

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



Pirólisis de residuos de café de percoladora para obtención de
biocombustibles líquidos a escala laboratorio

Trabajo de graduación presentado por
César Alejandro Velásquez Velásquez
para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Química

Guatemala

2024

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



Pirólisis de residuos de café de percoladora para obtención de
biocombustibles líquidos a escala laboratorio

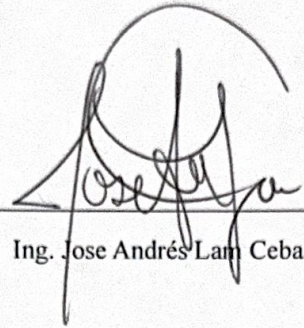
Trabajo de graduación presentado por
César Alejandro Velásquez Velásquez
para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Química

Guatemala

2024

Vo. Bo.

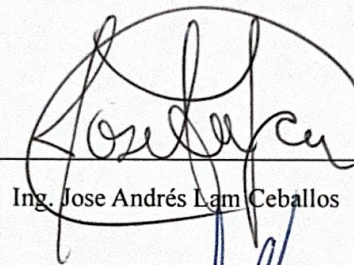
(f)



Ing. Jose Andrés Lam Ceballos

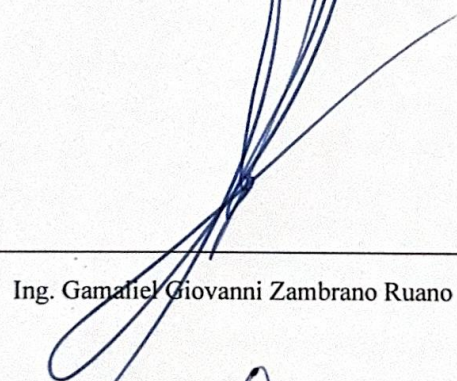
Tribunal examinador

(f)




Ing. Jose Andrés Lam Ceballos

(f)



Ing. Gamaliel Giovanni Zambrano Ruano

(f)



Ing. Carmen Alicia Ortíz Pineda

Fecha de aprobación: Guatemala, 20 de mayo de 2024

PREFACIO

El objetivo principal de este trabajo de graduación fue producir un líquido a partir de la pirólisis lenta de residuos de café de percoladora, con la finalidad de examinar sus propiedades fisicoquímicas y evaluar su comparabilidad con otros biocombustibles alternativos. Esta investigación se motiva por la abundancia diaria de estos residuos en Guatemala y todo el mundo.

En primer lugar, deseo expresar mi gratitud a Dios por otorgarme la oportunidad de vivir, así como por proporcionarme la inteligencia y la salud que me han permitido avanzar. Agradezco las bendiciones recibidas a lo largo de estos años de estudio. En segundo lugar, quiero extender mi agradecimiento a mi madre, Isela Verence, y a mi padre, César Humberto. Les estoy agradecido por brindarme la posibilidad de estudiar, por su continuo respaldo, amor y por motivarme diariamente a enfrentar cualquier desafío que se me presente. En tercer lugar, expreso mi agradecimiento a todos los miembros de mi familia por su constante interés en mi rendimiento académico a lo largo de estos años, así como por los valiosos consejos que cada uno de ellos me ha brindado. En cuarto lugar, agradezco a Rocío Marianela por su constante motivación y apoyo, lo cual fue fundamental para la correcta finalización de este trabajo. Por último, quiero agradecer a mis amigos y compañeros de la Universidad por hacer el ambiente más agradable, por el apoyo mutuo a lo largo de los años de la carrera y por cada uno de los momentos gratos que compartimos en aulas, pasillos y otros lugares.

Deseo expresar mi profundo agradecimiento a todos los profesores que contribuyeron a mi formación profesional durante mis cinco años de estudio en la Universidad del Valle de Guatemala, especialmente a los integrantes del Departamento de Ingeniería Química. Quiero destacar el papel fundamental de mi asesor, el Ing. Jose Lam, cuya orientación fue crucial para la finalización exitosa de este trabajo de graduación. También deseo agradecer a la Licda. Ana Luisa Mendizábal y al Lic. Carlo Martínez por su colaboración en los análisis de laboratorio llevados a cabo, así como a Alfred Méndez y al personal del Laboratorio de Operaciones Unitarias por su constante disposición para brindar apoyo. Por último, extiendo un agradecimiento especial al Laboratorio del Centro Tecnológico de Cementos Progreso S.A. por su invaluable contribución mediante los análisis de laboratorio realizados durante la elaboración de este trabajo.

ÍNDICE

LISTADO DE FIGURAS	viii
LISTADO DE CUADROS	x
LISTADO DE CÁLCULOS	xii
LISTADO DE ECUACIONES	xiii
LISTADO DE ILUSTRACIONES	xiv
RESUMEN.....	xv
I. INTRODUCCIÓN	1
II. JUSTIFICACIÓN	3
III. OBJETIVOS	6
A. Objetivo general	6
B. Objetivos específicos.....	6
IV. MARCO TEÓRICO	7
A. CAFÉ	7
1. Origen del café y generalidades	7
2. Tipos de café	8
3. Producción mundial de café	10
4. Producción nacional de café.....	12
5. Composición del café	14
B. BIOCOMBUSTIBLES	15
1. Biomasa.....	15
2. Tipos de biocombustibles.....	16
C. SECADO	18
D. PIRÓLISIS.....	21
1. Tipos de pirólisis	22
2. Tipos de reactores de pirólisis	24
3. Productos de pirólisis	27

E.	TIPOS DE ANÁLISIS	30
1.	Análisis termogravimétrico	30
2.	Cromatografía de gases/masas	32
F.	PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS	34
1.	Viscosidad	34
2.	Densidad	35
3.	Poder calorífico	36
G.	MUESTREO	39
1.	Muestreo aleatorio o probabilístico	40
2.	Muestreo no aleatorio o no probabilístico	41
V.	ANTECEDENTES	43
A.	SITUACIÓN ACTUAL DE LOS RESIDUOS DE CAFÉ	43
B.	APLICACIONES ACTUALES A LOS RESIDUOS DE CAFÉ	43
C.	PROCESOS DE PIRÓLISIS DE BIOMASA	45
D.	PIRÓLISIS DE RESIDUO DE CAFÉ	47
VI.	METODOLOGÍA	49
A.	RECOLECCIÓN DE MUESTRA DE RESIDUOS DE CAFÉ	49
B.	ACONDICIONAMIENTO DE MUESTRA DE RESIDUOS DE CAFÉ	49
C.	ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO	50
D.	PROCESO DE PIRÓLISIS	51
1.	Preparación de la muestra	51
2.	Montaje del sistema de pirólisis	52
3.	Corridas de pirólisis	52
E.	DETERMINACIÓN PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS	53
1.	Densidad	53
2.	Viscosidad	54
3.	Poder calorífico	54

VII.	RESULTADOS	56
VIII.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	66
IX.	CONCLUSIONES	75
X.	RECOMENDACIONES.....	76
XI.	BIBLIOGRAFÍA	77
XII.	ANEXOS	80
A.	BALANCES DE MASA Y ENERGÍA	80
B.	DATOS ORIGINALES	82
C.	DATOS CALCULADOS	96
D.	ECUACIONES	108
E.	CÁLCULOS DE MUESTRA.....	112
F.	ANÁLISIS DE ERROR.....	115
G.	ANÁLISIS EXTERNOS	118
H.	METODOLOGÍA MUESTREO	121
XIII.	ILUSTRACIONES	123
XIV.	GLOSARIO.....	132

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1: Composición general de los residuos y desechos sólidos comunes en Guatemala.....	3
Figura 2: Balance de masa y energía teórico de todo el proceso de obtención de biocombustible líquido	5
Figura 3: Fruto del café.....	8
Figura 4: Grano de café Arábica	9
Figura 5: Grano de café Robusta.....	10
Figura 6: Producción mundial de café 2000-2020 en miles de sacos de 60kg.....	10
Figura 7: Principales países productores de café en miles de sacos de 60kg.....	11
Figura 8: Principales países productores de café Arábica en miles de sacos de 60kg	12
Figura 9: Principales países productores de café Robusta en miles de sacos de 60kg.....	12
Figura 10: Producción guatemalteca de café en miles de sacos de 60kg	13
Figura 11: Porcentaje de áreas cultivadas por cada departamento de Guatemala.....	14
Figura 12: Composición química de café Arábica y café Robusta	15
Figura 13: Ventajas y desventajas de los tipos de biocombustibles.....	18
Figura 14: Secador por lotes de bandejas.....	20
Figura 15: Secador continuo de túnel.....	21
Figura 16: Esquema de pirólisis por medio de un reactor de lecho fijo.....	25
Figura 17: Esquema de pirólisis por medio de un reactor de lecho fluidizado	26
Figura 18: Reacciones y productos de pirólisis a diferentes temperaturas.....	28
Figura 19: Propiedades físicas y características del bioaceite de pirólisis	29
Figura 20: Analizador termogravimétrico.....	31
Figura 21: Equipo GC-MS	33
Figura 22: Gráfica de relación de viscosidad vs tiempo de desplazamiento.....	35
Figura 23: Propiedades físicas y características de bioaceite de pirólisis	37
Figura 24: Propiedades fisicoquímicas de bioaceite de pirólisis a partir de diversas materias primas de biomasa.....	38
Figura 25: Plantas operativas de pirólisis en el mundo.....	46
Figura 26: Curva de secado de la muestra sometida a proceso de secado	56
Figura 27: Comportamiento de la masa de producto líquido a lo largo del proceso de pirólisis con la primera tasa de calentamiento	58
Figura 28: Comportamiento de la masa de producto líquido a lo largo del proceso de pirólisis con la segunda tasa de calentamiento	59

Figura 29: Balance de masa y energía del proceso de pirólisis con tasa de calentamiento 1	64
Figura 30: Balance de masa y energía del proceso de pirólisis con tasa de calentamiento 2.....	64
Figura 31: Balance de masa y energía del proceso de secado de la materia prima.....	80
Figura 32: Balance de masa y energía del proceso de pirólisis con tasa de calentamiento 1.....	81
Figura 33: Balance de masa y energía del proceso de pirólisis con tasa de calentamiento 2.....	82
Figura 34: Cromatograma de la muestra de producto líquido obtenido en el proceso de pirólisis con tasa de calentamiento 1.....	90
Figura 35: Cromatograma de la muestra de producto líquido obtenido en el proceso de pirólisis con tasa de calentamiento 2.....	91
Figura 36: Gráfica de viscosidad con base en tiempo.....	95
Figura 37: Análisis termogravimétrico realizado a la muestra 1 de residuos de café de percoladora en Centro Tecnológico de Cementos Progreso S.A.	118
Figura 38: Análisis termogravimétrico realizado a la muestra 2 de residuos de café de percoladora en Centro Tecnológico de Cementos Progreso S.A.	119
Figura 39: Análisis termogravimétrico realizado a la muestra 3 de residuos de café de percoladora en Centro Tecnológico de Cementos Progreso S.A.	120

LISTADO DE CUADROS

Cuadro 1: Equipo y cristalería para acondicionar las muestras de residuos de café	49
Cuadro 2: Equipo y cristalería para análisis termogravimétrico	50
Cuadro 3: Equipo y cristalería para proceso de pirólisis.....	51
Cuadro 4: Equipo y cristalería para cálculo de densidad de producto líquido	53
Cuadro 5: Equipo y cristalería para cálculo de viscosidad de producto líquido	54
Cuadro 6: Equipo y cristalería para cálculo de poder calorífico de producto líquido.....	54
Cuadro 7: Humedad inicial y final de los residuos de café utilizados	56
Cuadro 8: Rango de temperaturas para proceso de pirólisis	57
Cuadro 9: Comparación de producto líquido obtenido del proceso de pirólisis y su rendimiento obtenido.....	57
Cuadro 10: Análisis de cromatografía de gases-masas del producto líquido con tasa de calentamiento 1	60
Cuadro 11: Análisis de cromatografía de gases-masas del producto líquido con tasa de calentamiento 2	62
Cuadro 12: Propiedades fisicoquímicas del producto líquido obtenido del proceso de pirólisis .	63
Cuadro 13: Humedad de los residuos de café de percoladora antes del secado.....	82
Cuadro 14: Mediciones de masa para realizar curva de secado	83
Cuadro 15: Humedad de los residuos de café después del secado.....	84
Cuadro 16: Temperaturas de operación para muestras de residuos de café de percoladora	84
Cuadro 17: Datos de temperatura y producto líquido obtenido por el proceso de pirólisis con tasa de calentamiento 1	85
Cuadro 18: Datos de temperatura y producto líquido obtenido por el proceso de pirólisis con tasa de calentamiento 2	86
Cuadro 19: Productos obtenidos por el proceso de pirólisis con tasa de calentamiento 1	89
Cuadro 20: Productos obtenidos por el proceso de pirólisis con tasa de calentamiento 2	89
Cuadro 23: Mediciones de poder calorífico de los productos obtenidos del proceso de pirólisis con tasa de calentamiento 1	92
Cuadro 24: Mediciones de poder calorífico de los productos obtenidos del proceso de pirólisis con tasa de calentamiento 2.	92
Cuadro 25: Mediciones realizadas para cálculo de densidad del producto líquido obtenido con tasa de calentamiento 1	93

Cuadro 26: Mediciones realizadas para cálculo de densidad del producto líquido obtenido con tasa de calentamiento 2	93
Cuadro 27: Mediciones realizadas para cálculo de viscosidad del producto líquido obtenido con tasa de calentamiento 1	94
Cuadro 28: Mediciones realizadas para cálculo de viscosidad del producto líquido obtenido con tasa de calentamiento 2	94
Cuadro 29: Humedad inicial de los residuos de café recolectados	96
Cuadro 30: Humedad final de los residuos de café recolectados	97
Cuadro 31: Temperaturas de operación óptimas para residuos de café de percoladora.....	97
Cuadro 32: Producto líquido obtenido del proceso de pirólisis con tasa de calentamiento 1	98
Cuadro 33: Rendimiento del producto líquido del proceso de pirólisis con la primera tasa de calentamiento	99
Cuadro 34: Producto líquido obtenido del proceso de pirólisis con tasa de calentamiento 2	100
Cuadro 35: Rendimiento del producto líquido del proceso de pirólisis con la segunda tasa de calentamiento	101
Cuadro 36: Poder calorífico del producto líquido del proceso de pirólisis con la primera tasa de calentamiento	102
Cuadro 37: Poder calorífico del producto líquido del proceso de pirólisis con la segunda tasa de calentamiento	103
Cuadro 38: Densidad del producto líquido del proceso de pirólisis con la primera tasa de calentamiento	104
Cuadro 39: Densidad del producto líquido del proceso de pirólisis con la segunda tasa de calentamiento	105
Cuadro 40: Viscosidad del producto líquido obtenido del proceso de pirólisis con tasa de calentamiento 1	105
Cuadro 41: Análisis estadístico de la viscosidad del producto líquido obtenido del proceso de pirólisis con tasa de calentamiento 1.....	106
Cuadro 42: Viscosidad del producto líquido obtenido del proceso de pirólisis con tasa de calentamiento 2	107
Cuadro 43: Análisis estadístico de la viscosidad del producto líquido obtenido del proceso de pirólisis con tasa de calentamiento 2.....	107

LISTADO DE CÁLCULOS

Cálculo 1: Masa de agua eliminada de la materia prima en el proceso de secado	112
Cálculo 2: Rendimiento del producto líquido	112
Cálculo 3: Determinación de densidad del producto líquido obtenido	112
Cálculo 4: Determinación de viscosidad cinemática del producto líquido obtenido	113
Cálculo 5: Balance de masa del proceso de pirólisis	113
Cálculo 6: Flujo de agua de enfriamiento en el condensador.....	114
Cálculo 7: Masa de agua de enfriamiento en el condensador	114
Cálculo 8: Calor añadido por la mufla en el proceso de pirólisis.....	114
Cálculo 9: Calor removido por el condensador en el proceso de pirólisis	115
Cálculo 10: Media muestral de la humedad inicial de los residuos de café recolectados	115
Cálculo 11: Desviación estándar de la humedad inicial de los residuos de café recolectados...	115
Cálculo 12: Intervalo de confianza de la humedad inicial de los residuos de café de percoladora recolectado	116
Cálculo 13: Coeficiente de variación de la humedad inicial de los residuos de café de percoladora recolectado	116
Cálculo 14: Cálculo de incertidumbres para sumas y restas	116
Cálculo 15: Cálculo de incertidumbres para multiplicaciones y divisiones.....	116

LISTADO DE ECUACIONES

Ecuación 1: Desviación estándar muestral.....	108
Ecuación 2: Intervalo de confianza al 95%	108
Ecuación 3: Coeficiente de variación.....	108
Ecuación 4: Cálculo de incertidumbres para sumas y restas.....	109
Ecuación 5: Cálculo de incertidumbres para multiplicaciones y divisiones	109
Ecuación 6: Media muestral.....	109
Ecuación 7: Masa agua eliminada por el proceso de secado.....	109
Ecuación 8: Balance de masa del proceso de pirólisis	110
Ecuación 9: Rendimiento de producto líquido.....	110
Ecuación 10: Flujo másico de agua utilizado en el condensador	110
Ecuación 11: Masa de agua de enfriamiento utilizada en el proceso de pirólisis	110
Ecuación 12: Calor añadido por la mufla en el proceso de pirólisis	111
Ecuación 13: Calor removido en el condensador.....	111
Ecuación 14: Calor proporcionado por los productos de pirólisis	111
Ecuación 15: Densidad del producto líquido obtenido del proceso de pirólisis	111

LISTADO DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Materia prima antes de ser sometida a proceso de secado	123
Ilustración 2: Humedad inicial de la materia prima	123
Ilustración 3: Estufa eléctrica donde se realizó el proceso de secado de la materia prima	124
Ilustración 4: Masa final de materia prima después del proceso de secado	124
Ilustración 5: Humedad final de la materia prima luego del proceso de secado	125
Ilustración 6: Sistema para llevar a cabo el proceso de pirólisis.....	126
Ilustración 7: Reactor de pirólisis de 100g.....	126
Ilustración 8: Mufla ThermoScientific THERMOLYNE	127
Ilustración 9: Kit de destilación CORNING ORGANIC CHEMISTRY KIT	127
Ilustración 10: Masa de materia prima utilizada para el proceso de pirólisis	128
Ilustración 11: Producto líquido obtenido por proceso de pirólisis	128
Ilustración 12: Medición de densidad del producto líquido obtenido del proceso de pirólisis ..	129
Ilustración 13: Producto sólido obtenido en una de las corridas de proceso de pirólisis	129
Ilustración 14: Total de producto líquido obtenido de una de las corridas de proceso de pirólisis realizada	130
Ilustración 15: Bomba calorimétrica IKA C200	130
Ilustración 16: Bomba calorimétrica IKA C200	131

RESUMEN

El presente proyecto de graduación aborda los resultados y análisis obtenidos durante la producción de biocombustible líquido mediante un proceso de pirólisis lenta, utilizando residuos de café de percoladora como materia prima. El primer paso para lograr el objetivo establecido consistió en adecuar la muestra de residuos de café, realizando un proceso de secado debido al alto contenido de humedad presente en la muestra. Este secado se llevó a cabo a una temperatura de 110 °C durante un período de 6 horas.

