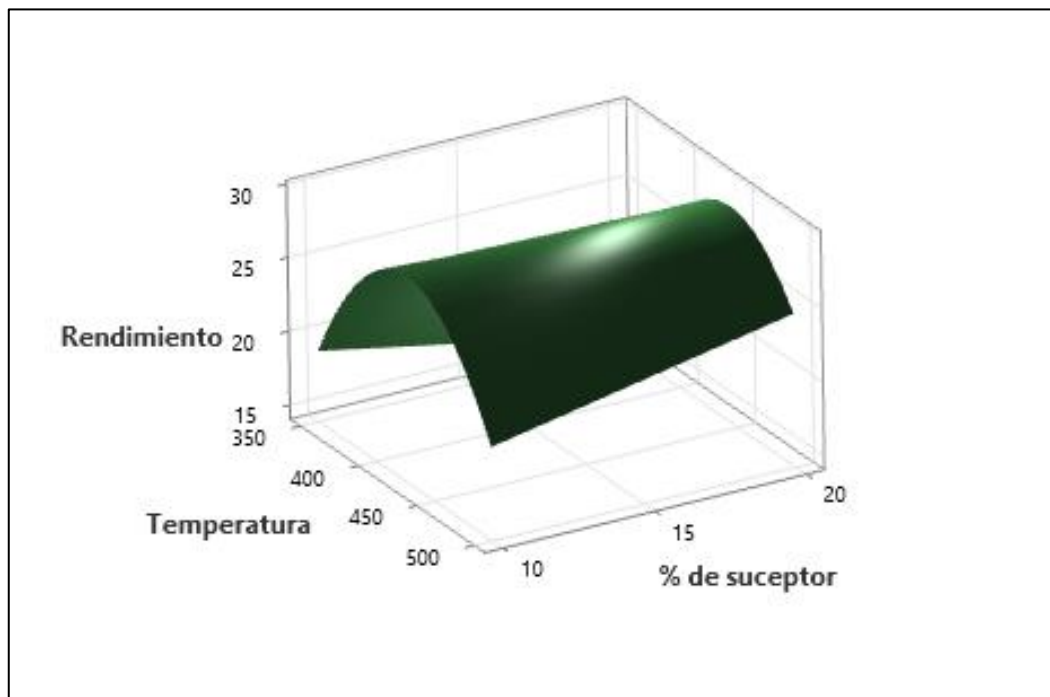
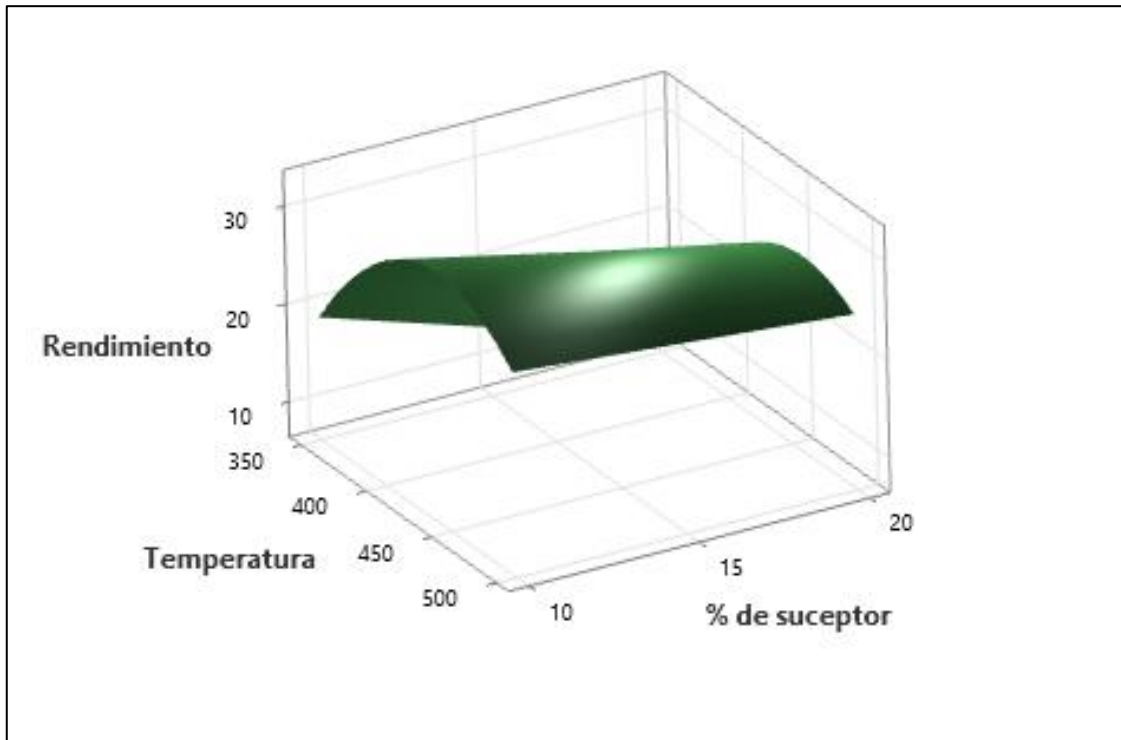


Figura 14.
Gráficas de superficie de rendimiento con SiC



En la Figura 13 y 14 se puede observar que el rendimiento al utilizar como susceptor biocarbón solo depende de la temperatura, maximizando el rendimiento en un rango de temperaturas entre 410 y 450, independiente del valor del porcentaje de susceptor. Por otro lado, el rendimiento de biocarbón cuando se usa SiC como susceptor se maximiza en función a la temperatura y el % de susceptor en la mezcla en un rango entre 410 y 480 °C y un porcentaje de 10 a 15% de carburo de silicio.

Por otro lado, con la siguiente tabla se presenta como solución los valores de las condiciones que maximizan el rendimiento del biocarbón.

Tabla 16.
Solución de optimización

Solución	Temperatura	% de susceptor	de tipo de susceptor	Rendimiento Ajuste	Deseabilidad compuesta
1	443.93	10	SiC	32.2458	1

Según la predicción del modelo se puede obtener un rendimiento máximo del 32.24% a una temperatura de 444°C al 10% de susceptor en la mezcla y usando como susceptor carburo de silicio.

5.1.2. Resultados del tercer objetivo específico

En la siguiente tabla se presentan los valores del análisis proximal de las diferentes réplicas de briquetas a diferentes proporciones de biocarbón en la mezcla.

Tabla 17.

Análisis proximal de briquetas

Parámetro	Briqueta al 50%			Briqueta al 70%		
	R1	R2	R3	R1	R2	R3
Contenido de humedad (%)	20.32	7.39	9.49	18.07	18.31	18.52
Materia volátil (%)	68.15	71.02	73.19	61.06	64.18	59.87
Cenizas (%)	2.34	3.25	0.65	4.00	3.43	4.97
Carbono Fijo (%)	9.20	18.35	16.69	16.89	14.09	16.65
Poder calorífico superior (MJ/kg)	14.85	18.57	18.36	16.36	15.90	16.08
Densidad aparente (g/cm ³)	1.28	1.27	1.25	1.26	1.26	1.27
Índice de combustibilidad (IC)	7.4	3.87	4.38	3.62	4.55	3.60

En las siguientes gráficas, se comparan los valores de cada parámetro con la norma técnica de referencia (NTC).

Figura 15.

Contenido de humedad de briquetas de biocarbón de CC

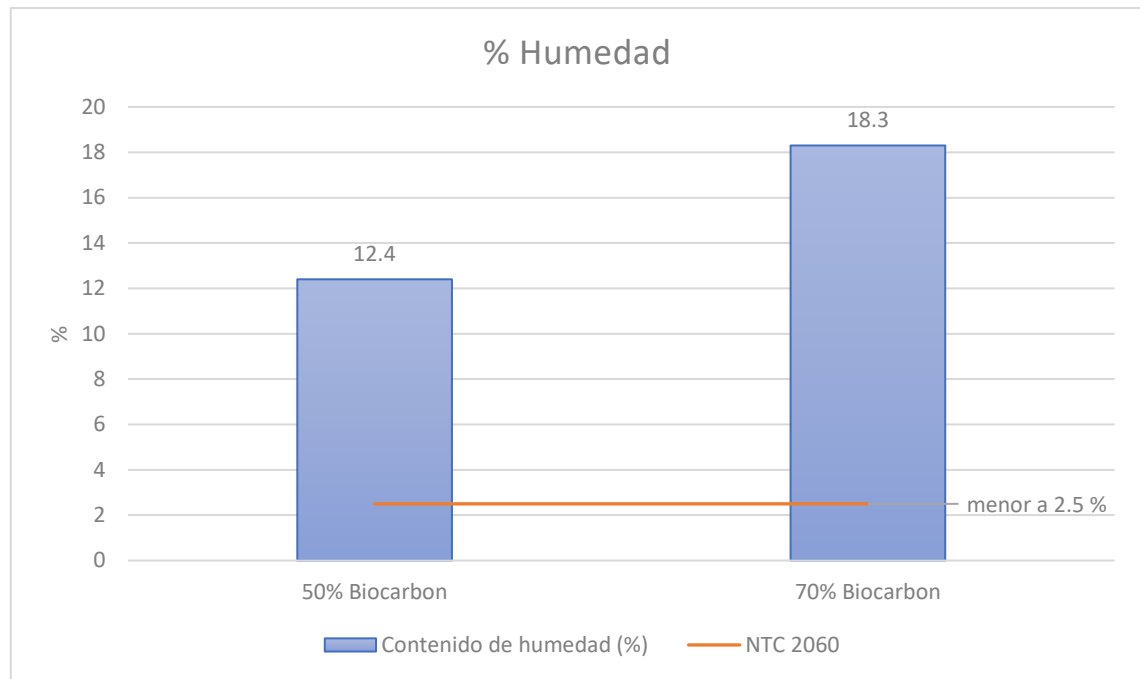


Figura 16.

Contenido de MV de briquetas de biocarbón de CC

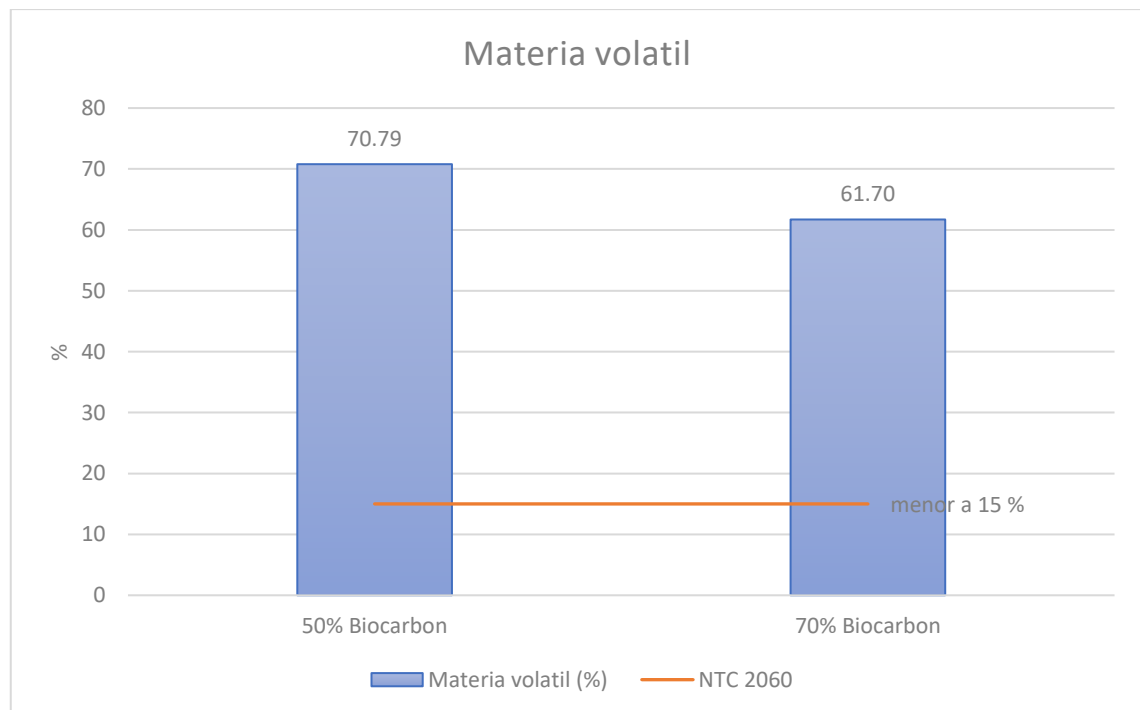


Figura 17.

Contenido de ceniza de briquetas de biocarbón de CC

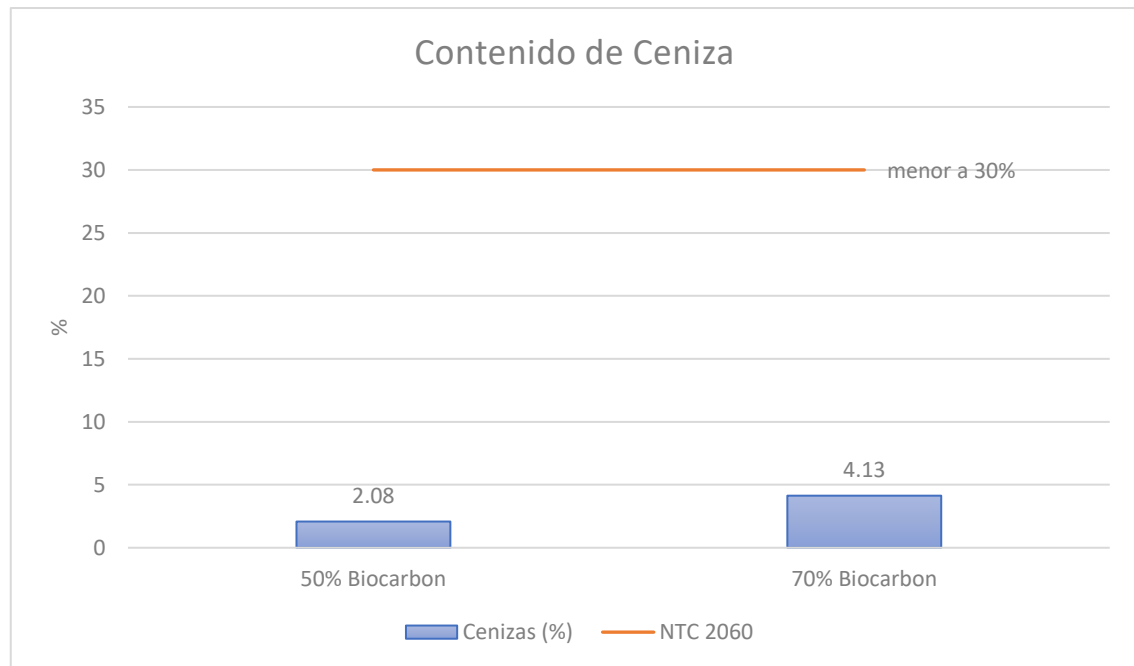


Figura 18.

Contenido de carbono fijo de briquetas de biocarbón de CC

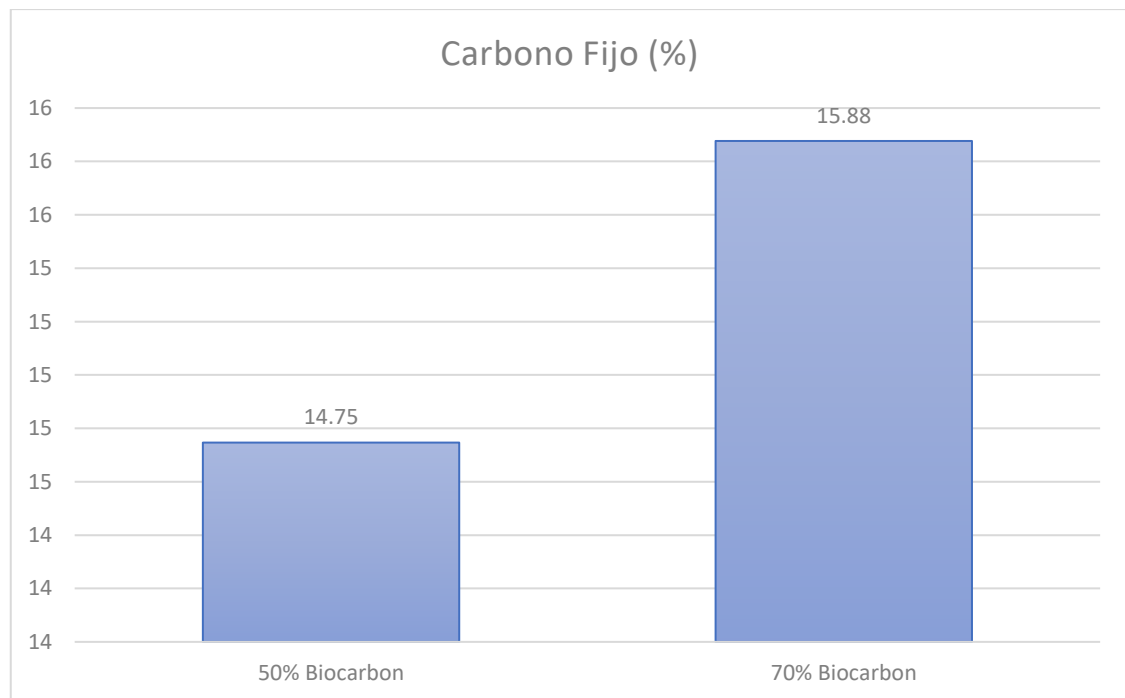


Figura 19.

Contenido de poder calorífico de briquetas de biocarbón de CC

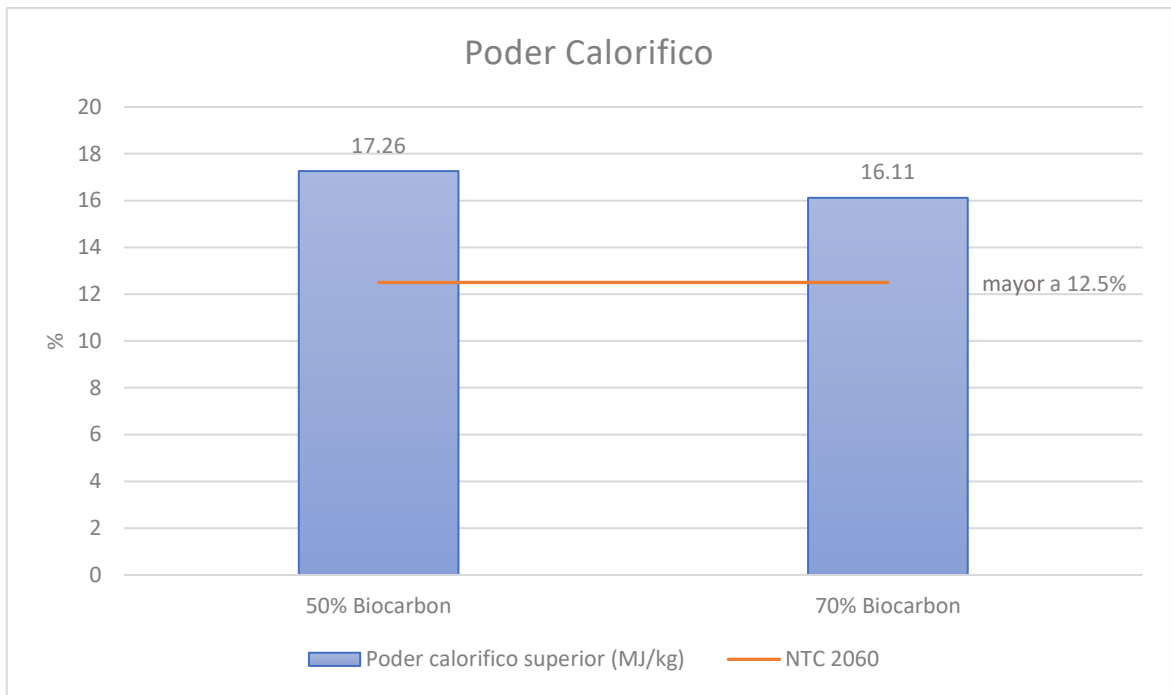
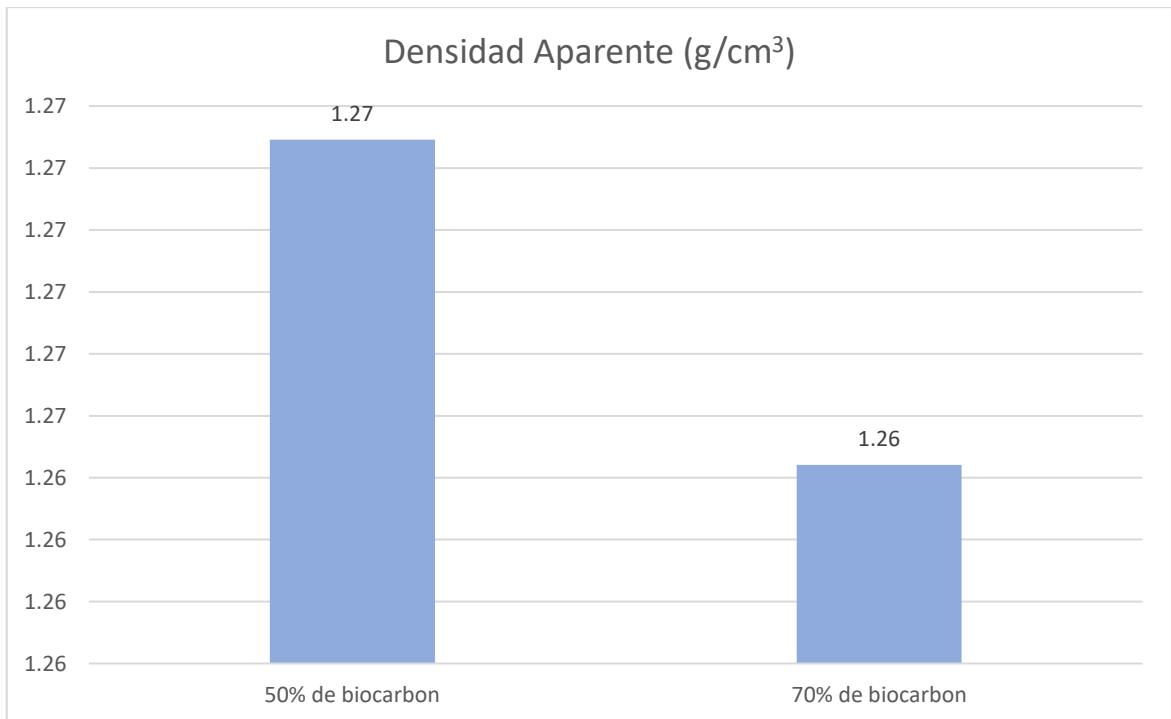


Figura 20.

Densidad aparente de briquetas de biocarbón de CC



De la gráfica anterior se puede observar un alto contenido de humedad en ambos tipos de briquetas, incluso encima de lo que establece la norma, esto podría ser perjudicial, pues como se comentó anteriormente gran parte de la energía del residuo será desaprovechada en evaporar el agua, según ha reportado que se requiere 2,44 MJ de energía por cada kilo de agua evaporada (Vargas – Moreno, et al., 2012), lo que quiere decir que las briquetas tiene que pasar por un proceso de secado antes de ser utilizadas. Por otro lado, la MV tiene un contenido alto en las briquetas lo que le configura un encendido rápido, sin embargo, supera el límite establecido por la NTC 2060 (menor a 15%); debido seguramente a temas de seguridad en su uso. Por otro lado, el contenido de ceniza es muy inferior al 5% y a lo establecido en la norma, lo que garantiza que no afecte al PC; con respecto al carbono fijo se encuentra por debajo del límite establecido, ello se confiere un corto tiempo de duración en la combustión. El poder calorífico por su parte se encuentra sobre el límite de la norma NTC 2060.

A continuación, en la siguiente tabla se comparan los valores del análisis proximal de las briquetas, CC y biocarbón de CC.

Tabla 18.

Análisis proximal de la CC, Biocarbón de CC y Briquetas de biocarbón de CC

Tipo de análisis	Parámetro	CC	Biocarbón de CC	Briquetas al 50 % de Biocarbón de CC	Briquetas al 70 % de Biocarbón de CC
Análisis Proximal	Contenido de humedad (%)	10.49	3.5	12.5	18.3
	Materia volátil (%)	76.69	57.33	70.79	61.70
	Cenizas (%)	0.13	5.39	2.08	4.13
	Carbono Fijo (%)	12.7	33.8	14.75	15.88
	Poder calorífico superior (MJ/kg)	17.54	21.72	17.26	16.11
	IC (índice de combustibilidad)	6.04	1.7	5.21	3.92

Según la tabla anterior, las briquetas contienen una elevada humedad en comparación de la CC y el biocarbón de CC, por lo que se sugiere una fase de secado de estas briquetas, esta humedad fue adquirida en el proceso de elaboración de estos productos densificados. Asimismo, la MV, tiene altos valores y similares a la CC, sin embargo, las briquetas usan como insumo el biocarbón de CC, que contiene un % de MV muy por debajo de las briquetas, lo que sugiere que el aglutinante (fécula o almidón de yuca) proporciona compuestos volátiles en el proceso de densificación. Por otro lado, el contenido de ceniza es bajo en comparación del biocarbón, pero muy superior a la CC; pero sin afectar el contenido energético. El carbono fijo es superior a la CC, pero muy inferior al biocarbón, lo que explicaría por que el PC es similar a la CC, pero menor al contenido energético del biocarbón. Según todos los resultados se puede establecer el potencial de las briquetas de biocarbón de CC como combustible, sin embargo, se tiene que evaluar un proceso de secado y la combinación con otros aglutinantes para de esa manera mejorar sus propiedades y tener la certeza de ser un producto mejor que sus biomásas predecesoras. El índice de combustibilidad de las briquetas es similar a la de CC, lo que determina su buena capacidad que tiene las briquetas para mantener el proceso de combustión.

Con el fin de establecer diferencias significativas entre los parámetros de cada tipo de briqueta, hacemos usos de la estadística inferencial, para ello se determina el tipo de prueba (paramétrica y no paramétrica) a utilizar, según la siguiente tabla.

Tabla 19.
Análisis de los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas

	% de Biocarbón	Test de Normalidad			Decisión	Prueba de Levene				Decisión	Prueba estadística
		Shapiro-Wilk *				F	gl1	gl2	Sig.		
		Estadístico	gl	Sig.							
Contenido de Humedad	50% DE BIOCARBON	0.87	3	0.29	Tiene distribución normal	12.43	1	4	0.02	Varianzas no homogéneas	U de Mann-Whitney (No paramétrico)
	70% DE BIOCARBON	1.00	3	0.93	Tiene distribución normal						
MV	50% DE BIOCARBON	0.99	3	0.85	Tiene distribución normal	0.01	1	4	0.91	Varianzas homogéneas	T de Student para muestras independientes (Paramétrica)
	70% DE BIOCARBON	0.94	3	0.52	Tiene distribución normal						
Ceniza	50% DE BIOCARBON	0.97	3	0.67	Tiene distribución normal	0.91	1	4	0.39	Varianzas homogéneas	T de Student para muestras independientes (Paramétrica)
	70% DE BIOCARBON	0.98	3	0.72	Tiene distribución normal						
CF	50% DE BIOCARBON	0.88	3	0.33	Tiene distribución normal	5.34	1	4	0.08	Varianzas homogéneas	T de Student para muestras independientes (Paramétrica)
	70% DE BIOCARBON	0.81	3	0.15	Tiene distribución normal						
PCS	50% DE BIOCARBON	0.79	3	0.10	Tiene distribución normal	12.28	1	4	0.02	Varianzas no homogéneas	U de Mann-Whitney (No paramétrico)
	70% DE BIOCARBON	0.98	3	0.76	Tiene distribución normal						
DA	50% DE BIOCARBON	0.96	3	0.64	Tiene distribución normal	2.57	1	4	0.18	Varianzas homogéneas	U de Mann-Whitney (No paramétrico)
	70% DE BIOCARBON	0.75	3	0.00	NO Tiene distribución normal						

Nota. SPSS, *: cuando la muestra es menor a 50 datos

En la tabla anterior se puede observar que para establecer diferencias significativas de contenido de MV, ceniza y CF entre los dos tipos de briquetas a diferentes proporciones de BC en la mezcla se utilizó la prueba estadística paramétrica, T de Student para muestras independientes, debido a que los datos cumplen con los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas, mientras que para parámetros como % de humedad, DA y PCS solo se usó una prueba no paramétrica, la U Mann de Whitney.