Con la materia prima preparada, se hizo un análisis termogravimétrico para determinar los rangos de temperatura óptimos para la degradación de los residuos. Esto permitió establecer un rango de operación entre 150 °C y 300 °C. Se emplearon dos tasas de calentamiento diferentes: una de 15 °C/20 min y otra de 15 °C/30 min. El propósito fue comparar la cantidad de producto líquido obtenido con cada una de estas tasas y calcular su respectivo rendimiento. Con la primera tasa de calentamiento, se logró un rendimiento del producto líquido del 21.0%, mientras que con la segunda tasa se obtuvo un rendimiento del 27.2%.

Las propiedades fisicoquímicas medidas en el producto líquido, como la densidad, la viscosidad y el poder calorífico, muestran variaciones significativas en comparación con otros biocombustibles, como el biodiésel, o combustibles derivados del petróleo. Esta discrepancia surge debido a que la muestra de producto líquido contiene una cantidad considerable de agua, lo que afecta estas mediciones.

En términos de energía, la producción de biocombustible líquido a partir de residuos de café de percoladora no resulta viable. La energía suministrada durante el proceso de secado y pirólisis no es compensada por la energía liberada por los productos, lo que conduce a un aumento significativo en los costos de operación del proceso.

I. INTRODUCCIÓN

Desde tiempos antiguos, los humanos han aprovechado la energía de la biomasa, que es la energía de los seres vivos. Este recurso, de naturaleza orgánica, se compone de materiales provenientes de organismos vivos, como plantas y animales, y ha sido empleado desde que los primeros homínidos encendieron fuegos de leña para cocinar o mantenerse calientes. Los materiales más comúnmente utilizados para generar energía a partir de la biomasa incluyen plantas, madera y desechos, los cuales se conocen como materias primas de biomasa. Es importante destacar que la energía de biomasa puede ser tanto renovable como no renovable. La biomasa almacena energía inicialmente proveniente del sol: las plantas absorben esta energía solar a través de la fotosíntesis, transformando el dióxido de carbono y el agua en carbohidratos. Luego, esta energía almacenada en los organismos puede ser convertida en formas utilizables mediante procesos directos e indirectos. Por ejemplo, la biomasa puede ser quemada para generar calor directamente, transformada en electricidad directamente, o procesada en biocombustibles de manera indirecta (National Geographic, 2024).

La biomasa representa una fuente de energía renovable única que puede transformarse en biocombustibles líquidos como el etanol y el biodiesel. Estos biocombustibles se emplean para impulsar vehículos y se producen mediante procesos de gasificación en países como Suecia, Austria y Estados Unidos. Aunque los biocombustibles no ofrecen la misma eficiencia que la gasolina, pueden ser mezclados con esta última para propulsar vehículos y maquinaria de forma efectiva, sin generar las emisiones asociadas a los combustibles fósiles (National Geographic, 2024).

El café es un artículo de consumo diario presente en la mayoría de los hogares, con aproximadamente 2,250 millones de tazas consumidas diariamente en todo el mundo. A pesar de ser un mercado de gran envergadura y una industria multimillonaria a nivel global, es posible que muchos no estén al tanto de la cantidad de desechos y subproductos generados durante su proceso de producción. Los residuos finales del proceso de elaboración del café son los posos de café usados, que suelen considerarse desechos y se eliminan o se utilizan como fertilizante (Sahai, 2021). Este tipo de residuo orgánico, puede someterse a un proceso de pirólisis para obtención de diferentes materiales aprovechables. La pirólisis implica la descomposición térmica de una sustancia en ausencia de oxígeno, lo que significa que se descompone por el calor sin provocar

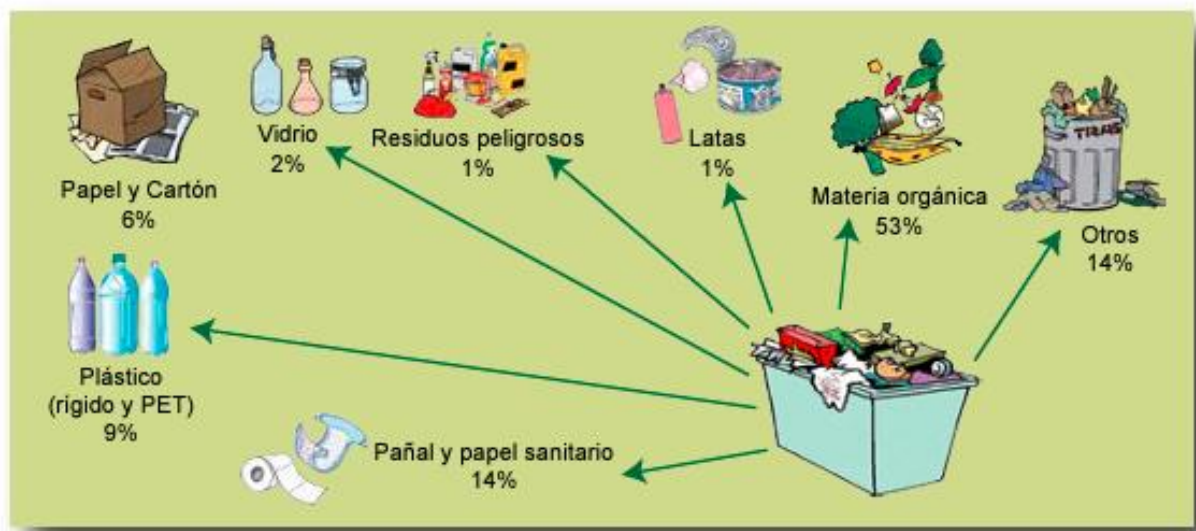
reacciones de combustión. Las principales características de este proceso es que solo está presente el oxígeno contenido en el residuo que se va a tratar y las temperaturas de operación son menores que las de la gasificación, generalmente en el rango de 300 °C a 800 °C (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, s.f.).

El objetivo de este trabajo de graduación es comprobar la viabilidad de obtener combustible líquido a partir de los residuos de café de las percoladoras, los cuales son generados en gran medida por la sociedad al consumir diversos productos relacionados con el café. Se busca determinar si el combustible líquido obtenido mediante el proceso de pirólisis cumple con los requisitos necesarios para competir con otras formas de combustibles alternativos actualmente disponibles, así como evaluar la viabilidad del proceso en términos de rendimiento del producto obtenido.

II. JUSTIFICACIÓN

Los desechos sólidos orgánicos son aquellos provenientes de productos de origen animal y vegetal, principalmente restos de alimentos, actividades agrícolas y de jardinería. En Guatemala, constituyen más del 50 % de los desechos sólidos generados en los hogares y se caracterizan por su rápida descomposición. Si no se manejan adecuadamente, pueden ocasionar olores desagradables, la proliferación de fauna perjudicial como roedores e insectos, y la emisión de gas metano, uno de los principales contribuyentes al efecto invernadero y al cambio climático. La gestión adecuada de estos residuos orgánicos permite producir abono orgánico, también conocido como compost, que resulta invaluable para la agricultura, la jardinería y la restauración de suelos (Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, 2018).

Figura 1: Composición general de los residuos y desechos sólidos comunes en Guatemala



Fuente: Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, 2018

Según Gunter Pauli, experto en sostenibilidad, la producción global de café resulta en más de 23 millones de toneladas de desechos anuales, abarcando desde la pulpa de las cerezas frescas hasta el empaque de los granos tostados. Los posos de café usados, que a menudo se desechan tras cada preparación de café, representan una parte destacada de este desperdicio en el extremo consumidor de la cadena de suministro. Apenas el 0,2 % del grano de café se aprovecha para preparar una taza, dejando el 99,8 % restante como desecho (Sahai, 2021).

La industria del café ejerce un significativo impacto ambiental, con cada etapa de su cadena de suministro involucrando consumo energético, desde el cultivo hasta el procesamiento, transporte y tostado, lo que resulta en una huella de carbono considerable. El consumo de café da lugar a la generación inevitable de posos usados, un subproducto que a menudo se descarta junto con otros desechos orgánicos. Sin embargo, la eliminación de estos posos de café y otros residuos de café en vertederos puede tener graves repercusiones ambientales, especialmente dado que muchas regiones productoras de café albergan ecosistemas delicados. Por tanto, la gestión de los residuos de café se está convirtiendo en un tema crítico para asegurar la sostenibilidad ambiental a largo plazo (Sahai, 2021).

La mayoría del café usado se desecha sin clasificar ni procesar, a menudo termina en vertederos. Los posos de café pueden tardar al menos tres meses en descomponerse en el ambiente sin oxígeno de los vertederos. Estos posos contienen aceites y otras sustancias que aumentan la acidez del suelo, generando lixiviados ácidos que pueden dañar el entorno del suelo. Cuando se opta por métodos de cultivo al sol en lugar de los tradicionales, la calidad del suelo tiende a disminuir con el tiempo. La reducción de la sombra puede tener un impacto significativo en varios indicadores de calidad del suelo, lo que resulta en tasas de erosión más altas en las fincas de café que han sido restauradas con menos vegetación (Sahai, 2021).

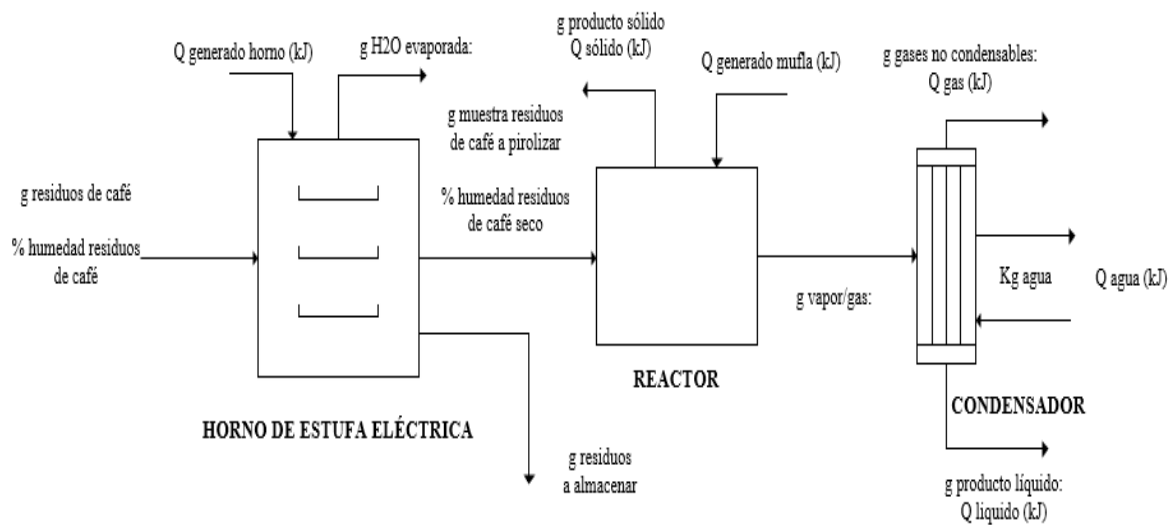
La descomposición de los residuos de café en los vertederos también genera gases de efecto invernadero, lo que contribuye al cambio climático y tiene consecuencias ambientales adicionales. Esto se debe a que los posos de café desechados pueden contener compuestos que son perjudiciales para el ADN y tóxicos para los organismos acuáticos, su disposición en el medio ambiente representa un riesgo para la salud humana y el entorno natural. Durante las operaciones de producción de posos de café en las fábricas, existe un riesgo significativo para el entorno circundante (Sahai, 2021).

Los desechos de café generan una serie de problemas ambientales significativos, que van desde la contaminación del agua debido a la descarga de residuos de café sin tratar hasta desafíos en la gestión de residuos y la emisión de gases tóxicos como el metano debido a la disposición de grandes volúmenes de desechos de café en vertederos. Las plantas procesadoras de café cultivan y cosechan las cerezas de café localmente, las cuales se utilizan para contener los granos. Estas cerezas se someten a un proceso de recolección, despulpado y fermentación, resultando en una

gran cantidad de desechos en forma de pulpa, residuos y pergamino después de separar los granos (Sahai, 2021).

Por tanto, el propósito de este proyecto de graduación es reutilizar los residuos de café de percoladora para crear un producto líquido que pueda ser considerado como un posible biocombustible alternativo en el futuro. Este objetivo se persigue a través de la aplicación de un proceso de pirólisis lenta a dichos residuos.

Figura 2: Balance de masa y energía teórico de todo el proceso de obtención de biocombustible líquido



Fuente: Rivera, 2019

III. OBJETIVOS

A. Objetivo general

Obtener biocombustibles líquidos a partir de residuos de café de percoladora por medio de pirólisis a escala laboratorio.

B. Objetivos específicos

1. Acondicionar la muestra de residuos de café de percoladora para realizar un análisis termogravimétrico y conocer las condiciones de degradación de la muestra para favorecer la obtención de combustible líquido.
2. Realizar el proceso de pirólisis de residuos de café de percoladora a diferentes rampas de temperatura para comparar el rendimiento de recuperación de combustible líquido.
3. Caracterizar el biocombustible obtenido por cromatografía de gases/masas, así como determinar ciertas propiedades fisicoquímicas del mismo como viscosidad, densidad y poder calorífico para compararlo con otros combustibles alternativos.

IV. MARCO TEÓRICO

A. CAFÉ

1. Origen del café y generalidades

El café tiene sus raíces en Etiopía, donde se hallaron los primeros cafetos en el siglo XI, junto con el descubrimiento de las propiedades de las semillas dentro de su fruto. En la actualidad, el cultivo del café se extiende por diversas regiones tropicales y subtropicales de África, América y Asia. Dependiendo del tipo de café, ya sea arábica o robusta, se planta en terrenos de alta altitud, superiores a los 800 metros sobre el nivel del mar, o en áreas más bajas. Los granos de café, que observamos ya tostados, son las semillas que se encuentran en el interior del fruto del cafeto. Este árbol, que puede alcanzar hasta los 10 metros de altura, se mantiene limitado a no más de 3 metros durante su cultivo para facilitar la recolección. El cafeto florece y produce frutos después de tres o cuatro años, con flores de tonalidades blancas o ligeramente rosadas, desprendiendo un aroma reminiscente al jazmín (NESTLE España, s.f.).

La calidad del café se ve influenciada por diversos factores desde la etapa de plantación, incluso en variedades aparentemente idénticas. La temperatura media, las horas de sol, la distribución de las lluvias y la altitud en relación al nivel del mar desempeñan un papel crucial. Similar en la producción de vinos, el terreno determina muchas de las características del fruto. En general, los cafetos cultivados en áreas elevadas, con precipitaciones regulares y temperaturas moderadas, ofrecen frutos de alta calidad. No obstante, las condiciones varían considerablemente entre el café arábica y robusta (NESTLE España, s.f.).

La fruta del café, también conocida como cereza, exhibe un tamaño pequeño y forma redonda, adquiriendo un tono rojo intenso al alcanzar la madurez. Dentro de este fruto es donde se alojan los granos o semillas de café.

Figura 3: Fruto del café



Fuente: Nestle España, s.f.

La cereza del cafeto se compone de varias partes:

- La piel o exocarpio, que inicialmente es verde y luego adquiere tonalidades rojas o anaranjadas al madurar.
- La pulpa o mesocarpio, que posee un alto contenido de azúcar y desempeña un papel crucial en el proceso de fermentación al que se somete el café.
- Las semillas o granos, generalmente dos en cada fruto. Cada una de ellas está cubierta por una delgada cascarilla denominada pergamino.

(NESTLE España, s.f.)

2. Tipos de café

Lo primero que es fundamental comprender son las distintas variedades de café. La *coffea*, el término científico para referirse a la planta de café, demanda condiciones específicas de clima y altitud para su cultivo. Debido a estas necesidades particulares, la producción de café se limita a áreas próximas al ecuador. Existen alrededor de 90 especies diferentes de *coffea*, pero las más destacadas son la arábica y la robusta, las cuales representan aproximadamente dos tercios de la producción mundial de café.

Café Arábica

Esta fue la primera variante de café que se cultivó, destacando como la más significativa a nivel mundial, ocupando entre el 70% y el 80% de la producción global de café. Entre las diversas variedades de cultivo se incluyen Bourbon, Catui, Caturra, Catimorra, Mundonovo, entre otras.

Esta planta es más delicada en comparación con la variedad robusta, requiriendo cuidados adicionales y prosperando a altitudes que oscilan entre los 600 y 2,000 metros sobre el nivel del mar. Las reconocidas cualidades organolépticas del café están vinculadas a la altitud del cultivo, siendo que mayores alturas se traducen en mejores características, y viceversa. El café arábico se distingue por su sabor excepcional, matices aromáticos y una entrada suave en el paladar, atribuible a su contenido de cafeína, que oscila entre el 1% y el 1.5%. Los granos de café arábica son notoriamente grandes, con una forma alargada y achatada, presentando una línea divisoria que forma una distintiva “S”.

Figura 4: Grano de café Arábica



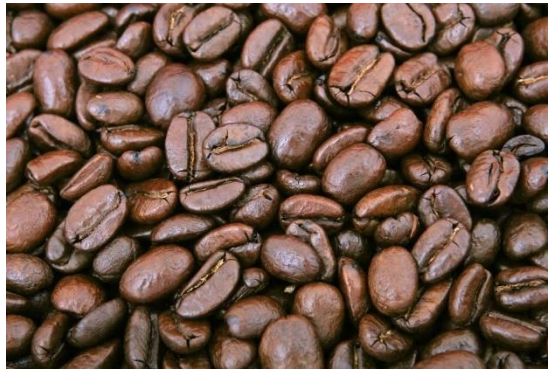
Fuente: Euskovazza, 2018

Café Robusta

Estos tipos de granos de café presentan notables contrastes con el arábica. La planta es notablemente más resistente, requiriendo menos atención y no depende de condiciones climáticas tan específicas. Se cultiva a altitudes que van desde los 200 hasta los 600 metros sobre el nivel del mar. Debido a estas características, el café Robusta tiene significativas ventajas en comparación con el arábica. Puede ser cultivado en una variedad más extensa de regiones y su producción resulta considerablemente más económica debido a la mayor robustez y rendimiento de la planta.

La mayor concentración de cafeína es otro factor que contribuye a la resistencia de esta variedad de café. Con un sabor más amargo y menos ácido, presenta menos fragancia, una textura áspera y comúnmente se menciona que tiene una crema más duradera. Para identificar un grano de café robusta, es importante notar su forma redonda, un tono ligeramente más oscuro y una línea divisoria recta en el grano.

Figura 5: Grano de café Robusta

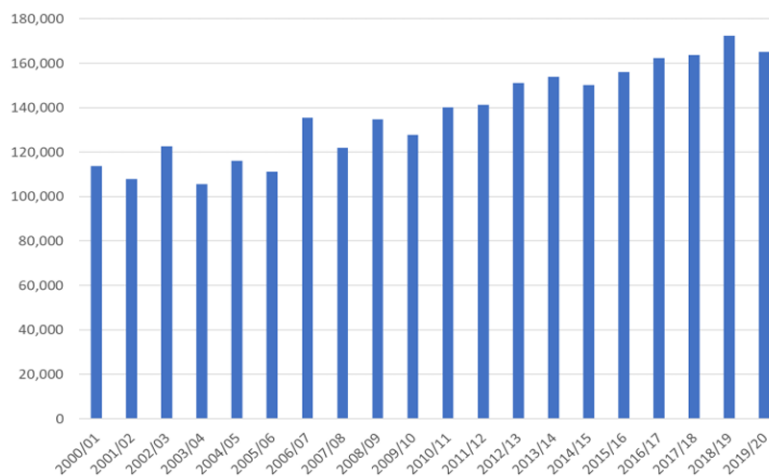


Fuente: Euskovazza, 2018

3. Producción mundial de café

En el ciclo de producción 2019-2020, la producción global de café alcanzó un total de 165 millones de sacos de 60 kilogramos. Aunque esta cifra representó una disminución del 4.3% en comparación con la producción del periodo 2018-2019, constituyó la segunda producción más elevada registrada en los últimos 30 años, según los datos disponibles. Como se ilustra en la figura a continuación, en la última década, la producción mundial de café ha experimentado un crecimiento constante, con un promedio anual del 2.66%, llevando la producción actual a alrededor de los 165 millones de sacos.

Figura 6: Producción mundial de café 2000-2020 en miles de sacos de 60kg



Fuente: de León & Rodríguez, 2021

Aunque la Organización Internacional del Café identifica 55 países en todo el mundo como productores de café, la producción está predominantemente concentrada en 15 naciones. Estos países generan aproximadamente el 95% del total de café a nivel mundial. Entre ellos, Brasil ocupa la posición líder en el mercado, alcanzando una producción de 58.2 millones de sacos en el periodo 2019/2020, lo que equivale al 35% de la producción mundial. En segundo lugar, Vietnam contribuye con el 18.4% de la producción global. Dentro de la región centroamericana, Honduras se posiciona como el principal productor de café en la actualidad, seguido por Guatemala, ubicándose en el puesto 11 a nivel mundial.

Figura 7: Principales países productores de café en miles de sacos de 60kg

País	Producción	Rank	País	Producción	Rank
Brasil	58,211	1	Mexico	3,985	9
Vietnam	30,487	2	Peru	3,836	10
Colombia	14,100	3	Guatemala	3,606	11
Indonesia	11,433	4	Nicaragua	2,882	12
Etiopia	7,343	5	Côte d'Ivoire	1,929	13
Honduras	5,931	6	Costa Rica	1,472	14
Uganda	5,509	7	Tanzania	926	15
India	4,988	8			

Fuente: de León & Rodríguez, 2021

El café producido a nivel mundial se divide en un 57% de café Arábica y un 43% de café Robusta. Se destaca que el aumento observado en la producción global de café en los últimos años se debe principalmente a un incremento en la producción de café Arábica, mientras que la producción de café Robusta ha mantenido, en promedio, alrededor de 67 millones de sacos al año. Además, existen notables disparidades en el tipo de café producido por los principales países cafeteros. Brasil sobresale como el principal productor tanto de café Arábica como Robusta, liderando la producción de Arábica y siendo el segundo mayor productor de café Robusta. En cambio, la mayoría de los demás países se especializan principalmente en uno de los dos tipos, con la mayoría de las naciones de América Latina centradas en el café Arábica. De hecho, en la clasificación de los principales productores de café Arábica, Guatemala destaca como el sexto mayor productor, quedando solo detrás de Brasil, Colombia, Etiopía, Honduras y Perú. En contraste, son principalmente los países asiáticos y africanos los que se destacan en la producción de café Robusta.

Figura 8: Principales países productores de café Arábica en miles de sacos de 60kg

Rank	País	2017/2018	2018/2019	2019/2020
1	Brasil	39,500	49,700	42,000
2	Colombia	13,825	13,870	14,100
3	Etiopia	7,055	7,350	7,450
4	Honduras	7,600	7,515	5,400
5	Peru	4,375	4,480	4,550
6	Guatemala	3,600	3,520	3,200
7	Mexico	3,800	3,100	3,150
8	Nicaragua	2,700	2,800	2,600
9	China	1,925	2,000	1,900
10	Costa Rica	1,525	1,250	1,472

Fuente: de León & Rodríguez, 2021

Figura 9: Principales países productores de café Robusta en miles de sacos de 60kg

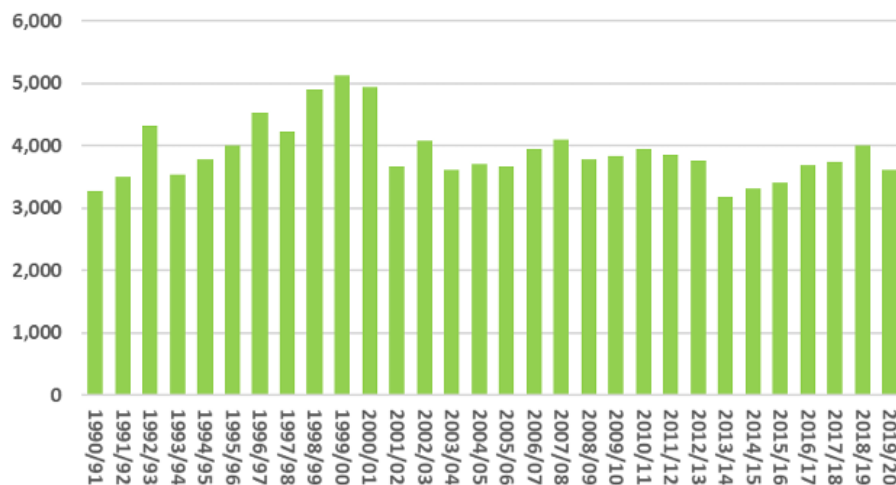
Rank	País	2017/2018	2018/2019	2019/2020
1	Vietnam	28,274	29,336	30,200
2	Brasil	12,600	16,800	18,500
3	Indonesia	9,400	9,400	9,450
4	India	3,683	3,742	3,517
5	Uganda	3,600	4,000	3,500
6	Malasia	2,100	2,100	1,900
7	Cote d'Ivoire	1,250	2,000	1,725
8	Tailandia	700	650	700
9	Tanzania	550	600	600
10	Mexico	200	450	550

Fuente: de León & Rodríguez, 2021

4. Producción nacional de café

La relevancia del café se encuentra fundamentalmente en su proceso de producción. Según los datos proporcionados por la Organización Internacional de Café y reflejados en la figura, se evidencia que la producción nacional ha experimentado una desaceleración en las últimas décadas. El punto álgido de producción se remonta a 1998, cuando se alcanzaron los 5 millones de sacos de 60 kilogramos, justo antes de la crisis de precios en 2001. Fue esta crisis la responsable de la abrupta disminución en la producción. Desde entonces, la producción ha oscilado alrededor de dicho nivel.

Figura 10: Producción guatemalteca de café en miles de sacos de 60kg



Fuente: de León & Rodríguez, 2021

La figura ilustra que, en el año 2001, la disminución en la producción se aproximó a casi 1.3 millones de sacos, representando la mayor caída registrada en la historia del café de un año a otro. Después de este suceso, se iniciaron ciclos de fluctuaciones en la producción, a veces influenciados por factores como la roya, condiciones climáticas o variaciones en los precios. La producción para el periodo 2019-20 se ubicó en aproximadamente 3.5 millones de sacos, marcando un quiebre en una tendencia ascendente de producción que se había mantenido durante 5 años.

La producción de café tiene una distribución geográfica en el país. Según los datos de Anacafé, la figura presenta la producción por departamento y región. Se destaca que el departamento más significativo en términos de producción es Santa Rosa, aportando un 20% del total, seguido por San Marcos con un 14.7%. Huehuetenango es el único otro departamento con una cifra de dos dígitos en cuanto a su contribución a la producción de café. La plantación de café abarca 21 de los 22 departamentos de la nación y está extendida en 239 de los 330 municipios. En otras palabras, es un cultivo presente en prácticamente todos los lugares del país.

Figura 11: Porcentaje de áreas cultivadas por cada departamento de Guatemala

Región	Departamento	Ha.	% del Total
I	Quetzaltenango	19,753	6.2%
I	San Marcos	46,482	14.7%
II	Chimaltenango	17,426	5.5%
II	Retalhuleu	4,826	1.5%
II	Sololá	10,602	3.3%
II	Suchitépéquez	18,276	5.8%
III	El Progreso	3,315	1.0%
III	Escuintla	13,631	4.3%
III	Guatemala	14,528	4.6%
III	Sacatepéquez	7,243	2.3%
IV	Jalapa	15,199	4.8%
IV	Jutiapa	12,082	3.8%
IV	Santa Rosa	63,362	20.0%
V	Huehuetenango	34,910	11.0%
V	Quiché	3,473	1.1%
VI	Alta Verapaz	17,884	5.6%
VI	Baja Verapaz	1,738	0.5%
VI	Izabal	276	0.1%
VII	Chiquimula	8,385	2.6%
VII	Petén	3	0.0%
VII	Zacapa	3,474	1.1%

Fuente: de León & Rodríguez, 2021

5. Composición del café

El café, desde un punto de vista químico, está compuesto principalmente por agua y materia seca. La materia seca presente en los granos de café, conocidos como almendras, comprende minerales y diversas sustancias orgánicas, como carbohidratos, lípidos, proteínas, alcaloides como la cafeína y la trigonelina, así como ácidos carboxílicos y fenólicos. También incluye compuestos volátiles que contribuyen al aroma característico de la almendra.

En cuanto a los granos de café tostados, estos conservan varios de los compuestos químicos presentes en la almendra, aunque en concentraciones diferentes. Además, durante el proceso de tostado, se generan cientos de otras sustancias debido a diversas reacciones químicas causadas por el calor. Factores como la especie del café, su nivel de madurez, el proceso de fermentación, el secado, almacenamiento, tostado y el método de preparación de la bebida influyen en la composición química del café, impactando en la calidad del sabor, la acidez, el cuerpo, la amargura, la dulzura y los aromas presentes en una taza de café.

Figura 12: Composición química de café Arábica y café Robusta

Componente químico	Arábica (%)	Robusta (%)
Polisacáridos	50,8	56,40
Sacarosa	8,00	4,00
Azúcares reductores	0,10	0,40
Proteínas	9,80	9,50
Aminoácidos	0,50	0,80
Cafeína	1,20	2,20
Trigonelina	1,00	0,70
Lípidos	16,20	10,00
Ácidos alifáticos	1,10	1,20
Ácidos clorogénicos	6,90	10,40
Minerales	4,20	4,40
Compuestos aromáticos	trazas	trazas

Fuente: Puerta, 2011

B. BIOCOMBUSTIBLES

A diferencia de los combustibles fósiles, los biocombustibles son derivados de plantas, cultivos, residuos e incluso microorganismos. Su valor fundamental radica en que, al proceder de fuentes renovables que se regeneran con el tiempo, los biocombustibles se consideran una forma de energía sostenible. Una de sus ventajas notables es que las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) producidas al utilizar estos biocombustibles se clasifican como emisiones biogénicas. Esto implica que estas emisiones se equilibran con el secuestro de carbono durante el ciclo de crecimiento de la biomasa utilizada para producir los combustibles (CarbonNeutral+, 2023).

1. Biomasa

La biomasa se refiere a la fracción biodegradable de productos, residuos y desechos de origen biológico provenientes de actividades agrarias, incluyendo sustancias de origen vegetal y animal, así como de la silvicultura y sectores relacionados, como la pesca y acuicultura. También comprende la porción biodegradable de los residuos, tanto industriales como municipales, de origen biológico. En esencia, la biomasa constituye materia orgánica empleada como fuente de

energía. Debido a su extensa definición, abarca una diversidad de materiales orgánicos caracterizados por su variabilidad en términos de origen y naturaleza.

En el ámbito energético, la biomasa se puede conceptualizar como la materia orgánica generada a través de procesos biológicos, ya sean espontáneos o inducidos, que puede utilizarse como fuente de energía. Los recursos biomásicos se dividen generalmente en agrícolas y forestales. Además, se incluyen dentro de la biomasa la materia orgánica presente en aguas residuales y lodos de depuradoras, así como la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU), junto con otros desechos provenientes de diversas industrias. La evaluación de la biomasa se puede realizar mediante cuatro procesos fundamentales para su conversión en calor y electricidad: combustión, digestión anaerobia, gasificación y pirólisis (APPA, 2022).

En Guatemala, la biomasa proviene de residuos orgánicos de origen animal y vegetal, como el bagazo de caña de azúcar, residuos de café, maíz, arroz y otros. Acá también se toman en cuenta los biocombustibles como biomasa, los cuales son productos de reacciones químicas de los residuos antes mencionados y de fermentaciones de subproductos vegetales. Algunas de las ventajas de utilizar biomasa para la obtención de energía son que se reduce la dependencia de los derivados del petróleo, ahorro de divisas, reducción de emisión de CO₂, uso de residuos que generan contaminación ambiental (como desechos de ganado porcino y vacuno). Sin embargo, también tiene ciertas desventajas, como el uso de grandes extensiones de cultivo que desplazan cultivos de alimentos humanos, generando o aumentando la crisis alimentaria. El precio de la biomasa puede ser mayor al de los derivados de petróleo al considerar los agregados ambientales y la producción de gas metano que puede ser liberado al ambiente y contribuir al efecto invernadero (Ministerio de Energía y Minas, 2020).

2. Tipos de biocombustibles

Biocombustibles de primera generación

Los biocombustibles de primera generación son aquellos que se derivan directamente de cultivos como maíz, caña de azúcar, soja y aceite de palma. La desventaja asociada con estos combustibles radica en que se obtienen a partir de materias primas que podrían destinarse a la producción de alimentos para consumo humano (CarbonNeutral+, 2023).

Biocombustibles de segunda generación

Los biocombustibles de segunda generación se producen utilizando biomasa lignocelulósica proveniente de la agricultura y residuos de la industria forestal.

Algunas fuentes de biocombustibles de segunda generación incluyen:

- Bagazo de caña de azúcar
- Rastrojo de maíz
- Paja de trigo
- Aserrín
- Hojas y ramas secas provenientes de la poda de árboles
- Grasas animales
- Residuos gastronómicos
- Aceite de fritura usado

La obtención de estos biocombustibles requiere la aplicación de tecnologías más complejas y costosas en comparación con los biocombustibles de primera generación. Sin embargo, los biocombustibles de segunda generación ofrecen la ventaja de aprovechar residuos abundantes que, de lo contrario, podrían terminar en vertederos o generar contaminación en basurales a cielo abierto (CarbonNeutral+, 2023).

Biocombustibles de tercera generación

Los biocombustibles de tercera generación se elaboran a partir de biomasa derivada de microalgas y cianobacterias. Estos microorganismos pueden ser empleados para producir alcoholes y lípidos de manera natural, los cuales se transforman en biodiésel u otros combustibles ricos en energía. Estos cultivos se caracterizan por su rápido crecimiento y la alta densidad de energía almacenada en sus componentes químicos, siendo comúnmente denominados "cultivos energéticos".

Los biocombustibles generados a partir de algas presentan diversas ventajas. En primer lugar, su cultivo no compite con tierras de cultivo destinadas a la producción de alimentos, ya que se lleva a cabo en cuerpos de agua naturales o artificiales. Además, las algas pueden prosperar en diversos tipos de agua, desde salobres hasta no potables e incluso en aguas residuales. Esto se

vuelve particularmente relevante en un contexto donde el agua dulce es cada vez más escasa, una condición que se espera que se intensifique en las próximas décadas.

Asimismo, las algas son organismos altamente eficientes en la fotosíntesis, capaces de generar una mayor cantidad de biomasa por unidad de superficie y tiempo en comparación con los cultivos convencionales. Su cultivo requiere la provisión directa de dióxido de carbono, que puede obtenerse de emisores industriales o mediante captura atmosférica (CarbonNeutral+, 2023).

Figura 13: Ventajas y desventajas de los tipos de biocombustibles

Tipos de Biocombustibles	Materia prima	Ventajas	Desventajas
Primera generación	Cultivos alimentarios	<ul style="list-style-type: none"> • Costo eficiente • Simplicidad y solidez del proceso • No requiere pre-tratamientos 	<ul style="list-style-type: none"> • Conflictos alimentos vs combustible • Alta demanda de superficie de tierra y agua
Segunda generación	Residuos	<ul style="list-style-type: none"> • Valorización de residuos • Economía circular • No hay conflicto alimentos vs combustible 	<ul style="list-style-type: none"> • Pre-tratamientos costosos • Procesos más complejos que 1ra generación • Recolección de residuos
Tercera generación	Algas	<ul style="list-style-type: none"> • Captura directa de CO2 • No se utiliza suelo/agua • No hay conflicto alimentos vs combustible 	<ul style="list-style-type: none"> • Altos costos de refinamiento de combustible para su comercialización

Fuente: CarbonNeutral+, 2023

C. SECADO

El contenido de humedad representa una variable crucial en los biocombustibles, dado que influye en la capacidad calorífica del combustible al reducirla. Esto se debe a que parte de la energía utilizada se destinaría exclusivamente a evaporar el agua presente en la biomasa, por lo que es esencial llevar a cabo un proceso de secado. La operación de secado implica la eliminación de la humedad contenida en una sustancia. En este proceso, el producto final siempre es en estado sólido, distinguiéndose de otras operaciones unitarias como la evaporación, donde, aunque se elimine líquido, se parte de un estado líquido para obtener un concentrado líquido. En cambio, el secado resulta en un sólido con un contenido de humedad significativamente reducido. Esta operación de secado es común en diversas industrias químicas, ya que facilita la manipulación en fases posteriores, disminuye los costos de transporte y contribuye a la conservación, como en el

caso de medicamentos. Se pueden categorizar todas las operaciones de secado como procesos de lotes o continuos, y esta clasificación generalmente se realiza considerando la sustancia sólida a secar. Las operaciones por lotes son procedimientos semicontinuos, donde una cantidad específica de la sustancia que se va a secar se expone a una corriente de aire constante, propiciando la evaporación de la humedad.

Secado por lotes

Los procedimientos para operar equipos por lotes o semilotes se llevan a cabo de manera intermitente o cíclica en condiciones no estacionarias. En términos generales, estos procesos implican cargar el equipo con el sólido o la sustancia que se va a secar, mantenerlo en el equipo hasta que el sólido esté seco, al alcanzar un contenido de humedad deseado, descargar el sólido del equipo secador y recargar con un nuevo lote. Los procedimientos de secado por lotes son operaciones relativamente costosas, siendo más ventajoso optar por un secado continuo. Esto limita estas operaciones a una escala pequeña, ya sea para plantas piloto, fines de investigación, o para secar materiales particulares o valiosos, cuyo costo total no se vea significativamente afectado por el gasto adicional del proceso de secado. Algunos ejemplos de equipos de secado por lotes incluyen los secadores de platos, los secadores de camión, los secadores de circulación transversal por lotes o secadores directos, los secadores de anaqueles al vacío, los secadores de charola con agitación, y los secadores giratorios de vacío o secadores indirectos. Finalmente, se encuentran los secadores por congelamiento (Treybal, 1988).