Contenido de humedad

En el siguiente cuadro se establecen los estadísticos descriptivos del contenido de humedad en cada grupo:

Tabla 20.
IC (95%) para la media de la humedad

Medidas	Briquetas al 50% de BC	Briquetas al 70% de BC
Media	12.4	18.3
Error estándar	4	0.13
IC* 95% Límite inferior	-4.83	17.74
IC 95% Límite superior	29.63	18.85

*IC: Intervalo de confianza

Con el fin de establecer diferencias significativas en el contenido de humedad de los dos tipos de briquetas a distintas proporciones de biocarbón en la mezcla (50 y 70%), se plantea la siguiente pregunta:

¿Existen diferencias de contenido de humedad entre briquetas a 50% de biocarbón y 70% de biocarbón?

En función a la pregunta anterior se formulan las siguientes hipótesis:

H₀: El contenido de humedad en briquetas de 50% de biocarbón **ES DIFERENTE** en briquetas de 70% de biocarbón.

H₁: El contenido de humedad en briquetas de 50% de biocarbón **NO ES DIFERENTE** en briquetas de 70% de biocarbón.

Se establece un nivel de significancia del 5% (0.05).

Luego en función a la Tabla 17, se aplica la prueba estadística no paramétrica U Mann de Whitney, tal y como se observa en la siguiente tabla:

Tabla 21.

Prueba U Mann de Whitney para el % de humedad

P valor	Decisión
0.7	Se acepta la hipótesis nula

Nota. SPSS

Según la tabla anterior el p valor igual a 0.7 es mayor al nivel de significancia establecido 0.05, entonces se puede inferir lo siguiente:

Con una probabilidad de 70% se puede afirmar que “el contenido de humedad en briquetas de 50% de biocarbón **NO ES DIFERENTE** en briquetas de 70% de biocarbón”.

Contenido de MV

En el siguiente cuadro se establecen los estadísticos descriptivos del contenido de materia volátil en cada grupo:

Tabla 22.

IC (95%) para la media de la materia volátil

Medidas	Briquetas al 50% de BC	Briquetas al 70% de BC
Media	70.78	61.70
Error estándar	1.45	1.28
IC 95% Límite inferior	64.50	56.17
IC 95% Límite superior	77.06	67.23

*IC: Intervalo de confianza

Con el fin de establecer diferencias significativas en el contenido de MV de los dos tipos de briquetas a distintas proporciones de biocarbón en la mezcla (50 y 70%), se plantea la siguiente pregunta:

¿existen diferencias de contenido de MV entre briquetas a 50% de biocarbón y 70% de biocarbón?

En función a la pregunta anterior se formulan las siguientes hipótesis:

H₀: El contenido de MV en briquetas de 50% de biocarbón **ES DIFERENTE** en briquetas de 70% de biocarbón.

H₁: El contenido de MV en briquetas de 50% de biocarbón **NO ES DIFERENTE** en briquetas de 70% de biocarbón.

Se establece un nivel de significancia del 5% (0.05).

Luego en función a la Tabla 17, se aplica la prueba estadística paramétrica t de student, tal y como se observa en la siguiente tabla:

Tabla 23.

T de Student para el % de MV

t	gl	p valor
4.671	4	0.010

Nota. SPSS

Según la tabla anterior el p valor igual a 0.01 es menor al nivel de significancia establecido 0.05, entonces se puede inferir lo siguiente:

Con una probabilidad de 1% se puede afirmar que “el contenido de MV en briquetas de 50% de biocarbón **ES DIFERENTE** en briquetas de 70% de biocarbón”.

Contenido de Ceniza

En el siguiente cuadro se establecen los estadísticos descriptivos del contenido de ceniza en cada grupo:

Tabla 24.

IC (95%) para la media del contenido de ceniza

Medidas	Briquetas al 50% de BC	Briquetas al 70% de BC
Media	2.08	4.13
Error estándar	0.76	0.44
IC 95% Límite inferior	-1.19	2.19
IC 95% Límite superior	5.35	6.06

*IC: Intervalo de confianza

Con el fin de establecer diferencias significativas en el contenido de ceniza de los dos tipos de briquetas a distintas proporciones de biocarbón en la mezcla (50 y 70%), se plantea la siguiente pregunta:

¿existen diferencias de contenido de ceniza entre briquetas a 50% de biocarbón y 70% de biocarbón?

En función a la pregunta anterior se formulan las siguientes hipótesis:

H₀: El contenido de ceniza en briquetas de 50% de biocarbón **ES DIFERENTE** en briquetas de 70% de biocarbón.

H₁: El contenido de ceniza en briquetas de 50% de biocarbón **NO ES DIFERENTE** en briquetas de 70% de biocarbón.

Se establece un nivel de significancia del 5% (0.05).

Luego en función a la Tabla 17, se aplica la prueba estadística paramétrica t de Student, tal y como se observa en la siguiente tabla:

Tabla 25.

T de Student para el % de ceniza

t	gl	p valor
-2.322	4	0.081

Nota. SPSS

Según la tabla anterior el p valor igual a 0.081 es mayor al nivel de significancia establecido 0.05, entonces se puede inferir lo siguiente:

Con una probabilidad de 8.1% se puede afirmar que “el contenido de ceniza en briquetas de 50% de biocarbón **NO ES DIFERENTE** en briquetas de 70% de biocarbón”.

Contenido de Carbono fijo

En el siguiente cuadro se establecen los estadísticos descriptivos del contenido de CF en cada grupo:

Tabla 26.

IC (95%) para la media del carbono fijo

Medidas	Briquetas al 50% de BC	Briquetas al 70% de BC
Media	14.74	15.87
Error estándar	2.81	0.89
IC 95% Límite inferior	2.63	12.02
IC 95% Límite superior	26.85	19.73

*IC: Intervalo de confianza

Con el fin de establecer diferencias significativas en el contenido de CF de los dos tipos de briquetas a distintas proporciones de biocarbón en la mezcla (50 y 70%), se plantea la siguiente pregunta:

¿existen diferencias de contenido de CF entre briquetas a 50% de biocarbón y 70% de biocarbón?

En función a la pregunta anterior se formulan las siguientes hipótesis:

H₀: El contenido de CF en briquetas de 50% de biocarbón **ES DIFERENTE** en briquetas de 70% de biocarbón.

H₁: El contenido de CF en briquetas de 50% de biocarbón **NO ES DIFERENTE** en briquetas de 70% de biocarbón.

Se establece un nivel de significancia del 5% (0.05).

Luego en función a la Tabla 22, se aplica la prueba estadística paramétrica t de student, tal y como se observa en la siguiente tabla:

Tabla 27.

T de student para el % de CF

t	gl	p valor
-.383	4	0.721

Nota. SPSS

Según la tabla anterior el p valor igual a 0.721 es mayor al nivel de significancia establecido 0.05, entonces se puede inferir lo siguiente:

Con una probabilidad de 72.1% se puede afirmar que “el contenido de CF en briquetas de 50% de biocarbón **NO ES DIFERENTE** en briquetas de 70% de biocarbón”.

Poder calorífico superior

En el siguiente cuadro se establecen los estadísticos descriptivos del PCS.

Tabla 28.

IC (95%) para la media del poder calorífico superior

Medidas	Briquetas al 50% de BC	Briquetas al 70% de BC
Media	17.26	16.11
Error estándar	1.20	0.13
IC 95% Límite inferior	12.06	15.53
IC 95% Límite superior	22.45	16.68

*IC: Intervalo de confianza

Con el fin de establecer diferencias significativas de PCS de los dos tipos de briquetas a distintas proporciones de biocarbón en la mezcla (50 y 70%), se plantea la siguiente pregunta:

¿existen diferencias de PCS entre briquetas a 50% de biocarbón y 70% de biocarbón?

En función a la pregunta anterior se formulan las siguientes hipótesis:

H₀: El PCS en briquetas de 50% de biocarbón **ES DIFERENTE** en briquetas de 70% de biocarbón.

H₁: El PCS en briquetas de 50% de biocarbón **NO ES DIFERENTE** en briquetas de 70% de biocarbón.

Se establece un nivel de significancia del 5% (0.05).

Luego en función a la Tabla 17, se aplica la prueba estadística no paramétrica U Mann de Whitney, tal y como se observa en la siguiente tabla:

Tabla 29.

Prueba U Mann de Whitney para el PCS

P valor	Decisión
0.7	Se acepta la hipótesis nula

Nota. SPSS

Según la tabla anterior el p valor igual a 0.7 es mayor al nivel de significancia establecido 0.05, entonces se puede inferir lo siguiente:

Con una probabilidad de 70% se puede afirmar que “el PCS en briquetas de 50% de biocarbón **NO ES DIFERENTE** en briquetas de 70% de biocarbón”.

Densidad Aparente

En el siguiente cuadro se establecen los estadísticos descriptivos del DA.

Tabla 30.

IC (95%) para la media de la densidad aparente

Medidas	Briquetas al 50% de BC	Briquetas al 70% de BC
Media	1.2667	1.2633
Error estándar	0.008	0.003
IC 95% Límite inferior	1.22	1.24
IC 95% Límite superior	1.30	1.27

*IC: Intervalo de confianza

Con el fin de establecer diferencias significativas de DA de los dos tipos de briquetas a distintas proporciones de biocarbón en la mezcla (50 y 70%), se plantea la siguiente pregunta:

¿Existen diferencias de DA entre briquetas a 50% de biocarbón y 70% de biocarbón?

En función a la pregunta anterior se formulan las siguientes hipótesis:

H₀: La DA en briquetas de 50% de biocarbón **ES DIFERENTE** en briquetas de 70% de biocarbón.

H₁: La DA en briquetas de 50% de biocarbón **NO ES DIFERENTE** en briquetas de 70% de biocarbón.

Se establece un nivel de significancia del 5% (0.05).

Luego en función a la Tabla 17, se aplica la prueba estadística no paramétrica U Mann de Whitney, tal y como se observa en la siguiente tabla:

Tabla 31.

Prueba U Mann de Whitney para el DA

P valor	Decisión
0.7	Se acepta la hipótesis nula

Nota. SPSS

Según la tabla anterior el p valor igual a 0.7 es mayor al nivel de significancia establecido 0.05, entonces se puede inferir lo siguiente:

Con una probabilidad de 70% se puede afirmar que “la DA en briquetas de 50% de biocarbón **NO ES DIFERENTE** en briquetas de 70% de biocarbón”.

VI. DISCUSION DE RESULTADOS

6.1 Contrastación y demostración de la hipótesis con los resultados

6.1.1 Contrastación de la hipótesis general

Ha: El biocarbón de cascarilla de café generado por pirolisis asistida por microondas permite obtener briquetas a nivel de laboratorio, 2023.

H0: El biocarbón de cascarilla de café generado por pirolisis asistida por microondas **NO** permite obtener briquetas a nivel de laboratorio, 2023.

Los resultados demuestran que el biocarbón de cascarilla de café generado por pirolisis asistida por microondas tienen mejores propiedades físicas y químico-térmicas que su biomasa precursora, debido al aumento de CF, importante para la duración de la combustión, disminución del % de Humedad, perjudicial para la combustión y aumentos del contenido energético, es decir del PCS de 17.54 a 21.72 MJ/Kg, permitiendo de esta forma elaborar briquetas con altos índices de combustibilidad (5.21 para briquetas de 50% de BC y 3.92 para briquetas con 70% de BC), lo que implica garantizar la combustión de estas briquetas. Por lo establecido anteriormente se acepta la hipótesis alterna de que “el biocarbón de cascarilla de café generado por pirolisis asistida por microondas permite obtener briquetas a nivel de laboratorio, 2023”.

Demostrando de esta forma que es un buen sustrato para producir briquetas que cumplan con requerimientos técnicos como la norma NTC 2060. Por ello se acepta la hipótesis alterna de que “El biocarbón de cascarilla de café generado por pirolisis asistida por microondas permite obtener briquetas a nivel de laboratorio, 2023”.

6.1.2 Contrastación de la primera hipótesis específica

Ha: Las propiedades físicas y químicas - térmicas del biocarbón de cascarilla de café presentan mejoras en comparación con la biomasa original.

H0: La propiedades físicas y químico - térmicas del biocarbón de cascarilla de café **NO** presentan mejoras en comparación con la biomasa original.

Para la contrastación de la primera hipótesis específica se realizó un análisis proximal, elemental y energético de la CC y biocarbón de CC, cuyos resultados se presenta en la Tabla 11. Los parámetros del análisis proximal de la muestra de biocarbón de CC, demuestran que el proceso pirolítico aumenta hasta 3 veces el contenido de CF en comparación con la CC, por lo que se obtiene un mayor PC del biocarbón, de la misma forma el contenido de humedad del BC se reduce drásticamente en comparación con la CC. Sin embargo, se reduce el contenido de materia volátil, lo que conduce a un aumento de la temperatura de ignición, asimismo aumenta el contenido de ceniza hasta en un 5% en contrastación con la CC de café que casi no poseía ceniza, lo que podría provocar problemas en la combustión. En cuanto al análisis elemental el contenido de C aumenta en el BC, lo que explicaría el aumento en el CF y PC, sin embargo, se reduce el contenido de H, asociado con la reducción de MV en el BC, finalmente existe un aumento en el contenido de nitrógeno en función a la CC, pero que no representa un riesgo de emisiones de gases nocivos al medio ambiente. Por lo descrito anteriormente se puede establecer que, en parámetros como el CF, PC, % de humedad, C e H, el biocarbón presenta mejores propiedades que la CC; por lo que se puede aceptar la hipótesis alterna de que “las propiedades físicas y químicas - térmicas del biocarbón de cascarilla de café presentan mejoras en comparación con la biomasa original”.

6.1.3 Contrastación de la segunda hipótesis específica

Ha: Las condiciones de operación del proceso de pirolisis asistida por microondas influyen en la mejora del rendimiento del biocarbón de cascarilla de café a nivel laboratorio, 2023.

H0: Las condiciones de operación del proceso de pirolisis asistida por microondas **NO** influyen en la mejora del rendimiento del biocarbón de cascarilla de café a nivel laboratorio, 2023.

Para contrastar la segunda hipótesis específica se evaluó las condiciones de temperatura, % de susceptor en la biomasa y tipo de susceptor en la biomasa que maximizan el rendimiento del biocarbón. De los resultados de regresión

del modelo basado en el análisis de superficie de respuesta (Tabla 16), se establece que factores como la temperatura (p valor = 0.00), el % de susceptor (p valor= 0.057), tienen influencia directa en el rendimiento del biocarbón en el proceso pirolítico asistido por microondas, así mismo la interacción temperatura*temperatura (p valor = 0.00), Temperatura*% de susceptor (p valor = 0.042), Temperatura*tipo de susceptor (p valor = 0.06) y % de susceptor*tipo de susceptor (p valor 0.054), también tiene influencia en el rendimiento.

Además, en los resultados también se observa que el rendimiento al utilizar como susceptor biocarbón solo depende de la temperatura, maximizando el rendimiento en un rango de temperaturas entre 410 y 450, independiente del valor del porcentaje de susceptor. Por otro lado, el rendimiento de biocarbón cuando se usa SiC como susceptor se maximiza en función a la temperatura y el % de susceptor en la mezcla en un rango entre 410 y 480 °C y un porcentaje de 10 a 15% de carburo de silicio. De esta serie de observaciones, se estima que a una temperatura ideal de 444°C y un % susceptor SiC al 10%, se puede maximizar el rendimiento del biocarbon al 32.24%, tal como se presenta en la tabla 16.

6.1.4 Contrastación de la tercera hipótesis específica

Ha: A mayor porcentaje de biocarbón en la mezcla se mejora las propiedades físicas y químico - térmicas de las briquetas a nivel laboratorio, 2023

H0: A mayor porcentaje de biocarbón en la mezcla **NO** se mejora las propiedades físicas y químico - térmicas de las briquetas a nivel laboratorio, 2023

Para contrastar la tercera hipótesis específica, se realizó un análisis proximal de las diferentes réplicas de briquetas a diferentes proporciones de biocarbón en la mezcla (al 50% y 70%). Seguidamente, se realizó una inferencia de los valores obtenidos para la comparación entre las diferentes muestras y con valores teóricos de otras literaturas. De acuerdo con los resultados de la aplicación del t de student para MV se infiere que con una probabilidad de 1% se puede afirmar que “el contenido de MV en briquetas de 50% de

biocarbón **ES DIFERENTE** en briquetas de 70% de biocarbón”. Mientras que, para el contenido de Ceniza, se infiere que con una probabilidad de 8.1% se puede afirmar que “el contenido de ceniza en briquetas de 50% de biocarbón **NO ES DIFERENTE** en briquetas de 70% de biocarbón”. Por último, sobre el contenido del Carbono fijo, se infiere que con una probabilidad de 72.1% se puede afirmar que “el contenido de CF en briquetas de 50% de biocarbón **NO ES DIFERENTE** en briquetas de 70% de biocarbón”.

Por otro lado, de la aplicación de la prueba U Mann de Whitney para el Poder calorífico superior, se infiere que con una probabilidad de 70% se puede afirmar que “el PCS en briquetas de 50% de biocarbón **NO ES DIFERENTE** en briquetas de 70% de biocarbón”. Y sobre el contenido de humedad, se infiere que con una probabilidad de 70% se puede afirmar que “el contenido de humedad en briquetas de 50% de biocarbón **NO ES DIFERENTE** en briquetas de 70% de biocarbón”, Asimismo para la **DA** se deduce con una probabilidad de 70% que “la DA en briquetas de 50% de biocarbón **NO ES DIFERENTE** en briquetas de 70% de biocarbón”.

Es decir, en los resultados del análisis de la T de Student para, ceniza y CF, no se puede establecer diferencias significativas entre los valores de parámetros de cada tipo de briqueta. Por su parte, para parámetros como PSC, % de humedad y DA, la prueba de U Mann de Whitney tampoco se puede establecer diferencias entre uno y otro tipo de briquetas. A excepción de la MV donde se considera que las briquetas al 50% de biocarbón poseen valores más altos de MV. Sin embargo, esto no garantiza que las otras propiedades tengan el mismo comportamiento por lo que se rechaza la hipótesis alterna y se acepta la nula “A mayor porcentaje de biocarbón en la mezcla **NO** se mejora las propiedades físicas y químico - térmicas de las briquetas a nivel laboratorio, 2023”.

6.2 Contrastación de los resultados con otros estudios similares

De la evaluación de las propiedades físico – químicas y térmicas de la cascarilla de café, este presentó valores de poder calorífico superior de 17.54 MJ/Kg, contenido de humedad (10.49%) y MV (76.69%), valores similares a los

presentados por los autores Setter y Oliveira, (2022), los cuales registraron valores de poder calorífico superior de 18.5 MJ/Kg, contenido de humedad 9.06 % y MV de 77.09%. Sin embargo, para el parámetro de carbono fijo, los autores Setter y Oliveira, (2022) registraron un valor de 19.36%, muy superior al 12.7% obtenido de en el presente estudio.

Respecto a las propiedades térmicas de las briquetas de biocarbón, el mayor valor obtenido de poder calorífico fue de 17.26 KJ/Kg, menor a lo reportado por Setter y Oliveira, (2022), quienes registraron valores de entre 19.66 a 21.37 KJ/Kg de poder calorífico en briquetas elaboradas de biocarbón de cascarilla de café por el mismo método pirolítico, pero usando lignina Kraft como aglutinante.

Por otro lado, el presente estudio demostró en sus resultados, que el mayor rendimiento del biocarbón de cascarilla de café se obtiene a 444 °C, un valor superior en comparación a lo presentado en el estudio de Pratiwi (2020), quien reportó una temperatura óptima para la elaboración de briquetas de 300°C.

Asimismo, el presente estudio coincide con lo concluido por Setter (2020), quien justificó el uso de la cascarilla de café como biocombustible, específicamente como productos densificados. Y, además, sobre la importancia de determinar la temperatura final para la obtención del biocarbón. En tanto, con el estudio desarrollado por el autor Heredia (2021), coincide con la importancia de realizar procesos de pirólisis para convertir los residuos orgánicos en biocarbón como una forma de implementar la bioeconomía, en actividades económicas como la agricultura.

En cuanto a si las briquetas de biocarbón de cascarilla de café superan en propiedades energéticas a las briquetas hechas a base de su precursora, Pérez y Torpoco (2022), reportaron sus briquetas con valores de poder calorífico promedio de 19.80 MJ/kg y 19.44 MJ/kg, similares a los hallados en este estudio. Asimismo, coincide con el estudio de Workie y Kumar (2022), quienes afirman que las briquetas hechas de cáscara de café tienen mucho potencial como fuente de energía amigable con el medio ambiente y reduce la contaminación al mismo tiempo que proporciona una forma segura de deshacerse de los residuos sólidos orgánicos del café. Los valores obtenidos en este estudio entre 10,03 % de

contenido de humedad, 970 kg/m³ densidad, 81% carbón fijo, 5,15% contenido en cenizas, 0% azufre y 30,54 Kcal/kg poder calorífico superior.

En el mismo sentido, los resultados del presente estudio coinciden con el estudio de Paredes (2022) quien realizó un estudio similar con evaluación de análisis elemental y químico para residuos de café, determinando que sus resultados son indicadores de un gran potencial para la producción de biocarbon mediante procesos termoquímicos como la pirolisis. Sin embargo, Paredes (2022) hace una diferenciación importante, considera que la pulpa de café es un mejor precursor para biocarbon, a diferencia de la cascarilla de café que debido al menor contenido de cenizas resulta ser un mejor precursor para la obtención de biocombustibles.

Finalmente, los resultados del presente estudio, también presenta cierto nivel de coincidencia con el estudio de Montenegro (2022), quien evaluó el poder calorífico de briquetas de biochar a partir de cascaras generados en los hogares y obteniendo alto valores de rendimiento de poder calorífico en la briqueta de biochar más fécula de yuca que el carbón vegetal. Mientras que, se coincide con el estudio de Huamán (2021) al determinar la importancia del aprovechamiento de residuos orgánicos de la agricultura, como el bagazo de maíz, para generar altos valores de poder calorífico (entre 18.4 MJ/kg y 17.1 MJ/kg).

6.3 Responsabilidad ética de acuerdo con los reglamentos vigentes

De acuerdo con el Reglamento del Código de Ética de la Investigación de la UNAC, aprobado por Resolución de Consejo Universitario N. °260 2019-CU, donde se establecen los lineamientos éticos y de conducta para una investigación; por ello los autores de la investigación asumen toda responsabilidad respecto a la información contenida en la presente investigación

VII.CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos, que a su vez responden a los objetivos planteados en el presente estudio respecto a la elaboración de biocarbón de cascarilla de café generado por pirolisis asistida por microondas para obtener briquetas a nivel laboratorio en el año 2023, se puede concluir lo siguiente:

1. Se concluye que la elaboración de biocarbón a través de la pirolisis asistida por microondas de cascarilla de café es un buen sustrato para la elaboración de briquetas debido a sus favorables propiedades físicas y químico-térmicas y la selección de las condiciones óptimas del proceso para mejorar su rendimiento, permitiendo que estas puedan cumplir con los parámetros establecidos en la Norma NTC 2060 (Briquetas combustibles para uso doméstico).
2. Se concluye que el biocarbón obtenido de la pirolisis asistida por microondas de cascarilla de café, tiene mejores propiedades fisicoquímicas y energéticas que su materia prima precursora, ya que a través de las pruebas de laboratorio proximal y elemental de la *Cascarilla de Café (CC)* y *biocarbón de Cascarilla de Café*, se obtuvo que la muestra de biocarbón de CC tiene un contenido de humedad (%), Materia volátil (%) y Carbono Fijo (%) por encima de los límites promedios. Mientras que, el porcentaje de Cenizas (%) se encuentra dentro de los límites promedios y la medida del Poder calorífico superior (MJ/kg) es superior en comparación a la muestra de CC. Asimismo, en comparación a la muestra de CC, los parámetros del biocarbon mejoraron con excepción del % de cenizas, que aumentó. Por otro lado, en la prueba de análisis elemental, el porcentaje de carbono (C) y nitrógeno (N) aumentó y el H, O, S disminuyó.
3. Se concluye que las condiciones de operación del proceso de pirolisis asistida por microondas que influyen en la mejora del rendimiento de biocarbón de cascarilla son la temperatura y el % de susceptor. Determinándose que una temperatura a 444°C y un % susceptor SiC al 10%, se puede maximizar el rendimiento del biocarbon al 32.24%.

Asimismo, se concluye que es importante tomar en cuenta que la interacción temperatura*temperatura (p valor = 0.00), Temperatura*% de susceptor (p valor = 0.042), Temperatura*tipo de susceptor (p valor = 0.06) y % de susceptor*tipo de susceptor (p valor 0.054), también tiene influencia en el rendimiento.

4. Se concluye que el porcentaje de biocarbón en la mezcla que mejora las propiedades físicas y químicas térmicas de las briquetas no varían sus propiedades fisicoquímicas de humedad, ceniza, MV y CF y térmicas (PCS), con el aumento del contenido de biocarbón en la mezcla de 50 a 70%, a excepción del contenido de MV, que disminuyó a medida que el % de biocarbón aumentaba, esto podría ser explicado por la influencia del aglutinante en la mezcla (% de almidón de yuca).

VIII. RECOMENDACIONES

De acuerdo a las conclusiones obtenidas como parte del análisis del estudio, a continuación, se presenta una serie de recomendaciones que pueda contribuir con el propósito de otros investigadores:

1. Se recomienda promover la comercialización de las briquetas a partir de biocarbón pirolítico, ya que en la actualidad en el Perú no existe briquetas de biocarbón de CC de forma comercial, y, asimismo, no existe plantas que operen con tecnología de microondas. Aunque, la escalabilidad represente un problema que debería ser abordado por futuras investigaciones, es necesario unir esfuerzos para promover tecnologías limpias como el biocarbon, que posibilitaría la mejora de los suelos y el aprovechamiento de residuos orgánicos de las actividades agrícolas.
2. Se recomienda establecer condiciones adecuadas para la pirolisis, como tiempo de purga de nitrógeno, controladores de temperatura para el reactor y cavidad, así como un adecuado uso de refrigerantes y medidas de seguridad. Por otro lado, se recomienda evaluar diferentes tipos de cascarillas de café para medir su efectividad y rendimiento. probar restos orgánicos. Asimismo, se puede evaluar otros tipos de cascarillas de los diversos residuos orgánicos que se generan en los hogares y de las actividades agrícolas.
3. Se recomienda diseñar un reactor de cavidad monomodo que permita mejorar el análisis de transferencia de calor en la biomasa, esto dará claras luces de cuanto calor puede transmitirse a la biomasa como microondas, algo que es inviable en las cavidades multimodos de hornos microondas convencionales. Asimismo, se recomienda hacer una prueba de análisis de espectroscopia infrarroja, para medir la capacidad de absorción de radiación infrarroja por parte de una muestra y, por ende, su capacidad para la mitigación de gases de efecto invernadero.
4. Por último, se recomienda variar la disponibilidad de los diversos tipos de cascarilla de café y otros rangos de porcentaje de biocarbón en la mezcla, para encontrar el residuo orgánico que genere mejores propiedades

físicas y químico térmicas para elaborar briquetas. Este aprovechamiento, no solo reduce la dependencia de la leña y contribuye a la preservación del medio ambiente, sino que también puede mejorar la calidad de vida de las comunidades rurales al proporcionar una fuente de energía más accesible y económica.

IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS (ISO 690)

ALARCÓN SOLÓRZANO, Shirley Mireya, 2017. *Elaboración de briquetas a partir de desechos de tallos de rosas y papel reciclado*. [en línea]. Trabajo fin de grado. UCE: Universidad Central del Ecuador [consulta: noviembre de 2022]. Disponible en <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/13003>

Alvarez Risco, A. (2020). Antecedentes de Investigación. 1. Universidad de Lima.

<https://repositorio.ulima.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12724/10819/Nota%20Acad%C3%A9mica%203%20%2818.04.2021%29%20-%20Antecedentes%20de%20Investigaci%C3%B3n.pdf?sequence=1>

ANON, 2021. Mercado de biocarbón (materia prima: biomasa leñosa, desechos agrícolas, estiércol animal y otros; tecnología: pirólisis, gasificación y otros; y aplicación: generación de electricidad, agricultura, silvicultura y otros) - Análisis de la industria global, tamaño, participación, crecimiento, tendencias y pronóstico, 2021-2031. <https://www.transparencymarketresearch.com/biochar-market.html>

ASTM. Designation: D 3172. Standard Practice for Proximate Analysis of Coal and Coke. Annual Book of Standards. PA: ASTM. USA 2013

BASTIDAS BARRANCO, Marlon, MELO FREILE, Gelvis y TORRES, Daniela, 2019. Análisis Exergoambiental en Fuentes no Convencionales de Energía (Fnce): Caso Cascarilla De Café [en línea]. Colombia: RenovaT, vol. 2, 1, págs. 8-23 [consulta: julio de 2022]. ISSN. 2619-2896 Disponible en: <https://revistas.sena.edu.co/index.php/rnt/article/view/3487>.

Bioenergía y Seguridad Alimentaria Evaluación Rápida (BEFS RA) - Briquetas [en línea]. Roma: FAO, 2014. [fecha de consulta: 28 de julio de 2020]. Disponible en: <http://www.fao.org/publications/card/es/c/f186e885-81ac-471fb35e-09ba5ef87cc3/>

BONASSA, Gabriela et al. Scenarios and prospects of solid biofuel use in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [en línea]. 2018, 82, 2365–

2378 [consultado el 17 de mayo de 2023]. ISSN 1364-0321. Disponible en: doi:<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032117312200>

BU, Q. et al. Catalytic Microwave Pyrolysis of Lignocellulosic Biomass for Fuels and Chemicals. En: *Advances in Bioenergy* [en línea]. Elsevier, 2016, pp. 69–123 [consultado el 17 de mayo de 2023]. ISBN 9780128095225. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2468012516300025>.

Cafetaleros del Monzón exportarán más de 53 toneladas de café a Europa. *Andina.pe* [en línea], 2019. [consulta: 28 julio 2023]. Disponible en: <https://andina.pe/agencia/noticia-cafetaleros-del-monzon-exportaran-mas-53-toneladas-cafe-a-europa-762648.aspx>.

CARHUAVILCA BONETT, D., AGUILAR, AS, AGUILAR, JV, LAVERIANO, EJ, TORRES, A., CASTILLO, AD, FARFÁN, M., MEZONES, J., REYNA, D. Y CUSICUNA, F., 2021. *Gob.pe* [en línea]. [consulta: 28 julio 2023]. Disponible en: <https://m.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/boletines/09-informe-tecnico-panorama-economico-departamental-jul-2021.pdf>.

CHHABRA, BAMBERY K., BHATTACHARYA S., SHASTRI Y., Thermal and in situ infrared analysis to characterise the slow pyrolysis of mixed municipal solid waste (MSW) and its components, *Renewable Energy*, Volume 148,2020, p. 388-401 <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.10.045>

CORTÉS, Manuel E.; IGLESIAS LEÓN, Miriam. *Generalidades sobre Metodología de la Investigación*. Universidad Autónoma del Carmen, 2004.

DAHMAN, ET AL., 2019. 14 - Biofuels: Their characteristics and analysis. En VERMA, D., FORTUNATI, E., JAIN, S., ZHANG, X. *Biomass, Biopolymer-Based Materials, and Bioenergy*. 1° Edición. Canadá: Woodhead Publishing, pp. 277-325. ISBN. 978-0-08-102426-3. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B978008102426300014X>

DE LA CRUZ ITURBIDES, R., U. JAUREGUI HAZA y I. POLAERT. Recent technological innovations on continuous microwave assisted biomass pyrolysis and perspectives for industrial scale applications. *Bioresource Technology*

Reports [en línea]. 2022, 101202 [consultado el 17 de mayo de 2023]. ISSN 2589-014X. Disponible en:

Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127303>

ELKHALIFA, Samar et al. Food waste to biochars through pyrolysis: A review. *Resources, Conservation and Recycling* [en línea]. 2019, **144**, 310–320 [consultado el 17 de mayo de 2023]. ISSN 0921-3449. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344919300266>

EROL, M., HAYKIRI-ACMA, H y KÜÇÜKBAYRAK, S., 2010. Calorific value estimation of biomass from their proximate analyses data. *Renewable 105 Energy* [en línea]. Turquía: Elsevier, vol. 35, págs. 170-173 [consulta: julio de 2022]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.05.008>.

ESTEBAN NIETO, Nicomedes Teodoro, 2020. Tipos de Investigación. CORE [en línea]. EE. UU.: Repositorio Institucional - USDG [consulta: agosto de 2022]. Disponible en: <https://core.ac.uk/download/pdf/250080756.pdf>

FAO, 2004 Terminología Unificada sobre Bioenergía. *Terminología de los dendrocombustibles sólidos. Forestry Economics and Policy Division. Italia periodo DICIEMBRE 2004.*

FAO. (2023). *ANALISIS PROXIMALES*. Obtenido de <https://www.fao.org/3/ab489s/ab489s03.htm>

Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, <https://federaciondecafeteros.org/wp/estadisticas-cafeteras/>

FLORES AMPIE., Dorian Joel y RIVERA LOPEZ, Héctor Andrés, 2019. “*Propiedades energéticas de briquetas, a base de aserrín de pino durante la combustión, Estelí, Nicaragua periodo 2018-2019*” [en línea]. Trabajo de fin de grado. Nicaragua: Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua [consulta: Julio del 2023]. Disponible en: <https://repositorio.unan.edu.ni/11447/1/19945.pdf>

FLORES AMPIE., Dorian Joel y RIVERA LOPEZ, Héctor Andrés, 2019. “*Propiedades energéticas de briquetas, a base de aserrín de pino durante la combustión, Estelí, Nicaragua periodo 2018-2019*” [en línea]. Trabajo de fin de

grado. Nicaragua: Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua [consulta: Julio del 2023]. Disponible en: <https://repositorio.unan.edu.ni/11447/1/19945.pdf>

FONSECA CUENCA, Edison Geovanny y TIERRA TINGO, Luis Fernando, 2011. “*Desarrollo de un Proceso Tecnológico para la Obtención de Briquetas de Aserrín de Madera y Cascarilla de Arroz, y Pruebas de Producción de Gas Pobre*” [en línea]. Trabajo de fin de grado. Ecuador: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo [consulta: julio del 2023]. Disponible en: <http://dspace.espacech.edu.ec/handle/123456789/1883>

HEREDIA SALGADO, Mario A. et al. Potential for Farmers’ Cooperatives to Convert Coffee Husks into Biochar and Promote the Bioeconomy in the North Ecuadorian Amazon. *Applied Sciences* [en línea]. 2021, **11**(11), 4747 [consultado el 23 de julio de 2023]. ISSN 2076-3417. Disponible en: [doi:10.3390/app11114747](https://doi.org/10.3390/app11114747)

HERNÁNDEZ, Javier Darío Aristizábal, 2014. Validación y evaluación comparativa de la eficiencia de una estufa de leña mejorada bajo condiciones controladas y prueba de campo. En: *Dialnet* [en línea]. [consulta: noviembre de 2022].

Hitos de una agricultura sustentable en las Américas, por OTERO M. y LAL R., *Instituto Interamericano de Cooperación para la agricultura (IICA)*, p.16, 2022.

<https://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/351/1/avt0393.pdf>

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.282>

<https://doi.org/10.3906/tar-2101-7>

<https://www.mdpi.com/2071-1050/12/11/4609>

HU, Yulin, Amarjeet BASSI y Chunbao (Charles) XU. Energy From Biomass. En: *Future Energy* [en línea]. Elsevier, 2020, pp. 447–471 [consultado el 17 de mayo de 2023]. ISBN 9780081028865. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081028865000219>

HUAMAN RAMOS, Hermelinda; RAMIREZ SUCÑO, Mireya Marianela y SURICHAQUI UNCHUPAICO, Rossy Josselin, 2021. “*Diseño y elaboración de briquetas ecológicas para la obtención de energía calorífica con residuos agrícolas generados en Masma Chicche, Jauja - 2021*” [en línea]. Trabajo de fin de grado. Perú: Universidad Continental [consulta: julio del 2023]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.12394/10655>

KALIYAN, Nalladurai, VANCE MOREY, R, 2009. Factors affecting strength and durability of densified biomass products. *Biomass and Bioenergy* [en línea]. USA: Elsevier, vol. 33, págs. 337-359 [consulta: agosto de 2022]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2008.08.005>.

KPALO S., FAIZ M., MANAF L., MUHAIMIN A., 2020. A Review of Technical and Economic Aspects of Biomass Briquetting. *Sustainability*. p. 2. Disponible en:

LAGO, Carmen et al. Nexus Bioenergy–Bioeconomy. En: *The Role of Bioenergy in the Bioeconomy* [en línea]. Elsevier, 2019, pp. 3–24 [consultado el 17 de mayo de 2023]. ISBN 9780128130568. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813056-8.00001-7>

LIMOUSY, Lionel, Mejdi JEGUIRIM y Madona LABAKI. Energy applications of coffee processing by-products. En: *Handbook of Coffee Processing By-Products* [en línea]. Elsevier, 2017, pp. 323–367 [consultado el 17 de mayo de 2023]. ISBN 9780128112908. Disponible en: doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811290-8.00011-6>

LUBWAMA, Michael y YIGA, Vianney, 2017; Development of groundnut shells and bagasse briquettes as sustainable fuel sources for domestic cooking applications in Uganda. *Renewable Energy* [en línea]. Uganda: Elsevier, vol. 111, págs. 532-542 [consulta: agosto de 2022]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.04.041>.

LUNGULEASA A. AYRILMIS N., SOVA D., SPIRCHEZ C. Selected properties of briquettes made from blends of bamboo and beech biomass. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 2021

MANALS-CUTIÑO, Enma M.; SALAS-TORT, Dolores; PENEDO-MEDINA, Margarita. 2018. Caracterización de la biomasa vegetal cascarilla de café. *Tecnología Química* [en línea]. Cuba: Scielo, vol. 38, no 1, p. 169-181 [consulta: diciembre de 2022]. ISSN 2224-6185

MANUAL DE METODOLOGÍA: Construcción del marco teórico, formulación de los objetivos y elección de la metodología. Buenos Aires: CLACSO, 2005. ISBN 9871183321.

MARTINEZ, 2016 “Densificación y Torrefacción de biomasa de Chumbera (Opuntia SPP.) y Jara (Cistus SPP.)” [en línea]. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.

MISHRA, Radha Raman y Apurbba Kumar SHARMA. Microwave–material interaction phenomena: Heating mechanisms, challenges, and opportunities in material processing. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* [en línea]. 2016, 81, 78–97 [consultado el 17 de mayo de 2023]. ISSN 1359-835X. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.10.035>

MONTENEGRO Santillan, Yesica, 2022. “Evaluación del poder calorífico de briquetas de biochar obtenido a partir de residuos orgánicos” [en línea]. Trabajo de fin de grado. Perú: Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas [consulta: julio del 2023]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.14077/2963>

NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC 2060 1987-11-04 Briquetas Combustibles Para Uso Doméstico

ÑAUPAS, H., MEHÍA, E., NOVOA, E., & VILLAGÓMEZ, A. (2014). Metodología de la Investigación Cuantitativa-Cualitativa y Redacción de la Tesis (Ediciones de la U (ed.); 4 Edición).