Figura 14: Secador por lotes de bandejas



Fuente: YINDA Machinery, 2024

Secado continuo

La operación de secado continuo, ampliamente empleada en la industria debido a su eficiencia en relación con el tamaño del secador respecto al producto, elimina los tiempos muertos durante el proceso, a diferencia del método por lotes. Además, este tipo de operación continua suele ser más rentable en comparación con la operación por lotes. El procedimiento consiste en transportar el material a través del secador mientras una corriente móvil de aire o gas, según el material utilizado, extrae la humedad del sólido. El flujo utilizado puede ser paralelo o a contracorriente. En el flujo a contracorriente, el gas más caliente entra en contacto con el sólido más seco, lo que resulta en un secado más rápido. Aunque maneja temperaturas elevadas, la desventaja es que el material puede desintegrarse debido a estas altas temperaturas. En el caso del flujo paralelo, el sólido se calienta únicamente a la temperatura de bulbo húmedo del gas, permitiendo que sólidos sensibles al calor se sequen con un gas de flujo caliente. Cuando la salida del gas del secador se enfría, no causa daños al sólido. Este tipo de flujo ofrece un mayor control del contenido de humedad del sólido descargado. Algunos equipos utilizados para operaciones de secado continuo incluyen secadores de túnel, secadores tipo turbo, secadores de circulación transversal, secadores rotatorios, secadores rotatorios por circulación transversal, secadores de tambor, secadores por aspersión y lechos fluidizados (Treybal, 1988).

Figura 15: Secador continuo de túnel



Fuente: Interempresas, 2023

D. PIRÓLISIS

La pirólisis se refiere a la descomposición térmica de la biomasa en ausencia de oxígeno. Esta palabra proviene del griego "piro", que significa fuego, y "lisis", que denota descomposición o descomposición en partes constituyentes. La tecnología de pirólisis tiene una larga historia, remontándose a más de 5,500 años en el sur de Europa y Oriente Medio, donde se utilizaba para la producción de carbón vegetal. A lo largo del tiempo, la pirólisis se ha empleado para crear alquitrán para calafatear barcos y ciertos agentes de embalsamamiento en el antiguo Egipto. Su uso se ha incrementado, especialmente para producir carbón vegetal y coque, ya que solo la quema de carbón permitía alcanzar las temperaturas necesarias para fundir estaño con cobre y producir bronce (Jahirul, *et al.* 2012).

La pirólisis ha ganado atención creciente en las últimas décadas como un método eficiente para convertir biomasa en biocombustible, ya que tiene la capacidad de producir biocombustibles con altas proporciones de combustible en comparación con los alimentos. El objetivo principal de esta tecnología es generar bioaceite de alto valor para competir y eventualmente reemplazar los combustibles fósiles no renovables. Sin embargo, el siguiente desafío para los investigadores de pirólisis radica en desarrollar tecnologías avanzadas que permitan la conversión de biomasa en

combustibles líquidos para su uso directo en vehículos, trenes, barcos y aviones, reemplazando así a la gasolina y el diésel. En los últimos tiempos, ha habido un aumento en el desarrollo de la tecnología de pirólisis, y se han publicado numerosos artículos de investigación sobre la aplicación de la pirólisis en la producción de bioaceite (Jahirul, *et al.* 2012).

1. Tipos de pirólisis

Pirólisis lenta

La técnica de pirólisis lenta ha sido empleada durante milenios para mejorar la producción de carbón a temperaturas y velocidades de calentamiento bajas. En este procedimiento, el tiempo que el vapor permanece en el sistema es prolongado (entre 5 y 30 minutos), lo que conlleva a que los componentes en la fase de vapor sigan reaccionando entre sí, resultando en la formación de carbón sólido y otros líquidos. Sin embargo, la pirólisis lenta presenta algunas limitaciones tecnológicas que hacen improbable su idoneidad para la producción de bioaceite de alta calidad. El craqueo del producto primario en el proceso de pirólisis lenta se produce debido al extenso tiempo de residencia, lo que podría afectar negativamente el rendimiento y la calidad del bioaceite. Además, el prolongado tiempo de residencia y la baja transferencia de calor requieren una aportación adicional de energía (Jahirul, *et al.* 2012).

Pirólisis rápida

En el proceso de pirólisis rápida, la biomasa es sometida rápidamente a altas temperaturas en ausencia de oxígeno. Por lo general, en términos de peso, la pirólisis rápida genera entre un 60% y un 75% de productos oleosos (aceite y otros líquidos), con un 15% y un 25% de sólidos (principalmente biocarbón) y entre un 10% y un 20% de fase gaseosa, dependiendo de la materia prima utilizada. La producción de líquidos se realiza mayormente a partir de biomasa en un entorno de baja temperatura, alta velocidad de calentamiento y corto tiempo de residencia. Las características clave del proceso de pirólisis rápida incluyen una alta transferencia de calor y velocidad de calentamiento, un tiempo de residencia del vapor muy breve, un enfriamiento rápido de los vapores y aerosoles para lograr un alto rendimiento de bioaceite, y un control preciso de la temperatura de reacción.

La tecnología de pirólisis rápida está experimentando una notable popularidad en la producción de combustibles líquidos y una variedad de productos químicos especializados y básicos. Este producto líquido puede ser transportado y almacenado fácilmente, desconectando así la manipulación de la biomasa sólida de su uso. Además, tiene el potencial de proporcionar varios productos químicos valiosos que ofrecen un atractivo valor añadido superior al de los combustibles. La tecnología de pirólisis rápida puede tener costos de inversión relativamente bajos y una alta eficiencia energética en comparación con otros procesos, especialmente a pequeña escala. La producción de bioaceite mediante pirólisis rápida ha ganado más atención en los últimos años debido a sus ventajas potenciales:

- Ser un combustible renovable para calderas, motores, turbinas, generación de energía y procesos industriales
- Bajos costos y equilibrio neutro de CO₂
- Utilización de materias primas de bioaceites de segunda generación y materiales de desecho (residuos forestales, residuos municipales e industriales, etc.)
- Almacenamiento y transporte eficientes de combustibles líquidos
- Alta densidad energética en comparación con los gases combustibles de gasificación de biomasa atmosférica
- Posibilidad de separar minerales en el lugar de producción de combustible líquido para reciclarlos al suelo como nutriente
- Conversión secundaria a combustibles para motores, aditivos o productos químicos especiales
- Separación primaria de las fracciones de azúcar y lignina en la biomasa con mejoras posteriores.

(Jahirul, *et al.* 2012).

Pirólisis instantánea

La pirólisis instantánea de biomasa se presenta como un método prometedor para la generación de combustibles sólidos, líquidos y gaseosos a partir de biomasa, con la capacidad de alcanzar hasta un 75% de rendimiento de bioaceite. Este procedimiento se caracteriza por una desvolatilización rápida en una atmósfera inerte, un calentamiento veloz de las partículas, elevadas temperaturas de reacción que oscilan entre 450 °C y 1000 °C y un tiempo de residencia del gas extremadamente breve (menos de 1 s). Sin embargo, a pesar de sus ventajas, este proceso presenta ciertas limitaciones tecnológicas, tales como la mala estabilidad térmica y corrosividad del aceite,

presencia de sólidos en el aceite, incremento de la viscosidad con el tiempo debido a la acción catalítica del carbón, concentración de álcali en el carbón que se disuelve en el aceite y generación de agua pirolítica (Jahirul, *et al.* 2012).

2. Tipos de reactores de pirólisis

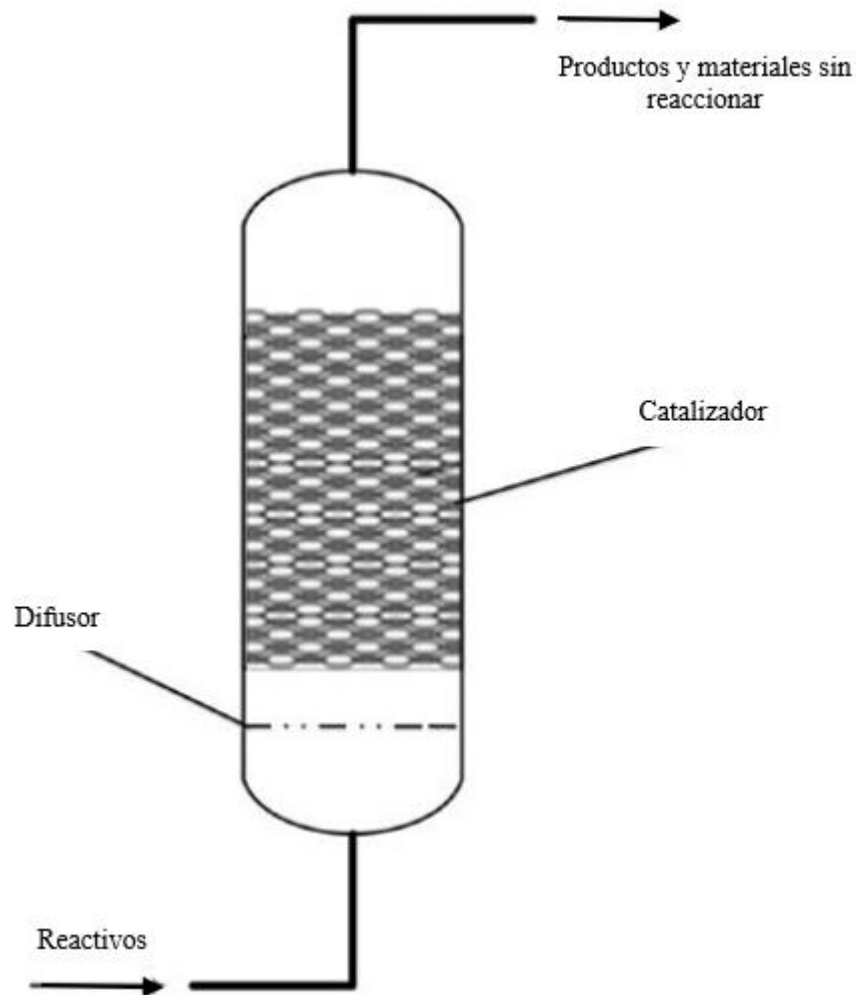
El reactor desempeña un papel central en cualquier proceso de pirólisis y ha sido objeto de una significativa investigación, innovación y desarrollo para mejorar aspectos cruciales como velocidades de calentamiento elevadas, temperaturas moderadas y tiempos de residencia cortos para los productos de vapor y líquidos. Inicialmente, se creía que un tamaño de partícula pequeño de biomasa (menos de 1 mm) y un tiempo de residencia extremadamente breve permitirían alcanzar un rendimiento de bioaceite elevado. Sin embargo, investigaciones más recientes han revelado resultados diferentes. Se ha descubierto que el tamaño de las partículas y el tiempo de residencia del vapor tienen un impacto limitado en el rendimiento del bioaceite, aunque influyen significativamente en su composición. A medida que la tecnología de pirólisis ha avanzado, se han explorado diversos diseños de reactores con el objetivo de optimizar el rendimiento de la pirólisis y producir bioaceite de alta calidad. No obstante, cada tipo de reactor presenta características específicas, capacidad de producción de bioaceite, así como ventajas y limitaciones. A continuación, se describen los tipos más populares de reactores:

Reactor de lecho fijo

El sistema de pirólisis de lecho fijo está compuesto por un reactor que incorpora un sistema para refrigerar y purificar los gases. La tecnología del reactor de lecho fijo es sencilla, fiable y ha demostrado su eficacia en el tratamiento de combustibles que tienen un tamaño relativamente uniforme y contienen bajos niveles de finos. En este tipo de reactor, los sólidos descienden a lo largo de un eje vertical y entran en contacto con una corriente ascendente de gas producto en contracorriente. Generalmente construido con ladrillos refractarios, acero u hormigón, un reactor de lecho fijo suele contar con una unidad de alimentación de combustible, una unidad de eliminación de cenizas y una salida de gases. Los reactores de lecho fijo operan típicamente con una alta retención de carbono, un largo tiempo de residencia de sólidos, una baja velocidad del gas y un arrastre de cenizas reducido. Se considera que estos reactores son apropiados para aplicaciones de calor y energía a pequeña escala. El sistema de refrigeración y purificación de gases incluye procesos como la filtración mediante ciclones, depuradores húmedos y filtros secos.

La principal dificultad asociada a los reactores de lecho fijo radica en la eliminación del alquitrán; no obstante, los avances recientes en la conversión térmica y catalítica del alquitrán han proporcionado alternativas viables para abordar este problema (Jahirul, Rasul, Chowdhury, & Ashwath, 2012).

Figura 16: Esquema de pirólisis por medio de un reactor de lecho fijo



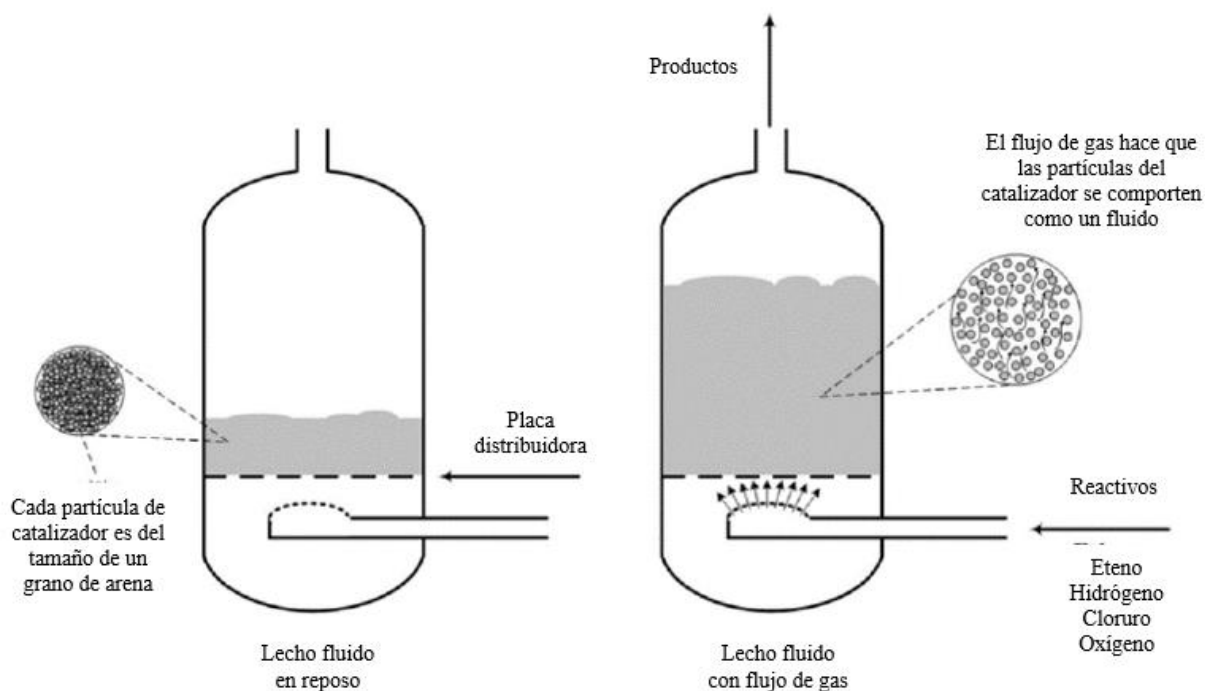
Fuente: Anuea, *et al.* 2016

Reactor de lecho fluidizado

El reactor de lecho fluidizado se compone de una mezcla de fluido y sólido que presenta propiedades semejantes a las de un fluido. Este efecto se logra comúnmente mediante la introducción de un fluido presurizado a través de la sustancia sólida particulada. Los reactores de

lecho fluidizado son apreciados en aplicaciones de pirólisis rápida debido a su capacidad para facilitar una rápida transferencia de calor, un control eficaz del proceso de pirólisis y del tiempo de residencia del vapor, una amplia superficie de contacto entre el fluido y el sólido por unidad de volumen del lecho, un eficiente transporte térmico dentro del sistema y una elevada velocidad relativa entre las fases fluida y sólida. A continuación, se detallan distintos tipos de reactores de lecho fluidizado (Jahirul, *et al.* 2012)

Figura 17: Esquema de pirólisis por medio de un reactor de lecho fluidizado



Fuente: Anuea, *et al.* 2016

Existen otros tipos de reactores de pirólisis:

- Reactor de lecho fluidizado burbujeante
- Reactor de lecho fluidizado circulante
- Reactor ablativo
- Reactor de vórtice
- Reactor de disco giratorio
- Reactor de pirólisis al vacío
- Reactor de cono giratorio
- Reactor de PyRos

- Reactor de barrena
- Reactor de plasma
- Reactor de microondas
- Reactores solares

(Jahirul, *et al.* 2012)

3. Productos de pirólisis

Los principales resultados de la pirólisis de biomasa comprenden carbón vegetal, gases permanentes y vapores que, a temperatura ambiente, se condensan en un líquido viscoso de tono marrón oscuro. La producción máxima de líquido se logra en el rango de temperaturas entre 350 y 500 °C, ya que los procesos de pirólisis generan diversas reacciones a distintas temperaturas. En consecuencia, a temperaturas más elevadas, las moléculas presentes en el líquido y el residuo sólido se descomponen, dando lugar a moléculas más pequeñas que enriquecen la fracción gaseosa. Para maximizar el rendimiento de los productos resultantes de la pirólisis de biomasa, se sugiere lo siguiente: (1) carbón vegetal: un proceso de baja temperatura y baja velocidad de calentamiento, (2) productos líquidos: un proceso de baja temperatura, alta velocidad de calentamiento y corto tiempo de residencia del gas, y (3) gas combustible: un proceso de alta temperatura, baja velocidad de calentamiento y largo tiempo de residencia del gas. La Figura 16 presenta un resumen de los productos generados en diversas condiciones de pirólisis. Además, los productos derivados de los procesos de pirólisis están fuertemente influenciados por el contenido de agua en la biomasa, que origina cantidades significativas de agua condensada en la fase líquida. Esto contribuye a la extracción de compuestos solubles en agua de las fases gaseosa y alquitrán, resultando en una disminución adicional de productos gaseosos y sólidos (Jahirul, Rasul, Chowdhury, & Ashwath, 2012).

Figura 18: Reacciones y productos de pirólisis a diferentes temperaturas

Condición	Procesos	Productos
Por debajo de 350 °C	Formación de radicales libres, eliminación de agua y despolimerización.	Formación de carbonilo y carboxilo, desprendimiento de CO y CO ₂ y principalmente un residuo carbonizado.
Entre 350 °C y 450 °C	Rotura de enlaces glicosídicos de polisacárido por sustitución.	Mezcla de levoglucosano, anhídridos y oligosacáridos en forma de fracción de alquitrán.
Por encima de 450 °C	Deshidratación, reordenamiento y fisión de unidades de azúcar.	Formación de compuestos carbonílicos como acetaldehído, glicoxal y acroleína.
Por encima de 500 °C	Una mezcla de todos los procesos anteriores.	Una mezcla de todos los productos anteriores.
Condensación	Los productos insaturados se condensan y se adhieren al carbón.	Un residuo de carbón altamente reactivo que contiene radicales libres atrapados.

Fuente: Jahirul, *et al.* 2012

El bioaceite derivado de la pirólisis es el fluido resultante de la condensación del vapor durante una reacción de pirólisis. Presenta la posibilidad de servir como un reemplazo del fueloil, ya que los bioaceites poseen valores caloríficos que oscilan entre el 40% y el 50% de los combustibles basados en hidrocarburos. Las principales ventajas de los combustibles líquidos obtenidos mediante pirólisis incluyen:

- La huella de CO₂ es positiva en los biocombustibles derivados de biomasa
- Factible para su aplicación en sistemas de generación de energía tanto a pequeña como a gran escala
- Facilidad de almacenamiento y transporte de los combustibles líquidos resultantes
- Alta densidad energética en comparación con los combustibles gaseosos generados a partir de la gasificación de biomasa
- Posibilidad de utilizar el líquido de pirólisis en instalaciones eléctricas preexistentes.

Los aceites de pirólisis, comúnmente conocidos como biopetróleo o biocrudo, están compuestos por una compleja mezcla de compuestos oxigenados. Este bioaceite contiene diversos grupos funcionales químicos, como carbonilos, carboxilos y fenólicos, que ofrecen tanto oportunidades como desafíos para su aplicación. No obstante, existen numerosos factores

desconocidos que afectan las propiedades termofísicas del bioaceite de pirólisis. Los bioaceites de pirólisis presentan limitaciones en cuanto a la calidad del combustible, separación de fases, estabilidad, problemas de incrustaciones en el procesamiento térmico y la viabilidad económica del bioaceite de pirólisis. Se describen algunas propiedades físicas y características del bioaceite en la Figura 17.

Figura 19: Propiedades físicas y características del bioaceite de pirólisis

Propiedades	Características del aceite	Razones
Apariencia	Marrón rojizo oscuro a verde oscuro	Microcarbono y composición química en el petróleo.
Olor	Olor distintivo: un olor acre a humo	Aldehídos y ácidos de menor peso molecular.
Densidad	Muy alto en comparación con los combustibles fósiles Bioaceite de pirólisis: 1,2 kg/litro Aceite fósil: 0,85 kg/litro	Alta humedad y contaminación de moléculas pesadas.
Viscosidad	Puede variar desde tan solo 25 centistokes (cSt) hasta tan alto como 1000 cSt	Amplia gama de materias primas, contenido de agua y cantidad de restos ligeros recogidos
Valor de calentamiento	Significativamente más bajo que el petróleo fósil	Alto contenido de oxígeno
Envejecimiento	Con el tiempo se produce un aumento de la viscosidad, una disminución de la volatilidad, una separación de fases y una deposición de la goma.	Estructura compleja y alto valor de pH.
miscibilidad	Miscible con disolvente polar pero totalmente inmiscible con combustible de petróleo.	De naturaleza polar

Fuente: Jahirul, *et al.* 2012

E. TIPOS DE ANÁLISIS

1. Análisis termogravimétrico

El análisis termogravimétrico (TGA) constituye un método de análisis térmico mediante el cual se mide la masa de una muestra a lo largo del tiempo, a medida que varía la temperatura o se mantiene constante durante un intervalo específico. Este método se emplea para examinar las propiedades y composición de los materiales, evaluar las tasas de descomposición y evaporación, analizar la oxidación, verificar la pureza del material, entre otras propiedades. Se emplea principalmente para evaluar la estabilidad térmica de un material, determinar el contenido de relleno en polímeros, medir la presencia de humedad y disolventes, así como analizar la composición porcentual de los elementos en un compuesto. En consecuencia, este método cuenta con diversas aplicaciones en el ámbito del control de calidad y los ensayos (INFINITIA, 2022).

El análisis termogravimétrico implica elevar gradualmente la temperatura de una muestra en un horno mientras se registra el peso mediante una balanza analítica. Durante este procedimiento, la muestra se calienta en un entorno específico (aire, N₂, CO₂, He, Ar, entre otros) con una velocidad controlada, y posteriormente se calcula la pérdida de peso resultante, originada por compuestos semivolátiles, degradación de polímeros, así como análisis de humedad y cenizas. El TGA se lleva a cabo en etapas, en las cuales la temperatura interna del horno se incrementa linealmente o se mantiene constante para inducir una reacción térmica en la sustancia bajo análisis (INFINITIA, 2022).

A lo largo del proceso, se supervisa de manera continua la masa de la muestra para identificar cualquier cambio que pueda ocurrir en la misma. Por ende, según la temperatura o el tiempo transcurrido, es posible obtener y registrar la variación en el peso de la sustancia. La ejecución del TGA se realiza mediante un dispositivo conocido como analizador termogravimétrico, que consta de un horno que aloja un platillo de muestra apoyado sobre una balanza de alta precisión. A medida que se calienta, esta balanza, extremadamente sensible y posicionada fuera del horno, tiene la capacidad de registrar los cambios más ínfimos en la masa de la sustancia ubicada en el platillo de la muestra (INFINITIA, 2022).

Figura 20: Analizador termogravimétrico



Fuente: TEC INSTRUMENTAL, 2016

Tipos de análisis termogravimétricos

Hay tres categorías de análisis termogravimétrico que corresponden a distintas formas de someter la muestra al calor, mientras se registra el cambio de peso a lo largo del tiempo. Estas tres modalidades de TGA son las siguientes:

- Termogravimetría isotérmica o estática: La temperatura se mantiene invariable.
- Termogravimetría dinámica: La temperatura se ajusta de manera lineal.
- Termogravimetría casi estática: Se implementa una secuencia de temperaturas ascendentes.

Usos y aplicaciones del análisis termogravimétrico

- Control y garantía de calidad: Al evaluar la capacidad de un producto para resistir cambios en calor y temperatura, y al identificar los puntos de descomposición o evaporación, un análisis termogravimétrico puede verificar si un producto cumple con los estándares de calidad y estabilidad de la industria, asegurando su uso seguro.
- Determinación de la estabilidad térmica: Asimismo, el análisis termogravimétrico puede emplearse para exponer un producto, ya sea un polímero plástico, un gas, un adhesivo,

entre otros, al rango de temperaturas al que estará expuesto durante su uso habitual, con el propósito de asegurar que el producto cumpla con las expectativas durante su aplicación regular. Esto resulta útil, por ejemplo, en la detección de defectos y el control de calidad de componentes termoplásticos para identificar posibles fallas.

- Oxidación y combustión de los materiales: Las reacciones de oxidación son detectables y cuantificables mediante el análisis termogravimétrico, siendo esta una aplicación frecuente, especialmente en productos como las aleaciones de cobre, que demandan una notable resistencia a la oxidación.
- Análisis de materiales por TGA: Esta técnica emplea el calor para inducir reacciones y modificaciones físicas en los materiales, ya que el TGA ofrece una evaluación cuantitativa del cambio de masa en los materiales relacionado con las transiciones y la degradación térmica. En otras palabras, registra las alteraciones de masa debidas a procesos como deshidratación, descomposición y oxidación de una muestra en función del tiempo y la temperatura.

(INFINITIA, 2022)

2. Cromatografía de gases/masas

El GC-MS puede emplearse para analizar muestras líquidas, gaseosas o sólidas. La evaluación se inicia con el cromatógrafo de gases, donde la muestra se vaporiza eficientemente a la fase gaseosa y se separa en sus distintos componentes a través de una columna capilar recubierta con una fase estacionaria (líquida o sólida). Los compuestos son impulsados por un gas portador inerte, como helio, hidrógeno o nitrógeno. A medida que los componentes de la mezcla se separan, cada compuesto sale de la columna en un momento distinto, determinado por su punto de ebullición y polaridad. El período durante el cual un compuesto eluye se denomina tiempo de retención. El GC tiene la capacidad de desentrañar mezclas complejas o extractos de muestras que contienen una variedad de compuestos (ThermoFisher Scientific, 2024).

Una vez que los componentes han salido de la columna de GC, el espectrómetro de masas los ioniza y fragmenta mediante fuentes de ionización química o de electrones. Posteriormente, las moléculas y los fragmentos ionizados son acelerados a través del analizador de masas del instrumento, que comúnmente es un cuadrupolo o una trampa de iones. Es en esta etapa donde los iones se separan en función de sus diversas relaciones masa-carga (m/z). La recopilación de datos GC-MS puede realizarse en modo de escaneo completo, abarcando un amplio rango de relaciones

m/z, o en modo de monitoreo de iones seleccionados (SIM), para obtener datos específicos de masas de interés (ThermoFisher Scientific, 2024).

Los pasos finales del procedimiento incluyen la detección y análisis de iones, donde los iones fragmentados aparecen en función de sus relaciones m/z. Simultáneamente, las áreas bajo los picos son proporcionales a la cantidad del compuesto correspondiente. En el caso de la separación de una muestra compleja mediante GC-MS, se generarán múltiples picos en el cromatograma de gases, y cada pico produce un espectro de masas único que se emplea para la identificación de compuestos. Con el uso de extensas bibliotecas de espectros de masas disponibles comercialmente, es posible identificar y cuantificar compuestos desconocidos y analitos específicos (ThermoFisher Scientific, 2024).

Figura 21: Equipo GC-MS



Fuente: ThermoFisher Scientific, 2024

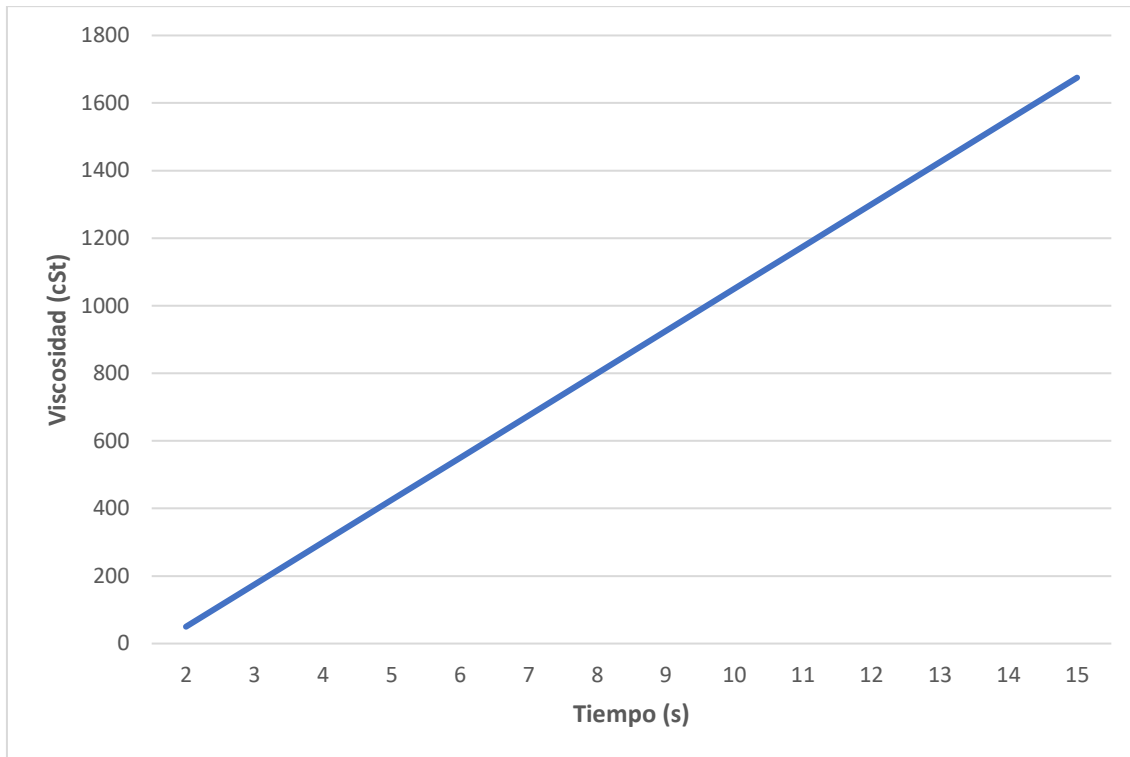
F. PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS

1. Viscosidad

La viscosidad es una propiedad fundamental que se debe determinar para los fluidos incompresibles, ya que su valor no solo afecta significativamente la conducción del fluido a lo largo del sistema de transporte, sino que también influye en el proceso en su totalidad. Se define la viscosidad como la relación entre la tensión de corte y la velocidad de corte de un fluido. Otra definición importante es que la viscosidad representa la resistencia al cambio de velocidad de un fluido, y este valor está sujeto a variaciones en función de la temperatura; a temperaturas más bajas, la viscosidad tiende a ser mayor, mientras que, a temperaturas más elevadas, tiende a ser menor. La viscosidad se mide comúnmente en centipoise (cP). Además, se encuentra la viscosidad cinemática, que es la relación entre la viscosidad dinámica previamente mencionada y la densidad del fluido. Al igual que la viscosidad dinámica, la viscosidad cinemática también experimenta variaciones en función de la temperatura, aunque estas variaciones suelen ocurrir en intervalos más estrechos (McCabe, Smith, & Harriott, 2007).

La viscosidad del bioaceite de pirólisis obtenido está influenciada por varios factores, entre ellos, el tipo de biomasa empleada, el método específico de pirólisis utilizado y la fracción de productos pesados obtenidos. Se han registrado algunos valores de viscosidad cinemática para bioaceites derivados de diferentes tipos de biomasa. Por ejemplo, se ha observado una viscosidad cinemática de 4.6 cSt para la pirólisis de residuos de madera de caoba, 50 cSt para la pirólisis de roble y 28 cSt para la pirólisis de madera de pino (Rodrigues, 2021).

Figura 22: Gráfica de relación de viscosidad vs tiempo de desplazamiento



Fuente: INDUCOM Ecuador, 2023

2. Densidad

La densidad de un material proporciona información sobre cuánta masa se encuentra en una unidad de volumen específica de dicho material. Definida como la masa dividida por el volumen, la densidad es una medida que indica cuán compacta está la sustancia. Representa una propiedad física única de un objeto particular. La fórmula para calcular la densidad es conocida y se utiliza comúnmente en ciencias y matemáticas. El símbolo ρ se emplea para representar la densidad, y a veces, también se utiliza la letra D. Este concepto fundamental fue descubierto por el científico griego Arquímedes (BYJUS, 2023).

Ejemplos de materiales densos incluyen el hierro, el platino y el plomo, así como varias rocas y minerales. La densidad de estos materiales a menudo se asocia con una sensación de peso o dureza. Por otro lado, materiales menos densos, como el vidrio, el bambú, el aluminio y la espuma de poliestireno, pueden percibirse como más livianos. En términos generales, los sólidos tienden a ser más densos que los líquidos, ya que las partículas en los sólidos están más densamente

empaquetadas. Los líquidos, por otro lado, permiten que las partículas se deslicen unas sobre otras, lo que resulta en una menor densidad en comparación con los sólidos. Los gases, siendo el estado menos denso, tienen partículas que pueden moverse libremente en todo el espacio. La unidad de densidad del SI es kg/m^3 , por conveniencia usamos g/cm^3 para sólidos, g/ml para líquidos y g/L para gases (BYJUS, 2023).

La densidad, al igual que la viscosidad, puede ser influenciada por diferentes factores. Se han registrado valores de densidades para pirólisis de varios residuos. Algunos de ellos son: 0.95 kg/L para residuos de madera de caoba, 1.18 kg/L para pirólisis de roble y 1.24 kg/L para pirólisis de madera de pino (Rodrigues, 2021).

3. Poder calorífico

La capacidad calorífica se refiere a la cantidad de energía liberada por unidad de masa durante una reacción química de oxidación que ocurre en un combustible. Es importante destacar que muchos combustibles contienen principalmente hidrógeno y carbono en su composición. Cuando estos compuestos reaccionan con el oxígeno durante la combustión, generan agua, dióxido de carbono y liberan calor, el cual se convierte en energía (PRIMAGAS, 2023).

La medición del poder calorífico siempre se realiza en relación con la masa del combustible oxidado. Las unidades de medida varían según el estado del combustible, siendo las más comunes kcal/kg para combustibles sólidos, kcal/m^3 para combustibles gaseosos y kcal/l para combustibles líquidos. La determinación del poder calorífico de un combustible se lleva a cabo mediante dispositivos llamados bombas calorimétricas. A medida que aumenta el poder calorífico de un combustible, también lo hace la cantidad de energía que puede generar (PRIMAGAS, 2023).

Figura 23: Propiedades físicas y características de bioaceite de pirólisis

Propiedades	Características del aceite	Razones
Apariencia	Marrón rojizo oscuro a verde oscuro	Microcarbono y composición química en el petróleo.
Olor	Olor distintivo: un olor acre a humo	Aldehídos y ácidos de menor peso molecular.
Densidad	Muy alto en comparación con los combustibles fósiles Bioaceite de pirólisis: 1,2 kg/litro Aceite fósil: 0,85 kg/litro	Alta humedad y contaminación de moléculas pesadas.
Viscosidad	Puede variar desde tan solo 25 centistokes (cSt) hasta tan alto como 1000 cSt	Amplia gama de materias primas, contenido de agua y cantidad de restos ligeros recogidos
Valor de calentamiento	Significativamente más bajo que el petróleo fósil	Alto contenido de oxígeno
Envejecimiento	Con el tiempo se produce un aumento de la viscosidad, una disminución de la volatilidad, una separación de fases y una deposición de la goma.	Estructura compleja y alto valor de pH.
miscibilidad	Miscible con disolvente polar pero totalmente inmisible con combustible de petróleo.	De naturaleza polar

Fuente: Jahirul, *et al.* 2012

Figura 24: Propiedades fisicoquímicas de bioaceite de pirólisis a partir de diversas materias primas de biomasa

	Contenido de humedad (% en peso)	pH	Viscosidad mm ² /s	VHH (MJ/kg)	VHL (MJ/kg)
Diesel	-	1	2.39	44,7	42,5
Madera	15–30	2.5	40-100	dieciséis	19
Sauce	17.4	2,68	53.2	18.4	16.8
Paja	47,4	3.45	17.2	13.6	11.6
Hierba dulce	24.7	2,87	34.2	16.4	14.8
<i>Dactylis glomerata</i>	43.05	3.12	9.2	17.6	15.7
<i>Festuca arundancia</i>	34.1	3.18	10.9	16.7	14.5
<i>Lonium perenne</i>	48	3.16	6.5	15.8	13.7
Alpiste de caña	23.2	3.01	31,6	17.1	15.3
Cáscara de arroz	27.2	2.8	128	-	16.4
tallo de maíz	26,9	2.3	140	-	16.8
Charla de algodón	26,7	2.6	156	-	17.2
Serrín	24	2.1	140	-	17.4
Conchas de palma	10	2.7	14.6	-	20.6

Fuente: Jahirul, *et al.* 2012

La Bomba Calorimétrica, denominada "TBCF", comprende diversos componentes que incluyen un calorímetro, un recipiente calorimétrico, una camisa de agua de doble pared externa, una unidad de control para el encendido/apagado del agitador y el dispositivo de encendido, un termómetro de precisión y una unidad de carga con manómetros para simplificar el llenado del calorímetro con oxígeno. El recipiente calorimétrico y la pared de la camisa exterior están contruidos con acero inoxidable.

Esta bomba calorimétrica es un contenedor elaborado con acero inoxidable, diseñado para resistir altas presiones y sellado mediante un cierre roscado. Se carga de gas (oxígeno) a través de una válvula de llenado. Este dispositivo se introduce dentro de un recipiente calorimétrico hecho de acero inoxidable, el cual se llena con agua y simultáneamente se coloca dentro de una camisa de agua de doble pared. La varilla del calorímetro sostiene un crisol metálico. La bomba

calorimétrica, que contiene la muestra de combustible a quemar, es hermética gracias al cierre de la válvula de llenado y la tapa.

El proceso de combustión se inicia mediante un alambre delgado momentáneamente calentado al rojo vivo por el paso de una corriente eléctrica a través de un terminal aislado y la varilla, conectada eléctricamente a la tapa. El agua del recipiente calorimétrico se agita automáticamente mediante un agitador accionado por un motor pequeño. La parte superior de la camisa de doble pared se cierra con una tapa que presenta orificios, uno de los cuales permite el paso de un termómetro de precisión para medir la temperatura del recipiente calorimétrico. Otros orificios se utilizan para fijar la camisa a la tapa y uno adicional se emplea para insertar el cable que suministra la corriente eléctrica a la varilla.