ONI, Babalola Aisosa, Olubukola OZIEGBE y Obembe O. OLAWOLE. Significance of biochar application to the environment and economy. *Annals of Agricultural Sciences* [en línea]. 2019, 64(2), 222–236 [consultado el 17 de mayo de 2023]. ISSN 0570-1783. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.aos.2019.12.006>

PAREDES, Jean et al. Characterization of Two Lignocellulosic Biomasses Coffea Arabica L. for the production of Biochar. En: 20th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology: “Education, Research and Leadership in Post-pandemic Engineering: Resilient, Inclusive and Sustainable Actions” [en línea]. Latin American and Caribbean Consortium of Engineering Institutions, 2022 [consultado el 23 de julio de 2023]. Disponible en: doi:10.18687/laccei2022.1.1.344

PÉREZ SÁNCHEZ., Melissa Andrea y TORPOCO CANO, Evelyn Steffany, 2022. “Evaluación de la calidad de briquetas como biocombustible sólido, elaborados a partir del residuo de cascarilla de café en el Valle del Monzón” [en línea]. Trabajo de fin de grado. Perú: Universidad Nacional del Callao [consulta: febrero del 2023]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/20.500.12952/7378>

PÉREZ, Ángel., Serret, Nurian., Penedo, Margarita., (2022) Biomass characterization of pine sawdust [en línea]. Tecnología Química, 2022, Vol. 42. Disponible en: <http://scielo.sld.cu/pdf/rtq/v42n3/2224-6185-rtq-42-03-558.pdf>

POTNURI, Ramesh et al. Understanding the role of modeling and simulation in pyrolysis of biomass and waste plastics: A review. *Bioresource Technology Reports* [en línea]. 2022, 101221 [consultado el 17 de mayo de 2023]. ISSN 2589-014X. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2589014X2200278X>

PRATIWI, VIBIANTI DWI. Effect of Burning Temperature on The Quality of Alternatife Bio-energy from Coffee Waste. ELKOMIKA: Jurnal Teknik Energi Elektrik, Teknik Telekomunikasi, & Teknik Elektronika [en línea]. 2020, **8**(3), 615 [consultado el 23 de julio de 2023]. ISSN 2459-9638. Disponible en: doi:10.26760/elkomika.v8i3.615

PRÉSIGA-LÓPEZ, Deiby, Ainhoa RUBIO-CLEMENTE y Juan F. PÉREZ. Uso del biocarbón como material alternativo para el tratamiento de aguas residuales contaminadas. Revista UIS Ingenierías [en línea]. 2020, **20**(1), 121–134 [consultado el 23 de julio de 2023]. ISSN 2145-8456. Disponible en: doi:10.18273/revuin.v20n1-2021011

RAJU, CH A. I. et al. Studies on densification and conversion of wastes as fuel briquettes for power generation. *Materials Today: Proceedings* [en línea]. 2021, 44, 1090–1107 [consultado el 17 de mayo de 2023]. ISSN 2214-7853. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.184>

REVERTE ORS, Juan David. *Diseño e implementación de un sistema de esterilización y secado de sandach con tecnología multimodo de microondas y su transferencia a la industria pecuaria*. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cartagena, 2020.

RODRIGUEZ N., ZAMBRANO DIEGO, 2010. Los subproductos del café: Fuente de energía renovable. *Avance técnico Cenicafé*. p.2. Disponible en:

ROJAS GONZALEZ, Andres Felipe y Ciliana FLÓREZ MONTES. Valorización de residuos de frutas para combustión y pirólisis. *Revista Politécnica* [en línea]. 2019, 15(28), 42–53 [consultado el 16 de julio de 2023]. ISSN 2256-5353. Disponible en: [doi:10.33571/rpolitec.v15n28a4](https://doi.org/10.33571/rpolitec.v15n28a4)

ROJAS-GONZALEZ, Andrés Felipe; FLOREZ-MONTES, Ciliana y LOPEZ-RODRIGUEZ, Diego Fernando. Prospectivas de aprovechamiento de algunos residuos agroindustriales. *Rev Cub Quim* [online]. 2019, vol.31, n.1 [citado 2023-07-16], pp.31-52. Disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-54212019000100031&lng=es&nrm=iso. ISSN 2224-5421.

SALEMA, Arshad Adam, AFZALB, Muhammad T. y BENNAMOUN, Lyes, 2017. Pyrolysis of corn stalk biomass briquettes in a scaled-up microwave technology. *Bioresource Technology* [en línea]. Elsevier, vol. 233, pp. 353-362. ISSN 0960-8524. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852417302420>

SCAI. (2023). *Análisis Elemental y Térmico*. Obtenido de <https://www.scai.uma.es/areas/aqcm/AEL/ael.html>

SETTER, C. y T. J. P. OLIVEIRA. Evaluation of the physical-mechanical and energy properties of coffee husk briquettes with kraft lignin during slow pyrolysis.

Renewable Energy [en línea]. 2022, 189, 1007–1019 [consultado el 17 de mayo de 2023]. ISSN 0960-1481. Disponible en: doi:10.1016/j.renene.2022.03.077

SETTER, C. et al. Energy quality of pellets produced from coffee residue: Characterization of the products obtained via slow pyrolysis. *Industrial Crops and Products* [en línea]. 2020, **154**, 112731 [consultado el 23 de julio de 2023]. ISSN 0926-6690. Disponible en: doi:10.1016/j.indcrop.2020.112731

SINDHU, Raveendran et al. Conversion of food and kitchen waste to value-added products. *Journal of Environmental Management* [en línea]. 2019, **241**, 619–630. ISSN 0301-4797. Disponible en: doi:10.1016/j.jenvman.2019.02.053

SURIAPPARAO, Dadi V. y Ravi TEJASVI. A Review on Role of Process Parameters on Pyrolysis of Biomass and Plastics: Present Scope and Future Opportunities in Conventional and Microwave-Assisted Pyrolysis Technologies. *Process Safety and Environmental Protection* [en línea]. 2022 [consultado el 17 de mayo de 2023]. ISSN 0957-5820. Disponible en: doi:10.1016/j.psep.2022.04.024

SURIAPPARAO, Dadi V., Hemanth Kumar TANNERU y Busigari Rajasekhar REDDY. 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* [en línea]. 2022, 114378 [consultado el 17 de mayo de 2023]. ISSN 0013-9351. Disponible en: doi:10.1016/j.envres.2022.114378

TESFAYE, Assefa, Fentahun WORKIE y Venkatesh S. KUMAR. Production and Characterization of Coffee Husk Fuel Briquettes as an Alternative Energy Source. *Advances in Materials Science and Engineering* [en línea]. 2022, 2022, 1–13 [consultado el 23 de julio de 2023]. ISSN 1687-8442. Disponible en: doi:10.1155/2022/9139766

TODARO, Luigi, et al., 2015; Thermal treatment modifies the calorific value and ash content in some wood species. *Fuel* [en línea]. Italia: Elsevier, vol. 140, págs. 1-3 [consulta: agosto de 2022]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.09.060>.

VARGAS-MORENO, J. M. et al. A review of the mathematical models for predicting the heating value of biomass materials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [en línea]. 2012, 16(5), 3065–3083 [consultado el 5 de julio de 2023]. ISSN 1364-0321. Disponible en: doi:10.1016/j.rser.2012.02.054

VISHAL H. et al. Biochar production with amelioration of microwave-assisted pyrolysis: Current scenario, drawbacks and perspectives. *Bioresource technology*. 2022. P.7

WANG, Jianlong y Shizong WANG. Preparation, modification, and environmental application of biochar: A review. *Journal of Cleaner Production* [en línea]. 2019, 227, 1002–1022 [consultado el 17 de mayo de 2023]. ISSN 0959-6526. Disponible en:

WONGSIRIAMNUAY, Thanasit y Nakorn TIPPAYAWONG. Effect of densification parameters on the properties of maize residue pellets. *Biosystems Engineering* [en línea]. 2015, 139, 111–120 [consultado el 17 de mayo de 2023]. ISSN 1537-5110. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1537511015001506>

X. ANEXOS

Anexo 1.

Matriz de Consistencia

PREGUNTA GENERAL	OBJETIVO GENERAL	HIPÓTESIS GENERAL	OPERACIONALIZACIÓN DE LA VARIABLE					
			Variable	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones	Indicador	Técnicas, instrumentos
¿De qué manera el biocarbón de cascarilla de café generado por pirólisis asistida por microondas permite obtener briquetas a nivel laboratorio, 2023?	Elaborar biocarbón de cascarilla de café generado por pirólisis asistida por microondas para obtener briquetas a nivel laboratorio, 2023.	El biocarbón de cascarilla de café generado por pirólisis asistida por microondas permite obtener briquetas a nivel de laboratorio, 2023.	Biocarbón	El biocarbón es el producto procedente de la descomposición de la biomasa a través de procesos termoquímicos con poca o nula presencia de oxígeno(O), algunos de ellos conocidos como pirólisis. (Escalante et al.,2016)	El biocarbón puede presentar diferentes propiedades físicas y químicas en función de las características de la biomasa utilizada y las condiciones de operación empleadas en su producción.	Biomasa	Carbono Hidrógeno Nitrógeno oxígeno Azufre Humedad Materias volátiles Cenizas Poder calorífico inferior y superior	Técnicas termogravimétricas: C, H, N: según ASTM D5373/ Mét. A S: ASTM D4239 O: ASTM D7582 Instrumento: Muffa, balanza analítica Humedad, según ASTM D7582 Materias volátiles, según ASTM D7582 Cenizas, según ASTM D7582 Poder calorífico, según ASTM D5865
						Condición de Operación	Temperatura de reacción	Técnica: Sensibilidad de temperatura de la diferencia de potencial Instrumento: Termocupla

Susceptor o absorbente

Técnica: Observacional
Instrumento: Balanza analítica

PREGUNTAS ESPECÍFICAS	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	HIPÓTESIS ESPECÍFICAS				
¿Cuáles son las propiedades físicas y químico-térmicas del biocarbón de cascarilla de café a nivel laboratorio, 2023?	Determinar las propiedades físicas y químico-térmicas del biocarbón de cascarilla de café a nivel de laboratorio, 2023	La propiedades físicas y químico - térmicas del biocarbón de cascarilla de café presentan mejoras en comparación con la biomasa original.				
¿Cuáles son las condiciones de operación del proceso de pirolisis asistida por microondas que influyen en la mejora del rendimiento del biocarbón de cascarilla de café a nivel laboratorio, 2023?	Determinar las condiciones de operación del proceso de pirolisis asistida por microondas que influyen en la mejora del rendimiento del biocarbón de cascarilla de café a nivel laboratorio, 2023.	Las condiciones de operación del proceso de pirolisis asistida por microondas influyen en la mejora del rendimiento del biocarbón de cascarilla de café a nivel laboratorio, 2023.	Briquetas	Las briquetas son biocombustibles sólidos que se obtienen a partir de la densificación de un material lignocelulósico u otros materiales; bajo la aplicación de temperatura y presión provocan la auto aglomeración de las partículas, teniendo un mayor uso en la generación de calor o producción de energía, como sustituto de la leña y carbón en estufas, chimeneas, hornos, calderas y gasificadores. La forma que adquieren puede ser rectangulares, cilíndricas o hexagonales. Una de sus principales características es su alta densidad. (Fonseca y Tierra, 2011)	Las briquetas pueden ser caracterizadas en base a sus propiedades físicas (contenido de humedad y densidad aparente) y químico-térmicas (poder calorífico, contenido de ceniza, contenido de volátiles y carbono fijo), las mismas que serán medidas a través de técnicas termogravimétricas y calculadas según fórmulas.	Propiedades Físicas
¿Cuál es el porcentaje de biocarbón en la mezcla que mejora las propiedades físicas y químico-térmicas de las briquetas a nivel de laboratorio, 2023?	Determinar el porcentaje de biocarbón en la mezcla que mejora las propiedades físicas y químico - térmicas de las briquetas a nivel laboratorio, 2023.	A mayor porcentaje de biocarbón en la mezcla se mejora las propiedades físicas y químico - térmicas de las briquetas a nivel laboratorio, 2023.				
						Contenido de humedad
						Densidad aparente
						Poder calorífico
						Contenido de ceniza
						Contenido de volátiles
						Carbono fijo
						Propiedades Químico-Térmicas

Técnica: ASTM D7582
Instrumento: Estufa, balanza analítica

Técnica: Método gravimétrico
Instrumento: balanza analítica

Técnica: ASTM D5865-13
Instrumento: Estufa, balanza analítica

Técnica: ASTM D7582.
Instrumento: Estufa, balanza analítica

Técnica: ASTM D7582
Instrumento: Estufa, balanza analítica

Técnica: Documental
Ficha de recolección de datos

Anexo 2: Carta de autorización de la Empresa Aroma del Monzón

Huánuco, 10 de mayo de 2023

AROMAS DE MONZÓN S.A.C

Gerente General
Milagros Baylon Mallqui
Otr.Manzana Mza. 1CP. Monzón – Monzón -Huánuco

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

Por medio de la presente,

Yo, Milagros Baylon Mallqui identificado con DNI N° 71561429, Gerente General de la empresa Aromas de Monzón S.A.C. con RUC N° 20607027855, autorizo a las Bachilleres Mercedes Camila Rivas Curisinche, Emmy Josselin Vicente Herrera y Katherine Kelly Toscaino Casas el uso de cascarilla de café como materia prima para la elaboración de la parte experimental en su informe de Tesis Titulado ***"BIOCARBÓN DE CASCARILLA DE CAFÉ GENERADO POR PIRÓLISIS ASISTIDA POR MICROONDAS PARA OBTENER BRIQUETAS A NIVEL LABORATORIO 2023"***.

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

Sin otro en particular, me despido de usted.


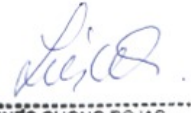

Atentamente.






Milagros Baylon Mallqui
Gerente General
AROMAS DE MONZÓN S.A.C.

Anexo 3: Fichas de recolección de datos




Ficha 1

Título	BIOCARBÓN DE CASCARILLA DE CAFÉ GENERADO POR PIROLISIS ASISTIDA POR MICROONDAS PARA OBTENER BRIQUETAS A NIVEL LABORATORIO, 2023		
Características fisicoquímicas de la cascarilla de café en función a su análisis proximal, análisis elemental y contenido energético.			
Línea de investigación	Ingeniería y Tecnología		
Escuela	Ingeniería Ambiental y RRNN		
Autor	Bach. Rivas Curisínche Mercedes Camila Bach. Toscaíno Casas Katherine Kelly Bach. Vicente Herrera Emmy Josselin		
Asesor	Mtro. Abner Vigo Roldán		
Fecha	23/05/2023	Hora	5:30 p. m.
DATOS DE RECOLECCIÓN			
Parámetros	R1		
ANÁLISIS ELEMENTAL			
	SI	NO	
Carbono	x		
Hidrógeno	x		
Nitrógeno	x		
Azufre	x		
Oxígeno	x		
ANÁLISIS PROXIMAL (TERMOGRAVIMÉTRICO)			
Humedad	x		
Material Volátil	x		
Ceniza	x		
Carbono fijo	x		
ANÁLISIS DE CONTENIDO ENERGÉTICO			
Poder Calórico Inferior (PCI)	x		
Poder Calórico Superior (PCS)	x		
	 ----- INÉS CHONG ROJAS INGENIERA AMBIENTAL Reg. CIP Nº 180685		
Nombres y apellidos: Lizbeth Gayoso Rubin CIP: 120282 Especialidad: Ing. Ambiental Especialista 1	Nombres y apellidos: Chong Rojas Inés CIP: 180685 Especialidad: Ing. Ambiental Especialista 2	Nombres y apellidos: Richard Huapaya Pardavé CIP: 116212 Especialidad: Ing. Ambiental Especialista 3	




Ficha 2

Titulo		BIOCARBÓN DE CASCARILLA DE CAFÉ GENERADO POR PIROLISIS ASISTIDA POR MICROONDAS PARA OBTENER BRIQUETAS A NIVEL LABORATORIO, 2023	
Evaluación de las condiciones del proceso (potencia, temperatura y suceptor) que mejoran el rendimiento del Biocarbón			
Línea de investigación		Ingeniería y Tecnología	
Escuela		Ingeniería Ambiental y RRNN	
Autor		Bach. Rivas Curisinoche Mercedes Camila Bach. Toscaino Casas Katherine Kelly Bach. Vicente Herrera Emmy Josselin	
Asesor		Mtro. Abner Vigo Roldán	
Fecha		23/05/2023	Hora 5:30 p. m.
DATOS DE RECOLECCIÓN			
RENDIMIENTO			
Corridos (Condiciones de Operación)		SI	NO
T1: ¼suceptor	Tipo de Suceptor	Rendimiento en T1	x
T2: ¼suceptor	Tipo de Suceptor	Rendimiento en T2	x
T3: ¼suceptor	Tipo de Suceptor	Rendimiento en T3	x
T4: ¼suceptor	Tipo de Suceptor	Rendimiento en T4	x
T5: ¼suceptor	Tipo de Suceptor	Rendimiento en T5	x
T6: ¼suceptor	Tipo de Suceptor	Rendimiento en T6	x
T7: ¼suceptor	Tipo de Suceptor	Rendimiento en T7	x
T8: ¼suceptor	Tipo de Suceptor	Rendimiento en T8	x
T9: ¼suceptor	Tipo de Suceptor	Rendimiento en T9	x
T10: ¼suceptor	Tipo de Suceptor	Rendimiento en T10	x
T11: ¼suceptor	Tipo de Suceptor	Rendimiento en T11	x
T12: ¼suceptor	Tipo de Suceptor	Rendimiento en T12	x
T13: ¼suceptor	Tipo de Suceptor	Rendimiento en T13	x
T14: ¼suceptor	Tipo de Suceptor	Rendimiento en T14	x
T15: ¼suceptor	Tipo de Suceptor	Rendimiento en T15	x
T16: ¼suceptor	Tipo de Suceptor	Rendimiento en T16	x
T17: ¼suceptor	Tipo de Suceptor	Rendimiento en T17	x
T18: ¼suceptor	Tipo de Suceptor	Rendimiento en T18	x
T19: ¼suceptor	Tipo de Suceptor	Rendimiento en T19	x
T20: ¼suceptor	Tipo de Suceptor	Rendimiento en T20	x
T21: ¼suceptor	Tipo de Suceptor	Rendimiento en T21	x
T22: ¼suceptor	Tipo de Suceptor	Rendimiento en T22	x
T23: ¼suceptor	Tipo de Suceptor	Rendimiento en T23	x
T24: ¼suceptor	Tipo de Suceptor	Rendimiento en T24	x
T25: ¼suceptor	Tipo de Suceptor	Rendimiento en T25	x
T26: ¼suceptor	Tipo de Suceptor	Rendimiento en T26	x
		 ----- INÉS CHONG ROJAS INGENIERA AMBIENTAL Reg. CIP Nº 180685	
Nombres y apellidos: Lizbeth Gayoso Rubin CIP: 120282 Especialidad: Ing. Ambiental Especialista 1		Nombres y apellidos: Chong Rojas Inés CIP: 180685 Especialidad: Ing. Ambiental Especialista 2	Nombres y apellidos: Richard Huapaya Pardavé CIP: 116212 Especialidad: Especialista 3

Ficha 3

Titulo	BIOCARBÓN DE CASCARILLA DE CAFÉ GENERADO POR PIROLISIS ASISTIDA POR MICROONDAS PARA OBTENER BRIQUETAS A NIVEL LABORATORIO, 2023		
Características fisicoquímicas de biocarbón en función a su análisis proximal, análisis elemental y contenido energético.			
Línea de investigación	Ingeniería y Tecnología		
Escuela	Ingeniería Ambiental y RRNN		
Autor	Bach. Rivas Curisinche Mercedes Camila Bach.Toscaino Casas Katherine Kelly Bach.Vicente Herrera Emmy Josselin		
Asesor	Mtro. Abner Vigo Roldán		
Fecha	23/05/2023	Hora	5:30 p. m.
DATOS DE RECOLECCIÓN			
Parámetros	R1		
ANÁLISIS ELEMENTAL			
	SI	NO	
Carbono	x		
Hidrógeno	x		
Nitrógeno	x		
Azufre	x		
Oxígeno	x		
ANÁLISIS PROXIMAL (TERMOGRAVIMÉTRICO)			
Humedad	x		
Material Volátil	x		
Ceniza	x		
Carbono fijo	x		
ANÁLISIS DE CONTENIDO ENERGÉTICO			
Poder Calórico Inferior (PCI)	x		
Poder Calórico Superior (PCS)	x		
			
Nombres y apellidos: Lizbeth Gayoso Rubin CIP:120282 Especialidad: Ing. Ambiental Especialista 1	Nombres y apellidos: Chong Rojas Inés CIP: 180685 Especialidad: Ing. Ambiental Especialista 2	Nombres y apellidos: Richard Huapaya Pardavé CIP: 116212 Especialidad: Ing. Ambiental Especialista 3	

Ficha 4

Título	BIOCARBÓN DE CASCARILLA DE CAFÉ GENERADO POR PIROLISIS ASISTIDA POR MICROONDAS PARA OBTENER BRIQUETAS A NIVEL LABORATORIO, 2023											
Caracterización de las Briquetas												
Línea de investigación	Ingeniería y Tecnología											
Escuela	Ingeniería Ambiental y RRNN											
Autor	Bach. Rivas Curisínche Mercedes Camila Bach. Toscaïno Casas Katherine Kelly Bach. Vicente Herrera Emmy Josselin											
Asesor	Mtro. Abner Vigo Roldán											
Fecha	23/05/2023									Hora	17:30:00	
DATOS DE RECOLECCIÓN												
Parámetros	Proporción 1 de aglutinante 50% y Biocarbon 50%						Proporción 2 de aglutinante 30% y Biocarbon 70%					
Replicas	R1		R2		R3		R1		R2		R3	
ANÁLISIS PROXIMAL (TERMOGRAVIMÉTRICO)												
	SI	NO	SI	NO	SI	NO	SI	NO	SI	NO	SI	NO
Humedad	x		x		x		x		x		x	
Material Volátil	x		x		x		x		x		x	
Ceniza	x		x		x		x		x		x	
Carbono fijo	x		x		x		x		x		x	
Densidad Aparente	x		x		x		x		x		x	
ANÁLISIS DE CONTENIDO ENERGÉTICO												
	SI						NO					
Poder Calórico Inferior (PCI)	x											
Poder Calórico Superior (PCS)	x											
				 INÉS CHONG ROJAS INGENIERA AMBIENTAL Reg. CIP Nº 180685								
Nombres y apellidos: Lizbeth Gayoso Rubin				Nombres y apellidos: Chong Rojas Inés						Nombres y apellidos: Richard Huapaya Pardavé		
CIP:120282				CIP: 180685						CIP: 116212		
Especialidad: Ing. Ambiental				Especialidad: Ing. Ambiental						Especialidad:		
Especialista 1				Especialista 2						Especialista 3		

Anexo 4: Validación de instrumentos

Especialista 1

INFORME DE JUICIO DE EXPERTO DEL INSTRUMENTO DE MEDICIÓN

I. DATOS GENERALES

Apellidos y nombres experto: Lizbeth Gayoso Rubin.
Institución donde labora: Consorcio Vial Tintay.
Instrumento de evaluación: Instrumento para evaluar las condiciones del proceso (potencia, temperatura y suceptor) que mejoran en rendimiento del Biocarbón.
Autor del instrumento: Bachilleres Rivas Curisinche Mercedes Camila, Toscaino Casas Katherine Kelly y Vicente Herrera Emmy Josselin.

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.					95
2. Objetividad	Está expresado en conductas observables.					96
3. Actualidad	Adecuado al avance de la ciencia y la tecnología.					100
4. Organización	Existe una organización lógica entre variables e indicadores.					95
5. Suficiencia	Comprende los aspectos en calidad y cantidad.					98
6. Intencionalidad	Adecuado para valorar aspectos de la inteligencia emocional.					95
7. Consistencia	Consistencia entre la formulación de problema, objetivos e hipótesis.					98
8. Coherencia	De indicadores y dimensiones.					96
9. Metodología	La estrategia responde al propósito de la investigación.					100

III. OPCIÓN DE APLICABILIDAD

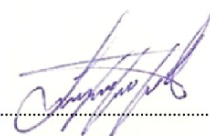
El instrumento cumple con los requisitos para su evaluación

IV. PROMEDIO DE VALORACIÓN

Promedio: 97

Lugar y fecha: Lima, 16 de mayo de 2023

N° DNI: 42966692



Ing. Ambiental
CIP: 120282

**INFORME DE JUICIO DE EXPERTO DEL
INSTRUMENTO DE MEDICIÓN**

I. DATOS GENERALES

Apellidos y nombres experto: Lizbeth Gayoso Rubin.
Institución donde labora: Consorcio Vial Tintay.
Instrumento de evaluación: Instrumento para evaluar las características fisicoquímicas del biocarbón en función a su análisis proximal, análisis elemental y potencial energético.
Autor del instrumento: Bachilleres Rivas Curisínche Mercedes Camila, Toscaino Casas Katherine Kelly y Vicente Herrera Emmy Josselin.

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.					95
2. Objetividad	Está expresado en conductas observables.					96
3. Actualidad	Adecuado al avance de la ciencia y la tecnología.					96
4. Organización	Existe una organización lógica entre variables e indicadores.					95
5. Suficiencia	Comprende los aspectos en calidad y cantidad.					98
6. Intencionalidad	Adecuado para valorar aspectos de la inteligencia emocional.					95
7. Consistencia	Consistencia entre la formulación de problema, objetivos e hipótesis.					95
8. Coherencia	De indicadores y dimensiones.					96
9. Metodología	La estrategia responde al propósito de la investigación.					100

III. OPCIÓN DE APLICABILIDAD

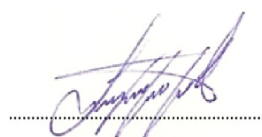
El instrumento cumple con los requisitos para su evaluación

IV. PROMEDIO DE VALORACIÓN

Promedio: 96

Lugar y fecha: Lima, 16 de mayo de 2023

N° DNI: 42966692



Ing. Ambiental
CIP: 120282

**INFORME DE JUICIO DE EXPERTO DEL
INSTRUMENTO DE MEDICIÓN**

I. DATOS GENERALES

Apellidos y nombres experto: Lizbeth Gayoso Rubin.
Institución donde labora: Consorcio Vial Tintay.
Instrumento de evaluación: Instrumento para evaluar las características de las briquetas.
Autor del instrumento: Bachilleres Rivas Curisinche Mercedes Camila, Toscaino Casas Katherine Kelly y Vicente Herrera Emmy Josselin.

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.					98
2. Objetividad	Está expresado en conductas observables.					98
3. Actualidad	Adecuado al avance de la ciencia y la tecnología.					98
4. Organización	Existe una organización lógica entre variables e indicadores.					97
5. Suficiencia	Comprende los aspectos en calidad y cantidad.					98
6. Intencionalidad	Adecuado para valorar aspectos de la inteligencia emocional.					97
7. Consistencia	Consistencia entre la formulación de problema, objetivos e hipótesis.					98
8. Coherencia	De indicadores y dimensiones.					98
9. Metodología	La estrategia responde al propósito de la investigación.					100

III. OPCIÓN DE APLICABILIDAD

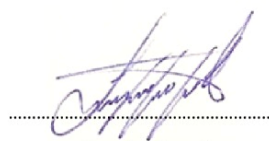
El instrumento cumple con los requisitos para su evaluación

IV. PROMEDIO DE VALORACIÓN

Promedio: 98

Lugar y fecha: Lima, 23 de mayo de 2023

N° DNI:42966692



Ing. Ambiental
CIP:120282

Especialista 2

INFORME DE JUICIO DE EXPERTO DEL INSTRUMENTO DE MEDICIÓN

I. DATOS GENERALES

Apellidos y nombres experto: Chong Rojas Inés.

Institución donde labora: Consorcio Puente Chorunga.

Instrumento de evaluación: Instrumento para evaluar las características fisicoquímicas del biocarbón en función a su análisis proximal, análisis elemental y potencial energético.

Autor del instrumento: Bachilleres Rivas Curisinche Mercedes Camila, Toscaino Casas Katherine Kelly y Vicente Herrera Emmy Josselin.