El equipo también incluye una unidad de control que activa/desactiva el agitador y el dispositivo de encendido mediante el calentamiento del alambre, así como una unidad de carga con manómetros para facilitar el llenado del calorímetro con oxígeno.

G. MUESTREO

El muestreo es un conjunto de técnicas estadísticas que facilita el análisis y la obtención de conclusiones sobre un tema específico mediante la selección de un pequeño subgrupo o muestra de elementos. A partir de este grupo reducido, se busca extrapolar o inferir conclusiones que se puedan aplicar al conjunto completo de individuos de interés, es decir, la población. Para que las conclusiones sean válidas y aceptables, es esencial que la muestra sea lo más representativa posible de la población en su totalidad. Esto implica que la muestra debe reflejar las características clave de la población, abarcando tanto sus similitudes como sus diferencias.

Las técnicas de muestreo permiten definir los criterios para seleccionar los elementos a estudiar, determinar el tamaño de la muestra, y tener en cuenta los recursos humanos, el tiempo y el presupuesto necesarios para completar el estudio con éxito. En el contexto actual, donde las predicciones y el análisis sobre cualquier objeto de estudio (como mercados, investigaciones científicas, medio ambiente, opiniones, calidad o cultura) suelen realizarse sobre poblaciones extensas, el muestreo se convierte en una herramienta estadística esencial, ya que no es factible examinar a cada individuo de una población grande.

Para seleccionar la técnica de muestreo adecuada para un estudio, encuesta o investigación, es crucial definir y delimitar el universo desde el comienzo del proyecto, así como especificar los elementos que integrarán la muestra. Cada muestra pertenece a una población, por lo que, si se cuentan con varias poblaciones, será necesario obtener varias muestras. Las técnicas de muestreo son esenciales para obtener muestras estadísticas que se ajusten a los objetivos de las investigaciones, y son herramientas vitales en áreas diversas como la demografía, la biología y la política (UNIR, 2024).

Hay dos categorías principales de métodos de muestreo: uno es el muestreo aleatorio o probabilístico, y el otro es el muestreo no aleatorio o no probabilístico.

1. Muestreo aleatorio o probabilístico

Este tipo de muestreo, al seleccionar aleatoriamente los elementos del grupo muestra, asegura que cada individuo tenga la misma probabilidad de ser elegido, lo que garantiza un enfoque metodológico fiable y riguroso, al estar libre de sesgos que puedan afectar los resultados del estudio.

Las técnicas de muestreo dentro de esta categoría incluyen:

- Muestreo simple: Cada individuo de la población tiene la misma probabilidad de ser seleccionado. Este método es muy simple y ampliamente utilizado, aunque puede ser menos eficiente en poblaciones muy grandes, ya que el tamaño de la muestra puede ser considerablemente grande.
- Muestreo sistemático: Todos los individuos de la población se enumeran, luego se elige al azar el primer individuo para la muestra y se seleccionan los siguientes de manera periódica. Sin embargo, si la población presenta ciclos o periodicidades, este método puede resultar en una muestra con una homogeneidad alta que no represente adecuadamente a la población.
- Muestreo estratificado: La población se divide en estratos basados en características clave de interés para el estudio, y se seleccionan aleatoriamente los individuos de cada estrato. La cantidad de individuos de cada estrato en la muestra es proporcional a su número en la población total, lo que aumenta la representatividad y fiabilidad de la muestra.

- Muestreo por conglomerados: En lugar de seleccionar individuos directamente, se eligen aleatoriamente grupos o conglomerados dentro de la población, como un municipio dividido en pueblos. Este método se utiliza cuando la población se organiza en grupos naturales. (UNIR, 2024)

2. Muestreo no aleatorio o no probabilístico

Son técnicas de muestreo que se basan en criterios que no aseguran una probabilidad igual para la selección de los individuos de la muestra. Estos métodos suelen ser menos confiables que los aleatorios o probabilísticos, ya que ofrecen un menor grado de representatividad de la población y se utilizan en situaciones donde no se puede aplicar un muestreo probabilístico debido a restricciones de tiempo o costos, o cuando se realiza una investigación exploratoria que busca obtener una representación básica.

El muestreo no probabilístico se emplea en estudios en los que no es factible realizar un muestreo aleatorio debido a limitaciones de tiempo y presupuesto.

- Muestreo por cuotas: Se establecen características o condiciones representativas del estudio, y se selecciona un número específico de elementos que cumplen con estas características, determinando así el tamaño de la muestra. Conocer bien la población es crucial para elegir las variables adecuadas. Este método es común en encuestas de opinión.
- Muestreo intencional: Se eligen deliberadamente los elementos de la muestra o grupos representativos de la población, asumiendo que estos reflejarán la población general. Este método requiere un profundo conocimiento de las características esenciales de la población. Se usa frecuentemente en encuestas sobre intención de voto.
- Muestreo por cadena: Se seleccionan algunos elementos iniciales que están conectados o relacionados con otros elementos que se van incorporando a la muestra hasta completarla. Es útil en estudios de grupos marginales o sesgados, como los relacionados con delitos o enfermedades.
- Muestreo discrecional: Los elementos son escogidos de manera deliberada por el investigador, ya que se consideran los más adecuados para el objetivo del estudio. (UNIR, 2024).

Para la definición de la cantidad de muestra a recolectar, se debe saber la cantidad aproximada que se va a utilizar. En este caso, la cantidad de corridas teóricas son 8. Sin embargo, hay que tomar en cuenta que pueden existir errores a lo largo de la experimentación. Por ello, se recomienda recolectar una cantidad mayor a la necesaria, siendo entre 1.5 a 2 veces más de la cantidad necesaria. En el caso de esta experimentación lo recomendable es que la cantidad de muestra recolectada no baje de 1.0 kg de residuos de café de percoladora (UNIR, 2024).

V. ANTECEDENTES

A. SITUACIÓN ACTUAL DE LOS RESIDUOS DE CAFÉ

Los posos de café usados son el subproducto resultante del proceso de preparación del café y se consideran generalmente como desechos que se eliminan o se aprovechan como compost. La producción global de café genera más de 23 millones de toneladas de residuos anualmente, abarcando desde la pulpa de las cerezas frescas hasta el empaque de los granos tostados. Los posos de café utilizados, descartados tras cada preparación, destacan como un claro ejemplo de este desperdicio en la fase final de la cadena de consumo. Solo el 0.2 por ciento del grano de café se emplea para hacer una taza de café, dejando un 99.8 por ciento restante que se desecha (Sahai, 2021).

La industria del café tiene un impacto ambiental considerable, ya que cada etapa de su cadena de suministro consume energía, desde el cultivo hasta el procesamiento, transporte y tostado, generando así una huella de carbono. La actividad de consumir café resulta en la producción inevitable de posos de café usados, un subproducto que a menudo se descarta con otros desechos orgánicos. Sin embargo, este enfoque no siempre es sostenible. Cuando estos posos, junto con otros residuos del café, se depositan en vertederos, pueden tener consecuencias ambientales significativas. Dado que muchas áreas de cultivo de café albergan algunos de los ecosistemas más delicados del mundo, existe un riesgo elevado de daños catastróficos. Por lo tanto, la gestión de los residuos de café se está convirtiendo en un tema de importancia para garantizar un futuro más sostenible (Sahai, 2021).

B. APLICACIONES ACTUALES A LOS RESIDUOS DE CAFÉ

Empresarios visionarios y creativos, así como empresas consolidadas a nivel mundial, han buscado oportunidades para generar ingresos mediante la creación de productos valiosos a partir de los residuos de café. Estos innovadores han desarrollado artículos capaces de reciclar los desechos de café, contribuyendo así a convertir la industria cafetera en un sector más ecológico con una disminución significativa en la generación de residuos. En los últimos tiempos, ha surgido un gran número de compañías que han emprendido una gestión eficiente de los residuos de café, aprovechando tanto los posos usados como la pulpa de la cereza de café desechada para la creación

de nuevos productos. Estos incluyen papel, tinta, filamentos para impresoras 3D, carbón vegetal, textiles y una variedad de otros artículos. A continuación, se presentan algunos ejemplos de empresas emergentes que están utilizando residuos de café:

Bio-Bean

Bio-bean es una empresa con sede en Londres que ha ganado considerable atención de los medios e inversores debido a su iniciativa de recolectar los posos de café desechados por cafeterías en la ciudad y transformarlos en biocombustibles. Esta empresa se ha convertido en la primera en el mundo en industrializar este proceso y ha establecido con éxito una fábrica de 20,000 pies cuadrados en Londres, diseñada para procesar alrededor de 50,000 toneladas métricas de posos de café usados anualmente. Esto representa aproximadamente una décima parte de los residuos de café desechados en todo el mundo y el café consumido en el Reino Unido. Los posos de café procesados en esta planta se convierten en biodiesel, carbón para barbacoas y pellets de biomasa (Sahai, 2021).

Kaffeform

Durante sus estudios en Italia, Julian Lechner, un diseñador de productos, se cuestionó sobre el destino de los posos de café después de ser utilizados. Como respuesta a esta pregunta, Julian fundó una empresa que crea productos singulares y sostenibles, como tazas de espresso y capuchino, utilizando residuos de café molido y materias primas renovables (Sahai, 2021).

Singtex

Singtex ha obtenido una patente en Taiwán para un método innovador de fabricación de hilos utilizando residuos de café. Este proceso conserva las propiedades inherentes de los posos de café y las transfiere a la tela resultante. Los textiles fabricados con esta tecnología avanzada poseen propiedades antiolor naturales, se secan más rápidamente que el algodón y ofrecen una protección UV superior en comparación con este último. Además, la tela es fresca al tacto y puede reducir la temperatura de la piel. Este enfoque se emplea en la fabricación de diversos productos, que incluyen camisas, ropa de cama y calzado. Además, el aceite de café obtenido a partir del café molido se utiliza en la producción de cosméticos y prendas de vestir (Sahai, 2021).

Smile Plastics

Adam Fairweather ha establecido una empresa en el Reino Unido especializada en la producción de muebles de oficina con estilo mediante la utilización de posos de café desechados y plástico reciclado posconsumo. Los materiales resultantes, gracias a su acabado mate, exhiben una durabilidad excepcional, son resistentes al agua y a los arañazos, y no requieren procesos de lijado ni acabado adicional (Sahai, 2021).

C. PROCESOS DE PIRÓLISIS DE BIOMASA

El proceso de pirólisis de materia orgánica es altamente complejo y comprende una serie de reacciones simultáneas y sucesivas que ocurren cuando el material orgánico se calienta en un entorno no reactivo. Durante este proceso, la descomposición térmica de los componentes orgánicos de la biomasa inicia aproximadamente entre los 350 °C y 550 °C, y alcanza temperaturas entre 700 y 800 °C en ausencia de aire u oxígeno. Las largas cadenas de compuestos que forman el carbono, hidrógeno y oxígeno de la biomasa se descomponen en moléculas más pequeñas, generando gases, vapores condensables (como alquitranes y aceites) y carbón sólido durante la pirólisis. La velocidad y la extensión de la descomposición de cada uno de estos componentes están determinadas por diversos parámetros del proceso, como la temperatura del reactor de pirólisis, la velocidad de calentamiento de la biomasa, la presión, la configuración del reactor y la materia prima utilizada, entre otros (Jahirul, *et al.* 2012).

En muchos países en vías de desarrollo, se sigue utilizando cultivos alimentarios como maíz, caña de azúcar y soja para la producción de biodiesel y etanol, lo cual plantea preocupaciones sobre su sostenibilidad a largo plazo. Por ello, se están llevando a cabo investigaciones exhaustivas para desarrollar procesos que permitan la conversión de biomasa en hidrógeno, junto con otras alternativas que están siendo exploradas. Sin embargo, hasta el momento, ninguna de estas opciones se considera económicamente viable. Actualmente, se está depositando una gran esperanza en la biomasa lignocelulósica de alto rendimiento como fuente de materia prima para la producción de etanol y otros biocombustibles mediante procesos de pirólisis. A pesar de que la tecnología para convertir cultivos alimentarios en etanol está bien establecida, la conversión de biomasa en bioaceite mediante pirólisis todavía enfrenta desafíos significativos. Es necesario mejorar la comprensión de la tecnología de pirólisis para permitir una producción comercial a gran escala de manera eficiente utilizando biomasa (Jahirul, *et al.* 2012).

Entre las numerosas empresas dedicadas a la pirólisis rápida que han alcanzado un estado casi comercial, Ensyn y DynaMotive han sido líderes en América del Norte desde la década de 1990. Ambas compañías emplean biomasa renovable, residuos forestales y desechos agrícolas como materia prima. DynaMotive se centra en el desarrollo y la comercialización de sistemas energéticos respetuosos con el medio ambiente basados en combustibles derivados de la biomasa, mientras que Ensyn inicialmente se especializó en la utilización de productos químicos adicionales obtenidos del proceso para la ahumadura de alimentos y posteriormente amplió su enfoque hacia la producción de combustibles renovables a partir de biomasa. Otras dos empresas destacadas en la producción de bioaceite de pirólisis son Renewable Oil International y Pyrovac, que principalmente emplean tecnología de pirólisis al vacío. No obstante, existen numerosas plantas de producción de bioaceite de pirólisis a pequeña y mediana escala establecidas y operadas por diversas instituciones de investigación en todo el mundo. Algunas de estas instalaciones se detallan en la Figura 24 (Jahirul, *et al.* 2012).

Figura 25: Plantas operativas de pirólisis en el mundo

Tecnología de reactores	Organización/Ubicación	Capacidad (kg/h)	Producto deseado
Cama fija	Bioalternativa, EE.UU.	2000	Carbonizarse
Lecho fluidizado burbujeante	EL E	500	Gas
	DynaMotive, Canadá	400	Aceite
	MEJOR Energía, Australia	300	Aceite
	Wellman, Reino Unido	250	Aceite
	Unión Fenosa, España	200	Aceite
	Universidad de Zhejiang, China	20	Aceite
	RTI, Canadá	20	Aceite
	universidad de waterloo	3	Aceite
	Universidad de Zhejiang, China	3	Aceite
Lecho fluidizado circulante	Flecha Roja, Wisconsin; Ensyn	1700	quimicos
	Flecha Roja, Wisconsin; Ensyn	1500	quimicos
	Ensyn Ingeniería	30	Aceite
	VTT, Finlandia, Ensyn	20	Aceite

Fuente: Jahirul, *et al.* 2012

En la actualidad, los principales enfoques en la tecnología de pirólisis se centran en la generación de electricidad a partir de biomasa y en la reducción de las emisiones de CO₂, impulsados por los beneficios socioeconómicos asociados con la reutilización de tierras agrícolas excedentes y la búsqueda de independencia energética. Aunque se han establecido varias instalaciones (ver Figura 20), su viabilidad depende en gran medida de factores como el precio del petróleo, la disponibilidad y el coste de la biomasa, así como los costes locales y laborales. La mayoría de estos sistemas operan a escala piloto para fines de investigación, aunque algunos se han implementado en procesos industriales donde se generan electricidad, calor y vapor. Además, recientemente los investigadores están enfocando más esfuerzos en maximizar el rendimiento general de petróleo de los procesos de pirólisis, en lugar de centrarse adecuadamente en la calidad del producto y en la mejora del bioaceite (Jahirul, *et al.* 2012).

D. PIRÓLISIS DE RESIDUO DE CAFÉ

En la Universidad Nacional de Colombia se desarrolló un enfoque experimental para analizar la pirólisis de los posos de café, un residuo abundante en las plantas de procesamiento. Las características fisicoquímicas de estos posos sugieren un alto potencial para su utilización en procesos termoquímicos, lo que los convierte en una opción prometedora para proyectos futuros de biorefinería en el sector agroindustrial del café. La investigación experimental se dividió en tres fases. En la primera fase, se estableció y se ajustó un reactor en lecho fluidizado a escala de laboratorio con calentamiento por inducción magnética, lo que permitió operar dentro del rango de temperaturas de 450 a 600 °C con una velocidad de calentamiento de 900 °C/min. En la segunda fase, se llevó a cabo un análisis fluidodinámico de mezclas de cisco de café y arena sílice para determinar las condiciones óptimas de operación durante la pirólisis. En la última fase, se realizó un estudio paramétrico para evaluar el impacto de la temperatura y el tamaño de partícula en el rendimiento y la composición de los productos obtenidos durante la pirólisis de cisco de café. Los resultados experimentales indican que la temperatura tuvo un efecto significativo en el rendimiento y la composición del bioaceite, el biocarbón y los gases permanentes, mientras que el tamaño de partícula solo afectó el rendimiento del bioaceite y los gases permanentes. La máxima producción de bioaceite se logró cuando el reactor operó a 550 °C, con rendimientos de 51.39 % p/p para bioaceite, 19.21 % p/p para biocarbón y 29.40 % p/p para gases permanentes. El bioaceite obtenido se caracterizó por tener una alta concentración de compuestos oxigenados de bajo peso molecular, especialmente acetol, y por presentar un elevado contenido de humedad, lo que sugiere que predominaron las reacciones de fragmentación y deshidratación durante el proceso de

pirólisis. Los gases permanentes principales identificados fueron CO y CO₂, cuya proporción se vio notablemente influenciada por la temperatura, aunque el tamaño de partícula no mostró ser significativo dentro del rango estudiado. Además, se observó que la temperatura tuvo un impacto significativo en la morfología del biocarbón (Rivera, 2019).

Por otro lado, un equipo de ingenieros en Australia empleó posos de café tostado para mejorar la resistencia del hormigón hasta en un 30%, según un estudio reciente. Los ingenieros convirtieron los posos de café en biocarbón mediante un proceso llamado pirólisis, que implica calentar los residuos orgánicos sin oxígeno a una temperatura de 350 grados Celsius. Se espera que este biocarbón pueda sustituir una parte significativa de los aproximadamente 50.000 millones de toneladas de arena natural que la industria de la construcción extrae anualmente de lechos de ríos y costas para la fabricación de hormigón. Además, los investigadores confían en que este estudio, aún en sus etapas iniciales, contribuirá a combatir la crisis climática al reducir las emisiones de gases contaminantes asociadas con los aproximadamente 10.000 millones de kilogramos de residuos de café generados anualmente en todo el mundo (El Tiempo, 2023).

Por último, la Escuela de Ciencias Ambientales e Ingeniería de la Universidad de Tecnología de Guangdong en China, en colaboración con el Politécnico de Ingeniería de Protección Ambiental en Guangdong, ha llevado a cabo un estudio sobre la producción de biocombustibles a partir de residuos de café, titulado "Estudio sobre pirólisis al vacío de residuos industriales de café para la producción de bioaceite". Este estudio surge en respuesta a la creciente preocupación por la protección del medio ambiente y el interés mundial en la valorización energética de la biomasa a través de métodos como la pirólisis, gasificación o combustión. La pirólisis es un proceso de descomposición térmica que produce carbón vegetal con contenido de cenizas, volátiles y bajo peso molecular, siendo considerado como una forma eficaz de reciclar la energía de la biomasa. Aunque el calentamiento con un gas inerte como el nitrógeno es comúnmente utilizado, el método de pirólisis al vacío ha experimentado avances significativos en los últimos años. Este estudio aborda ambos métodos, destacando la importancia de los parámetros como la materia prima, tamaño de partícula, temperatura de pirólisis, presión, tiempo y velocidad de calentamiento. A través de diversas combinaciones de estos parámetros, se logró determinar los rendimientos de los productos y obtener muestras de bioaceite para su posterior caracterización. Los resultados obtenidos tienen como objetivo contribuir al desarrollo continuo de estos procesos de valorización de residuos de café, ofreciendo una vía adicional para la producción de biocombustibles junto con las opciones existentes (Chen, *et al.* 2017).

VI. METODOLOGÍA

A. RECOLECCIÓN DE MUESTRA DE RESIDUOS DE CAFÉ

Los residuos de café fueron obtenidos de los establecimientos de comida ubicados en la Universidad del Valle de Guatemala, especialmente del food truck de ventas de crepas, así como de bebidas a base de café. Estos desechos se guardaron en envases de vidrio con tapa para evitar la absorción de humedad y la contaminación por parte de insectos u otras sustancias ambientales. Dichos recipientes se almacenaron en áreas frescas, protegidas de la luz solar, hasta que la materia prima fuera procesada en el marco del trabajo de graduación.

B. ACONDICIONAMIENTO DE MUESTRA DE RESIDUOS DE CAFÉ

Cuadro 1: Equipo y cristalería para acondicionar las muestras de residuos de café

Equipos/Cristalería	Capacidad	Marca	Modelo
Analizador de humedad	120 g 40 °C – 230 °C	OHAUS	MB120
Balanza semi-analítica	6.0 kg	OHAUS	Valor3000Extreme
Estufa eléctrica	2000 W	Indurama	OVIEDO
Bandeja metálica	N/A	N/A	N/A
Frasco de vidrio	1.0 kg	N/A	N/A
Guantes térmicos	N/A	N/A	N/A

Fuente: Elaboración propia, 2024

1. Se debe pesar una muestra de 2 gramos y determinar el porcentaje de humedad utilizando el analizador de humedad.
2. Limpiar la bandeja metálica para eliminar cualquier residuo o sustancia presente en ella, asegurándose de secarla completamente para evitar agregar humedad a la materia prima.
3. Precalentar el horno de la estufa eléctrica a 110 °C.

4. Tarar el recipiente de almacenamiento utilizando la balanza semi-analítica y luego verter toda la materia prima recolectada para determinar la cantidad total de café que será sometida al proceso de secado.
5. Introducir la bandeja metálica con la materia prima en el horno de la estufa eléctrica y permitir que se seque.
6. Extraer muestras de 2 gramos cada hora y medir el contenido de humedad. Detener el proceso de secado cuando el nivel de humedad alcance entre 1.5% y 2.5%. Si el objetivo no se logra en un lapso de 6 horas, detener el secado de inmediato para evitar posibles daños a la materia prima debido a un tiempo prolongado de exposición al calor.
7. Con precaución y empleando guantes térmicos, retirar la bandeja metálica que contiene la materia prima del horno de la estufa eléctrica.
8. Volver a tarar el peso del frasco de vidrio que contiene la materia prima, luego agregar el café que ha sido desecado para determinar la cantidad total de materia prima disponible para el proceso de pirólisis.
9. Almacenar el recipiente de vidrio con la materia prima en un lugar fresco y cerrado herméticamente para proteger su contenido de las influencias del entorno.
10. Calcular la diferencia entre el peso de la materia prima húmeda y el peso de la materia prima seca para determinar la cantidad de agua eliminada durante el proceso de secado.

C. ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO

Cuadro 2: Equipo y cristalería para análisis termogravimétrico

Equipos/Cristalería	Capacidad	Marca	Modelo
3 frascos de vidrio	250 g	N/A	N/A

Fuente: Elaboración propia, 2024

1. Pesar 3 grupos de 50 g de muestra de café de percoladora seca y colocar cada grupo en un frasco de vidrio separado. Cerrar herméticamente cada frasco para prevenir la absorción de humedad por parte de la materia prima.
2. Transportar los tres frascos de vidrio al Centro Tecnológico de Cementos Progreso para someter cada una de las muestras de residuos de café de percoladora seco a un análisis termogravimétrico.

3. Se pueden visualizar los resultados obtenidos en las figuras 36 – 38 incluidas en la sección de Anexos.

D. PROCESO DE PIRÓLISIS

Cuadro 3: Equipo y cristalería para proceso de pirólisis

Equipos/Cristalería	Capacidad	Marca	Modelo
Balanza semi-analítica	6.0 kg	OHAUS	Valor3000Xtreme
Sistema condensación	N/A	CORNING	N/A
Mufla	25 °C – 1200 °C	Thermo Scientific	F6010
Reactor pirólisis	100 g	N/A	N/A
Beaker	250 ml	KIMAX	KIMBLE
Soporte universal	N/A	N/A	N/A
2 pinzas	N/A	N/A	N/A
3 mangueras de plástico	N/A	N/A	N/A
Bomba de agua	120 W	N/A	N/A
Termómetro digital láser	-35 °C – 535 °C	OAKTON	WD-20250-05
2 cubetas de plástico	20 L	N/A	N/A

Fuente: Elaboración propia, 2024

1. Preparación de la muestra

- a. Desmontar el reactor de pirólisis de 100 gramos y verificar que esté completamente libre de residuos en su interior.
- b. Pesarse en una balanza 50 g de la materia prima preparada según lo indicado en la sección A y colocarla en un beaker de 250 ml.

- c. Con precaución, introducir la muestra de materia prima previamente pesada en el reactor de pirólisis de 100 gramos. Luego, ensamblar nuevamente el reactor, asegurándose de que esté completamente sellado.

2. Montaje del sistema de pirólisis

- a. Introducir el reactor de pirólisis en el interior de la mufla.
- b. Insertar el tubo receptor de gases por la abertura superior de la mufla y roscarlo al reactor. Asegurarse de que esté enroscado adecuadamente.
- c. Llenar dos cubetas de plástico con agua y colocarlas en la zona designada.
- d. Colocar el soporte universal en la ubicación indicada y fijar las pinzas metálicas en él.
- e. Se ensambla el sistema de condensación y se fija utilizando las pinzas dispuestas en el soporte universal.
- f. Sumergir la bomba de pecera en uno de los recipientes de plástico que contienen agua.
- g. Conectar una de las mangueras de plástico al puerto de salida de la bomba y unirla a la parte inferior del condensador.
- h. La segunda manguera de plástico debe ser conectada en la parte superior del condensador y su extremo opuesto se une a la cubeta de plástico con agua donde está ubicada la bomba, de modo que el agua pueda circular en el sistema.
- i. La tercera manguera de plástico se coloca en la parte superior del sistema de condensación para los gases de la chimenea. Una botella de plástico se llena con agua y el extremo de la manguera se introduce en la botella, y luego se coloca todo el conjunto en la otra cubeta de plástico llena de agua. Esto se realiza para medir la cantidad de gases liberados durante el proceso.
- j. Se enciende la bomba y se conecta la mufla a la corriente eléctrica. Se verifica que todo el sistema esté configurado tal como se muestra en la Ilustración 6 de la sección de Anexos.

3. Corridas de pirólisis

- a. Utilizando el termómetro láser, se toma la temperatura del agua que circulará en el condensador.
- b. Se procede a encender la mufla, ajustándola inicialmente a una temperatura de 150 °C.
- c. Después, se debe aumentar gradualmente la temperatura de la mufla a dos tasas de calentamiento diferentes. Una de 15 °C por cada intervalo de 20 minutos y la otra a 15 °C por

cada intervalo de 30 minutos. Esto se hace para poder evaluar la eficacia a distintas velocidades de calentamiento.

- d. Una vez que comience a desprenderse el líquido, es necesario realizar pesajes cada 30 minutos para elaborar un gráfico de recuperación de líquido. Asimismo, se debe monitorear la botella que recoge los gases para determinar la cantidad liberada. Restando este valor, se puede obtener la cantidad de material sólido que permanece en el reactor.
- e. Al alcanzar los 300 °C de temperatura en la mufla, se procede a apagarla. Se extrae todo el producto líquido obtenido y se almacena en un frasco de vidrio con tapa.
- f. Se desarma todo el equipo de condensación y se guarda. Es necesario aguardar aproximadamente de 4 a 5 horas para permitir que el reactor se enfríe lo suficiente como para poder limpiarlo. Se recupera todo el material sólido remanente en su interior y se pesa.
- g. Este procedimiento debe ser repetido en tres ocasiones para cada una de las tasas de calentamiento sugeridas.

E. DETERMINACIÓN PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS

1. Densidad

Cuadro 4: Equipo y cristalería para cálculo de densidad de producto líquido

Equipos/Cristalería	Capacidad	Marca	Modelo
Balanza analítica	200 g	OHAUS	Pioneer
Probeta	10 ml	KIMAX	N/A

Fuente: Elaboración propia, 2024

- a. Medir el peso de la probeta utilizando una balanza analítica.
- b. Agregar una cantidad del producto líquido obtenido mediante el proceso de pirólisis dentro de la probeta y registrar los mililitros de producto líquido agregado.
- c. Colocar la probeta con el producto líquido sobre la balanza analítica y registrar su peso.
- d. Calcular la diferencia entre el peso de la probeta con el producto líquido y el peso inicial de la probeta para obtener el peso del producto líquido obtenido.
- e. Por medio de la relación entre masa y volumen, calcular la densidad del producto líquido obtenido del proceso de pirólisis.

2. Viscosidad

Cuadro 5: Equipo y cristalería para cálculo de viscosidad de producto líquido

Equipos/Cristalería	Capacidad	Marca	Modelo
Cronometro	+1000 s	Apple	iPhone 13
Probeta	25 ml	KIMAX	N/A
Varilla agitación	N/A	N/A	N/A
Regla	30 cm	BOLIK	N/A

Fuente: Elaboración propia, 2024

- a. Agregar entre 7 y 10 mililitros de producto líquido en la probeta.
- b. Utilizando una regla, ubicar la marca de 5 cm desde una de las puntas de la varilla de agitación hacia el centro. Realizar una marca visible en la varilla con un marcador a la altura de la medida mencionada anteriormente.
- c. Sumergir la varilla de agitación hasta que la parte superior del líquido alcance la marca realizada.
- d. Retirar la varilla de agitación de la probeta. Una vez que la varilla esté completamente fuera, comenzar a cronometrar con el teléfono móvil. Detener el tiempo cuando el líquido deje de fluir de manera constante y comience a gotear.
- e. Registrar el tiempo que tardó en comenzar a gotear el líquido. Obtener la viscosidad correspondiente al tiempo utilizando la Figura 21 como referencia.

3. Poder calorífico

Cuadro 6: Equipo y cristalería para cálculo de poder calorífico de producto líquido

Equipos/Cristalería	Capacidad	Marca	Modelo
Crisol	N/A	N/A	N/A
Bomba calorimétrica	2 L	IKA	C200

Fuente: Elaboración propia, 2024

- a. Extraer una muestra que no exceda los 0.1 g de ácido benzoico utilizando el crisol que ha sido pesado previamente. Verificar que el crisol esté completamente limpio antes de proceder con el pesaje.
- b. En el recipiente de disgregación de la bomba calorimétrica, añadir 1 ml de agua destilada. En el alambre de ignición, enrollar una mecha y hacer un nudo.
- c. Con precaución, situar el crisol conteniendo el ácido de modo que la mecha esté en su interior. Después, cerrar la rosca de la cámara de reacción.
- d. Después, durante 10 segundos, conectar la cámara a la válvula de oxígeno utilizando aire comprimido, que está fijada al cabezal de llenado.
- e. Una vez que la cámara de reacción esté lista, verter 2 litros de agua en el compartimento adecuado del "bucket" hasta alcanzar la marca indicada.
- f. En el recipiente de disgregación, fije el adaptador de encendido con cuidado, asegurándose de que esté correctamente conectado al alambre de ignición.
- g. Establecer la configuración necesaria en el panel. Recuerde que el valor 1 corresponde a la estandarización y el valor 0 corresponde a la prueba de muestra.
- h. Para realizar la medición de la muestra, siga los pasos anteriores, pero en lugar del reactivo, coloque la muestra, asegurándose de utilizar aproximadamente 0.1 gramos de la misma.

VII. RESULTADOS

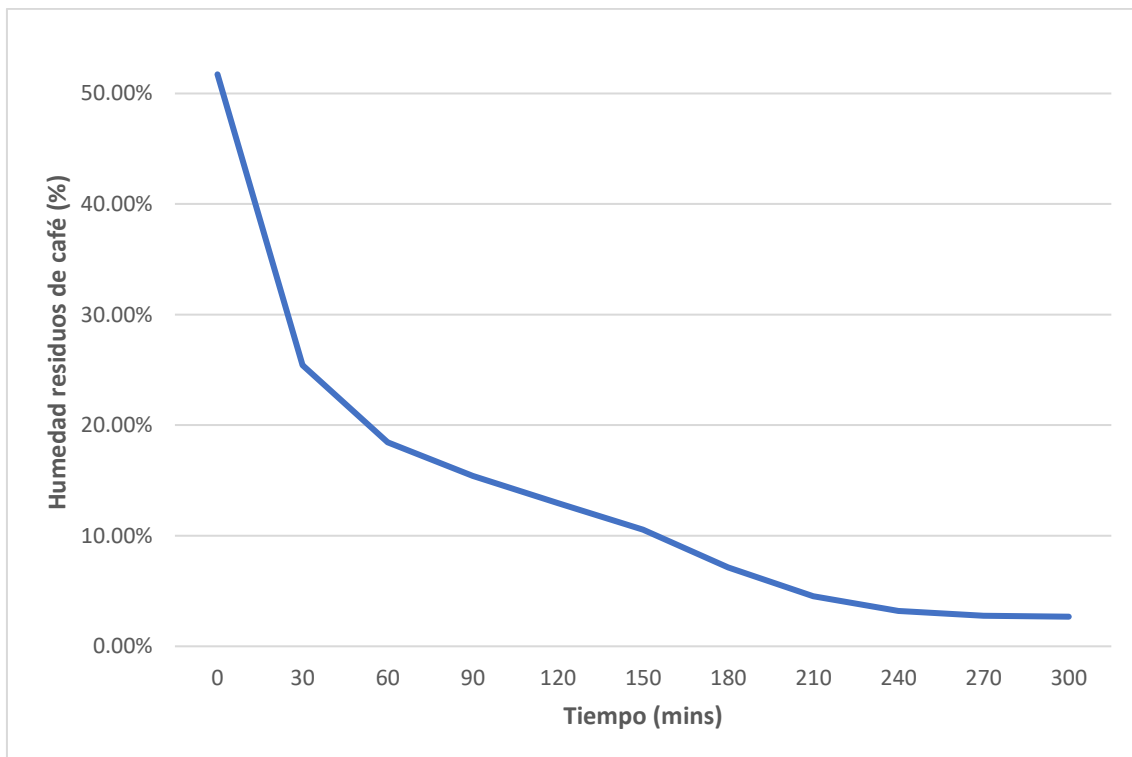
Cuadro 7: Humedad inicial y final de los residuos de café utilizados

Muestra	Humedad inicial	Humedad final	% humedad removida
Residuos de café de percoladora	51.73% ± 0.36%	2.68% ± 0.36%	94.82%

Fuente: Elaboración propia, 2024

Este Cuadro presenta los resultados generados por el proceso de secado llevado a cabo siguiendo la metodología sugerida. Los resultados presentados reflejan el análisis estadístico extraído de los Cuadros 27 y 28 de la sección de datos calculados.

Figura 26: Curva de secado de la muestra sometida a proceso de secado



Fuente: Elaboración propia, 2024

El gráfico que se presenta ilustra la curva de secado de los residuos de café de percoladora, creada utilizando Microsoft Word. Se empleó una muestra de 5.0 g de café para ejecutar el proceso de secado conforme a la metodología indicada. Los detalles específicos de la curva se pueden encontrar en el Cuadro 12 de la sección de datos originales.

Cuadro 8: Rango de temperaturas para proceso de pirólisis

Muestra	Rango de temperatura de operación (°C)	Temperatura experimental (°C)
Residuo de café	179.57 – 356.95	296.72

Fuente: Elaboración propia, 2024

El Cuadro previo muestra la gama de temperaturas en las cuales los residuos de café de percoladora experimentan una degradación significativa. Estos datos provienen de análisis realizados en el Centro de Tecnología de Cementos Progreso S.A.

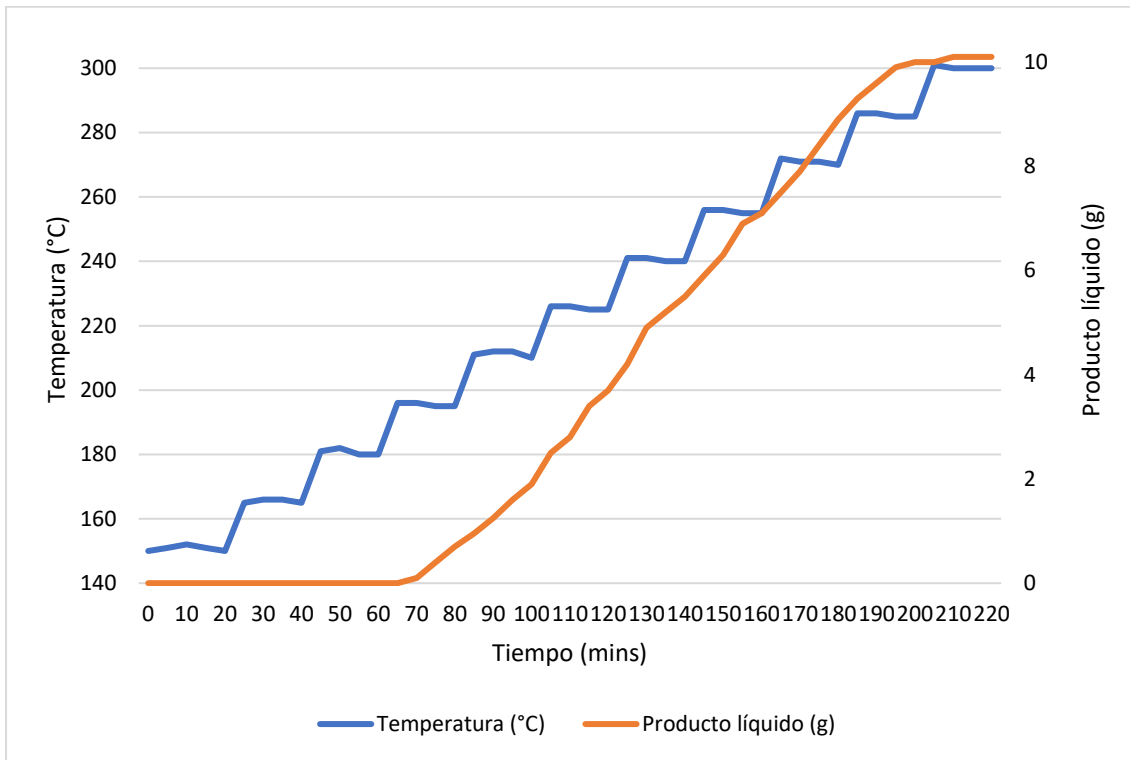
Cuadro 9: Comparación de producto líquido obtenido del proceso de pirólisis y su rendimiento obtenido

Tasa de calentamiento	Cantidad de muestra utilizada (g)	Cantidad de producto líquido obtenido (g)	Rendimiento del producto líquido
15°C/20 min	50.0 ± 0.1	10.5 ± 0.2	21.00% ± 0.20%
15°C/30 min	50.0 ± 0.1	13.6 ± 0.2	27.20% ± 0.41%

Fuente: Elaboración propia, 2024

El Cuadro anterior exhibe los datos relativos a la cantidad de materia prima empleada para cada una de las tasas de calentamiento utilizadas en el proceso de pirólisis. Los registros sobre la cantidad de producto líquido obtenido y sus rendimientos respectivos están detallados en los Cuadros 30 a 33 de la sección de datos calculados.