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.					98
2. Objetividad	Está expresado en conductas observables.					95
3. Actualidad	Adecuado al avance de la ciencia y la tecnología.					97
4. Organización	Existe una organización lógica entre variables e indicadores.					95
5. Suficiencia	Comprende los aspectos en calidad y cantidad.					98
6. Intencionalidad	Adecuado para valorar aspectos de la inteligencia emocional.					95
7. Consistencia	Consistencia entre la formulación de problema, objetivos e hipótesis.					95
8. Coherencia	De indicadores y dimensiones.					95
9. Metodología	La estrategia responde al propósito de la investigación.					96

III. OPCIÓN DE APLICABILIDAD

El instrumento cumple con los requisitos para su evaluación

IV. PROMEDIO DE VALORACIÓN

Promedio: 96

Lugar y fecha: Lima, 16 de mayo de 2023

N° DNI: 42009438



Ing. Ambiental
CIP: 180685

**INFORME DE JUICIO DE EXPERTO DEL
INSTRUMENTO DE MEDICIÓN**

I. DATOS GENERALES

Apellidos y nombres experto: Chong Rojas Inés.
Institución donde labora: Consorcio Puente Chorunga.
Instrumento de evaluación: Instrumento para evaluar las condiciones del proceso (potencia, temperatura y suceptor) que mejoran en rendimiento del Biocarbón.
Autor del instrumento: Bachilleres Rivas Curisinche Mercedes Camila, Toscaino Casas Katherine Kelly y Vicente Herrera Emmy Josselin

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.					100
2. Objetividad	Está expresado en conductas observables.					95
3. Actualidad	Adecuado al avance de la ciencia y la tecnología.					100
4. Organización	Existe una organización lógica entre variables e indicadores.					98
5. Suficiencia	Comprende los aspectos en calidad y cantidad.					98
6. Intencionalidad	Adecuado para valorar aspectos de la inteligencia emocional.					95
7. Consistencia	Consistencia entre la formulación de problema, objetivos e hipótesis.					95
8. Coherencia	De indicadores y dimensiones.					95
9. Metodología	La estrategia responde al propósito de la investigación.					100

III. OPCIÓN DE APLICABILIDAD

El instrumento cumple con los requisitos para su evaluación

IV. PROMEDIO DE VALORACIÓN

Promedio: 97

Lugar y fecha: Lima, 16 de mayo de 2023

N° DNI: 42009438



Ing. Ambiental
CIP: 180685

**INFORME DE JUICIO DE EXPERTO DEL
INSTRUMENTO DE MEDICIÓN**

I. DATOS GENERALES

Apellidos y nombres experto: Chong Rojas Inés.

Institución donde labora: Consorcio Puente Chorunga.

Instrumento de evaluación: Instrumento para evaluar las características de las briquetas.

Autor del instrumento: Bachilleres Rivas Curisinche Mercedes Camila, Toscaino Casas Katherine Kelly y Vicente Herrera Emmy Josselin

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.					100
2. Objetividad	Está expresado en conductas observables.					98
3. Actualidad	Adecuado al avance de la ciencia y la tecnología.					100
4. Organización	Existe una organización lógica entre variables e indicadores.					98
5. Suficiencia	Comprende los aspectos en calidad y cantidad.					98
6. Intencionalidad	Adecuado para valorar aspectos de la inteligencia emocional.					98
7. Consistencia	Consistencia entre la formulación de problema, objetivos e hipótesis.					98
8. Coherencia	De indicadores y dimensiones.					98
9. Metodología	La estrategia responde al propósito de la investigación.					100

III. OPCIÓN DE APLICABILIDAD

El instrumento cumple con los requisitos para su evaluación

IV. PROMEDIO DE VALORACIÓN

Promedio: 99

Lugar y fecha: Lima, 23 de mayo de 2023

N° DNI:42009438



Ing. Ambiental
CIP:180685

Especialista 3

INFORME DE JUICIO DE EXPERTO DEL INSTRUMENTO DE MEDICIÓN

I. DATOS GENERALES

Apellidos y nombres experto: Richard Huapaya Pardavé
Institución donde labora: Universidad Nacional del Callao
Instrumento de evaluación: Instrumento para evaluar las características fisicoquímicas del biocarbón en función a su análisis proximal, análisis elemental y potencial energético.
Autor del instrumento: Bachilleres Rivas Curisynche Mercedes Camila, Toscaino Casas Katherine Kelly y Vicente Herrera Emmy Josselin.

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.					100
2. Objetividad	Está expresado en conductas observables.					96
3. Actualidad	Adecuado al avance de la ciencia y la tecnología.					98
4. Organización	Existe una organización lógica entre variables e indicadores.					96
5. Suficiencia	Comprende los aspectos en calidad y cantidad.					98
6. Intencionalidad	Adecuado para valorar aspectos de la inteligencia emocional.					97
7. Consistencia	Consistencia entre la formulación de problema, objetivos e hipótesis.					100
8. Coherencia	De indicadores y dimensiones.					97
9. Metodología	La estrategia responde al propósito de la investigación.					100

III. OPCIÓN DE APLICABILIDAD

El instrumento cumple con los requisitos para su evaluación

IV. PROMEDIO DE VALORACIÓN

Promedio: 98

Lugar y fecha: Lima, 25 de mayo de 2023

N° DNI: 44127158

.....
Ing. Ambiental y de RR.NN
CIP: 116212

**INFORME DE JUICIO DE EXPERTO DEL
INSTRUMENTO DE MEDICIÓN**

I. DATOS GENERALES

Apellidos y nombres experto: Richard Huapaya Pardavé
Institución donde labora: Universidad Nacional del Callao
Instrumento de evaluación: Instrumento para evaluar las condiciones de operación (potencia, temperatura y susceptor) que mejoran el rendimiento del Biocarbón.
Autor del instrumento: Bachilleres Rivas Curisinche Mercedes Camila, Toscaino Casas Katherine Kelly y Vicente Herrera Emmy Josselin.

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.					100
2. Objetividad	Está expresado en conductas observables.					96
3. Actualidad	Adecuado al avance de la ciencia y la tecnología.					100
4. Organización	Existe una organización lógica entre variables e indicadores.					98
5. Suficiencia	Comprende los aspectos en calidad y cantidad.					98
6. Intencionalidad	Adecuado para valorar aspectos de la inteligencia emocional.					96
7. Consistencia	Consistencia entre la formulación de problema, objetivos e hipótesis.					97
8. Coherencia	De indicadores y dimensiones.					97
9. Metodología	La estrategia responde al propósito de la investigación.					100

III. OPCIÓN DE APLICABILIDAD

El instrumento cumple con los requisitos para su evaluación

IV. PROMEDIO DE VALORACIÓN

Promedio: 97

Lugar y fecha: Lima, 25 de mayo de 2023
N° DNI: 44127158



.....
Ing. Ambiental y de RR.NN
CIP: 116212

**INFORME DE JUICIO DE EXPERTO DEL
INSTRUMENTO DE MEDICIÓN**

I. DATOS GENERALES

Apellidos y nombres experto: Richard Huapaya Pardavé
Institución donde labora: Universidad Nacional del Callao
Instrumento de evaluación: Instrumento para evaluar las características de las briquetas.
Autor del instrumento: Bachilleres Rivas Curisínche Mercedes Camila, Toscaino Casas Katherine Kelly y Vicente Herrera Emmy Josselin.

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.					100
2. Objetividad	Está expresado en conductas observables.					96
3. Actualidad	Adecuado al avance de la ciencia y la tecnología.					100
4. Organización	Existe una organización lógica entre variables e indicadores.					96
5. Suficiencia	Comprende los aspectos en calidad y cantidad.					98
6. Intencionalidad	Adecuado para valorar aspectos de la inteligencia emocional.					98
7. Consistencia	Consistencia entre la formulación de problema, objetivos e hipótesis.					98
8. Coherencia	De indicadores y dimensiones.					98
9. Metodología	La estrategia responde al propósito de la investigación.					100

III. OPCIÓN DE APLICABILIDAD

El instrumento cumple con los requisitos para su evaluación

IV. PROMEDIO DE VALORACIÓN

Promedio: 99

Lugar y fecha: Lima, 25 de mayo de 2023

N° DNI: 44127158

.....
Ing. Ambiental y de RR.NN
CIP: 116212

Anexo 5: Análisis de resultados de laboratorio



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

REPORTE DE ANÁLISIS ELEMENTAL (C, H, N, O, S) LER – BIOMASA 036 - 2023

Solicitante : Sres. Mercedes Camila Rivas Curisinche;
Emmy Josselin Vicente Herrera y
Katherine Kelly Toscaïno Casas

Tipo de muestra : Biocarbón y briquetas de biocarbón y aglutinante

Procedencia : Lima

Fecha Recepción : 23 / 06 / 2023

Fecha Reporte : 28 / 06 / 2023

Norma : ASTM D5373

N. LABORATORIO	CÓDIGO DE CAMPO	BASE HÚMEDA			
		CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	MATERIA VOLÁTIL (%)	CENIZAS (%)	CARBONO FIJO (%)
UBE-(06/2023)-0090	Biocarbón	3.50	57.33	5.39	33.80
UBE-(06/2023)-0091	Biocarbón 50%/Aglutinante 50%	20.32	68.15	2.34	9.20
UBE-(06/2023)-0092	Biocarbón 50%/Aglutinante 50%	7.39	71.02	3.25	18.35
UBE-(06/2023)-0093	Biocarbón 50%/Aglutinante 50%	9.49	73.19	0.65	16.69
UBE-(06/2023)-0094	Biocarbón 70%/Aglutinante 30%	18.07	61.06	4.00	16.89
UBE-(06/2023)-0095	Biocarbón 70%/Aglutinante 30%	18.31	64.18	3.43	14.09
UBE-(06/2023)-0096	Biocarbón 70%/Aglutinante 30%	18.52	59.87	4.97	16.65

NOTA:

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



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



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

REPORTE DE ANÁLISIS DE CONTENIDO ENERGÉTICO
(CALORÍMETRO)
LER – BIOMASA 037 - 2023

Solicitante : Sres. Mercedes Camila Rivas Curisinche;
Emmy Josselin Vicente Herrera y
Katherine Kelly Toscaino Casas

Tipo de muestra : Biocarbón y briquetas de biocarbón y aglutinante

Procedencia : Lima

Fecha Recepción : 23 / 06 / 2023

Fecha Reporte : 28 / 06 / 2023

Norma : ASTM D5865

N. LABORATORIO	CÓDIGO DE CAMPO	BASE SECA	BASE HÚMEDA
		PCS (kcal/kg)	PCI (kcal/kg)
UBE-(06/2023)-0090	Biocarbón	4446.71	4291.08

NOTA:

- El análisis se realizó con la muestra la muestra en base húmeda (muestra tal como se recibió). El análisis se realizó con la muestra triturada. 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 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 TERMOGRAVIMÉTRICO – TGA (PROXIMAL)
LER – BIOMASA 035 - 2023

Solicitante : Sres. Mercedes Camila Rivas Curisinche;
Emmy Josselin Vicente Herrera y
Katherine Kelly Toscaino Casas

Tipo de muestra : Biocarbón y briquetas de biocarbón y aglutinante

Procedencia : Lima

Fecha Recepción : 23 / 06 / 2023

Fecha Reporte : 28 / 06 / 2023

Norma : ASTM D7582

N. LABORATORIO	CÓDIGO DE CAMPO	C (%)	H (%)	N (%)	O (%)	S (%)
UBE-(06/2023)-0090	Biocarbón	47.31	3.06	0.36	---	0.06

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 TERMOGRAVIMÉTRICO – TGA (PROXIMAL)
LER – BIOMASA 033 - 2023

Solicitante : Sres. Mercedes Camila Rivas Curisínche;
Emmy Josselin Vicente Herrera y
Katherine Kelly Toscaïno Casas

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)-0082	Cascarilla de Café	10.49	76.69	0.13	12.70

NOTA:

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




José Calle 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 034 - 2023

Solicitante : Sres. Mercedes Camila Rivas Curisínche;
Emmy Josselin Vicente Herrera y
Katherine Kelly Toscaïno Casas

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)-0082	Cascarilla de Café	45.22	6.62	0.20	47.64	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

Anexo 6: Fotografías del proceso de obtención de biocarbón y briquetas



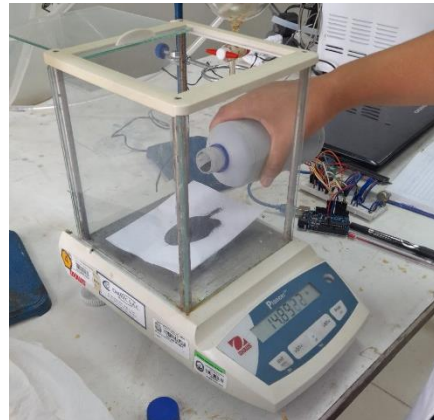
Fotografía 1. Biomasa (CC)



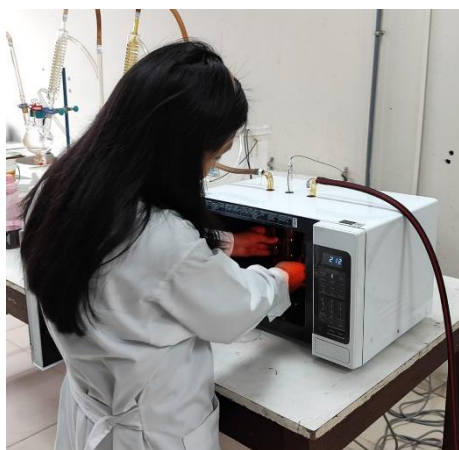
Fotografía 2. Selección de biomasa



Fotografía 3. Muestras de cascarilla de café



Fotografía 4. Pesado de carburo de silicio



Fotografía 5. Colocación de la cascarilla en el reactor pirolítico de microondas



Fotografía 6. Inicio de purga



Fotografía 7. Reactor Pirolítico



Fotografía 8. Obtención de Biocarbón



Fotografía 9. Peso de Biocarbón



Fotografía 10. Obtención de Briqueta