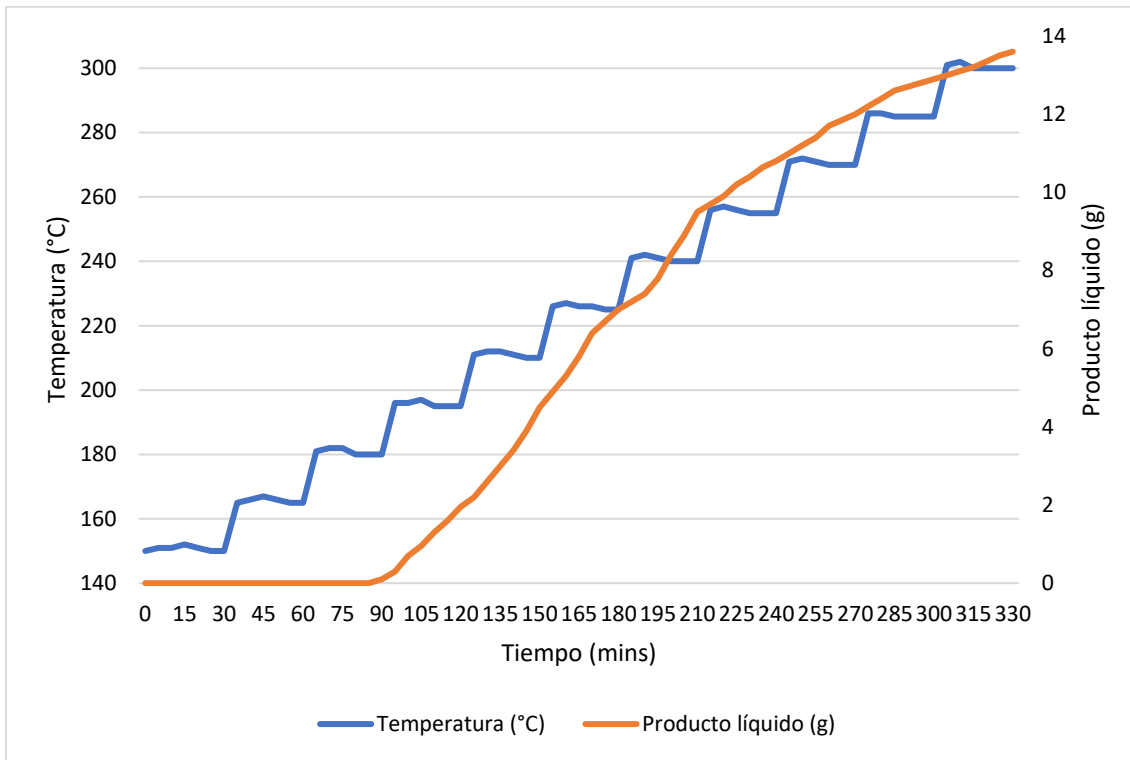
Figura 27: Comportamiento de la masa de producto líquido a lo largo del proceso de pirólisis con la primera tasa de calentamiento



Fuente: Elaboración propia, 2024

La gráfica siguiente ilustra la evolución de la masa del producto líquido obtenido durante las ejecuciones de pirólisis con una tasa de calentamiento de 15 °C cada 20 minutos. Además, muestra las distintas rampas de temperatura desde la tasa de calentamiento mencionada. Los datos utilizados para generar esta gráfica están disponibles en el Cuadro 15 de la sección de datos originales. El rango de temperaturas de operación del proceso de pirólisis se derivó de la información contenida en el Cuadro 29 de la sección de datos calculados.

Figura 28: Comportamiento de la masa de producto líquido a lo largo del proceso de pirólisis con la segunda tasa de calentamiento



Fuente: Elaboración propia, 2024

La gráfica siguiente ilustra la evolución de la masa del producto líquido obtenido durante las ejecuciones de pirólisis con una tasa de calentamiento de 15 °C cada 30 minutos. Además, muestra las distintas rampas de temperatura desde la tasa de calentamiento mencionada. Los datos utilizados para generar esta gráfica están disponibles en el Cuadro 16 de la sección de datos originales. El rango de temperaturas de operación del proceso de pirólisis se derivó de la información contenida en el Cuadro 29 de la sección de datos calculados.

Cuadro 10: Análisis de cromatografía de gases-masas del producto líquido con tasa de calentamiento 1

Pico	Tiempo de retención (min)	Área bajo la curva (%)	Compuesto
1	1.556	3.41	Acetaldehído
2	1.616	1.72	Amoníaco
3	1.653	3.00	Acetona
4	1.716	1.80	Agua
5	1.743	0.59	Agua
6	1.766	1.85	Propano
7	1.798	0.95	Agua
8	1.838	6.34	2,3-Butanodiona
9	1.989	3.55	Furano
10	2.080	0.24	Butanal
11	2.130	0.23	Ácido acético
12	2.289	3.82	Ácido acético
13	2.521	16.92	Ácido acético
14	2.598	7.06	2-propanona, 1-hidroxi-
15	2.730	0.65	Ácido propanoico
16	2.766	0.71	Étil metilpropílico
17	2.798	0.44	Ácido propanoico
18	3.062	3.82	Piridina
19	3.176	1.16	2-buten-1-ol
20	3.358	0.93	2-furanol, tetrahidro-5-furandiona
21	3.408	0.13	Pirazina
22	3.421	0.16	Pirazina, metilo-
23	3.576	3.92	Furfural
24	4.026	4.51	3-furanometanol
25	4.108	11.49	2-furanometanol

Pico	Tiempo de retención (min)	Área bajo la curva (%)	Compuesto
26	4.536	1.60	Etanona, 1-(2-furanyl)-
27	4.868	4.83	Butirolactona
28	5.282	1.25	2-butanona, 1-(acetiloxi)-
29	5.295	1.10	Piridina, 3,5-dimetil-
30	5.859	0.61	Ácido propanoico, 2-metil-anhídrido
31	6.087	1.03	Fenol
32	6.105	1.32	3-Metilpiridazina
33	6.401	1.01	1,2-ciclopentanodiona, 3-metil-
34	7.042	0.03	Etanona, 1-(1H-pirrol-2-il)-
35	7.451	1.00	3-penten-2-ol
36	7.706	4.92	Maltol
37	8.261	0.40	Butano, 1-bromo-2-metil-
38	8.566	0.03	2,5-furandiona, dihidro-3-metil-
39	8.702	0.19	4-piridazinamina
40	8.730	0.04	3-piridinol
41	9.239	0.22	3-piridinol, 6-metil-
42	11.986	0.25	1H-pirazol-5-amina, 3-metil-1-fenil
43	17.372	0.77	1H-purina-2,6-diona, 3,7-dihidro-1,3,7-trimetil-

Fuente: Universidad del Valle de Guatemala, 2024

Se exhiben los resultados obtenidos del análisis de cromatografía de gases-masas realizado en una muestra del producto líquido generado mediante el proceso de pirólisis con una tasa de calentamiento de 15 °C cada 20 minutos. Se proporcionan los datos relativos al tiempo de retención y el porcentaje de abundancia de los distintos compuestos identificados. Estos resultados fueron obtenidos por personal del Laboratorio de Análisis Instrumental Avanzada de la Universidad del Valle de Guatemala.

Cuadro 11: Análisis de cromatografía de gases-masas del producto líquido con tasa de calentamiento 2

Pico	Tiempo de retención (min)	Área bajo la curva (%)	Compuesto
1	1.561	12.26	Agua
2	1.616	6.56	Alcohol etílico
3	1.661	11.06	Acetona
4	1.707	5.66	Ácido butanoico, 3-3-dimetil-, éster metílico
5	1.775	10.24	1-propanol
6	1.807	4.71	Metano
7	1.834	8.25	2,3-butanodiona
8	1.998	0.92	Furano
9	2.248	11.92	Ácido acético
10	2.303	5.52	Heptano
11	2.621	2.96	Ácido propanoico
12	2.903	1.29	Piridina
13	3.049	1.28	Ciclopentanona
14	3.576	1.37	2-ciclopenten-1-ona
15	3.958	6.20	2-furanometanol
16	4.427	0.76	1-pentino
17	4.513	2.72	Etanona
18	5.778	3.29	Ácido propanoico, 2-metil-anhídrido
19	6.014	2.61	Fenol

Pico	Tiempo de retención (min)	Área bajo la curva (%)	Compuesto
20	6.819	0.42	Ácido propanoico, 2-metil-anhídrido

Fuente: Universidad del Valle de Guatemala, 2024

Se exhiben los resultados obtenidos del análisis de cromatografía de gases-masas realizado en una muestra del producto líquido generado mediante el proceso de pirólisis con una tasa de calentamiento de 15 °C cada 30 minutos. Se proporcionan los datos relativos al tiempo de retención y el porcentaje de abundancia de los distintos compuestos identificados. Estos resultados fueron obtenidos por personal del Laboratorio de Análisis Instrumental Avanzada de la Universidad del Valle de Guatemala.

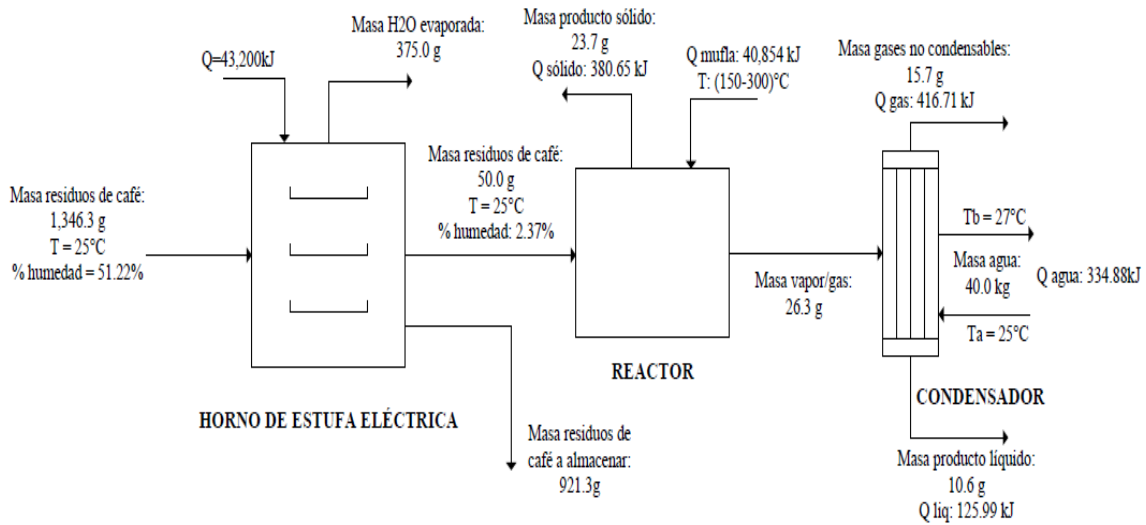
Cuadro 12: Propiedades fisicoquímicas del producto líquido obtenido del proceso de pirólisis

Tasa de calentamiento	Densidad (kg/m ³)	Viscosidad (cSt)	Poder calorífico (J/g)
15 °C/20 min	999.05 ± 39.96	8.10 ± 0.25	11,538 ± 175.26
15 °C/30 min	999.10 ± 39.95	7.83 ± 0.14	11,886 ± 181.13
Comparativo	Densidad (kg/m ³)	Viscosidad (cSt)	Poder calorífico (J/g)
Biodiésel	880	4.77	37,500
Diésel	850	3.33	42,600
Gasolina	750	0.8	43,500

Fuente: Elaboración propia, 2024

El Cuadro anterior muestra las propiedades fisicoquímicas calculadas del producto líquido obtenido mediante el proceso de pirólisis a diversas tasas de calentamiento. Así como propiedades fisicoquímicas de diferentes biocombustibles alternativos y combustibles convencionales de uso cotidiano hoy en día (RACE, 2023). Estas propiedades fueron calculadas siguiendo el procedimiento descrito en la sección de Metodología. Los datos calculados se localizan en los Cuadros 34 al 41 de la sección de Datos Calculados en los Anexos.

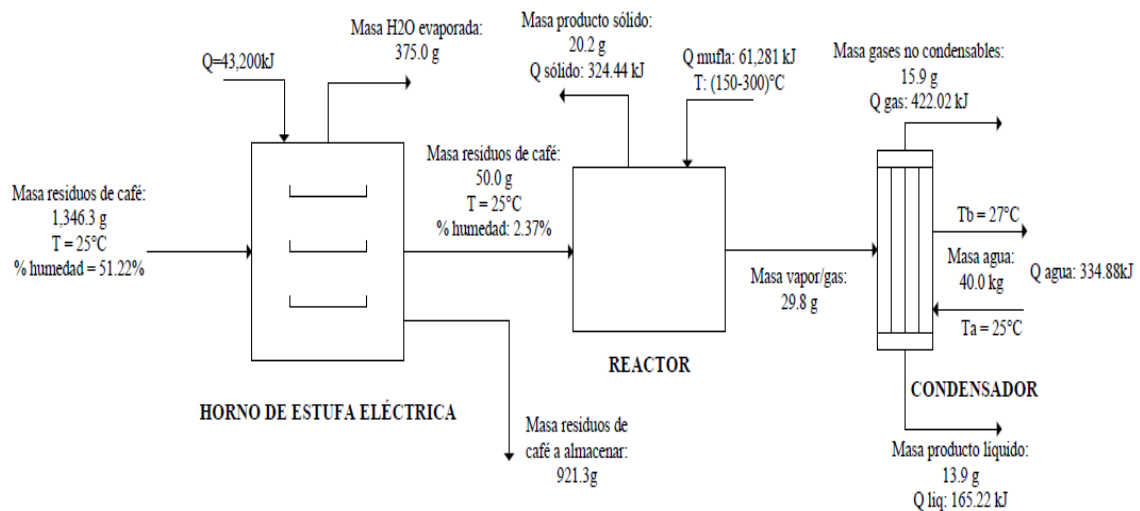
Figura 29: Balance de masa y energía del proceso de pirólisis con tasa de calentamiento 1



Fuente: Elaboración propia, 2024

La figura anterior ilustra el balance de masa y energía de la totalidad del proceso realizado para obtener el producto líquido. Dentro de este balance, se realizó el proceso de pirólisis con una tasa de calentamiento de 15 °C/20 min.

Figura 30: Balance de masa y energía del proceso de pirólisis con tasa de calentamiento 2



Fuente: Elaboración propia, 2024

La figura anterior ilustra el balance de masa y energía de la totalidad del proceso realizado para obtener el producto líquido. Dentro de este balance, se realizó el proceso de pirólisis con una tasa de calentamiento de 15 °C/30 min.

VIII. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En este trabajo de graduación, se llevó a cabo un proceso de pirólisis con diferentes tasas de calentamiento con el objetivo de obtener y examinar el producto líquido resultante. La materia prima consiste en los residuos de café de percoladora obtenidos de un restaurante especializado en la elaboración de bebidas de café. Este restaurante está situado en la Universidad del Valle de Guatemala.

Según el procedimiento descrito en la sección de Anexos “Metodología Muestreo”, se definió el objetivo del muestreo, el cual es obtener biocombustibles líquidos a partir de las muestras de residuos de café de percoladora recolectado. Además, se estableció un único sitio de muestreo, el cual fue el restaurante de la Universidad del Valle de Guatemala antes mencionado. Se diseñó el plan de muestreo en donde se estableció el tipo de residuo a recolectar y el sitio de recolección. Sin embargo, la técnica de recolección no se pudo seguir debido a los procedimientos que el restaurante utiliza, ya que ellos acumulan los residuos sólidos de café de percoladora en un envase y no utilizan un equipo específico para trasladarlos, como una cuchara estéril. Por otro lado, no se puede ingresar a hacer el muestreo debido a los procesos para solicitud de permiso, así como por temas de inocuidad. Sin poder ingresar al restaurante, no se tiene la certeza que sea el mismo tipo de café que se utilice para realizar todas las bebidas, pudiendo tener una mezcla de diferentes tipos de café en los desechos. Además, se desconoce si el proceso de producción sean las mismas, por ejemplo, que se realice a la misma temperatura, ya que si existen diferentes condiciones de operación, el café puede ser dañado. Luego de recolectada la muestra, esta se almacenó en un recipiente seco ubicado dentro de un lugar donde no tenía contacto con el sol y no estaba propenso a la humedad, con el propósito de mantener la muestra lejos de variables que pudieran afectar su composición, y con ello afectar los procedimientos de experimentación.

En primer lugar, se preparó la muestra la materia prima mencionada. Según se detalla en el Cuadro 7, la humedad inicial de esta materia prima fue del $51.73\% \pm 0.36\%$. La humedad se mantiene estable en diversas mediciones de muestras de la materia prima. Esto se debe a que todos los residuos de las bebidas de café preparadas en el restaurante se depositan en el mismo recipiente de almacenamiento antes de ser desechados. Dado que todos los residuos se encuentran en el mismo recipiente y en condiciones idénticas, las mediciones del porcentaje de humedad de la materia prima no experimentan muchas variaciones. Después de someterla a un proceso de secado en un horno de estufa eléctrica a $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 6 horas, la humedad final disminuyó a un 2.68%

$\pm 0.36\%$. El coeficiente de variación de la humedad inicial fue bajo (0.69%), ya que las muestras utilizadas en el análisis de humedad fueron consistentes entre las diferentes ejecuciones, como se muestra en el Cuadro 11 de la sección de Datos Originales. Además, los residuos utilizados provinieron de un mismo lote recolectado, lo que redujo la variabilidad en la humedad inicial de la materia prima. Respecto a la humedad final, se observa una situación similar a la antes mencionada. Para esto, se emplearon muestras del mismo lote que fue sometido al proceso de secado y se aplicaron las mismas condiciones durante el proceso, además se intentó mantener constante la cantidad de muestra para el análisis de humedad. Como resultado, se logró obtener un coeficiente de variación bajo (1.32%) y se eliminó más del 94% de la humedad inicial de la materia prima.

En el caso de los análisis realizados a la muestra recolectada, se utilizó el método aleatorio, ya que, para medir el porcentaje de humedad, se tomó una muestra de 3.0 g de los residuos recolectados y almacenados para poder medir la humedad presente en cada una de las muestras. Este procedimiento se realizó cuatro veces para obtener un promedio de la humedad inicial de la muestra recolectada. La misma cantidad de muestra y el mismo procedimiento se utilizaron para medir la humedad final de los residuos de café. El propósito principal de aplicar un proceso de secado a la materia prima es reducir al máximo la cantidad de agua presente en ella. Dado que se está utilizando un residuo orgánico, su contenido de agua es considerablemente alto, especialmente debido al contacto con el café de percoladora. Si la materia prima conserva un alto nivel de humedad, el proceso de pirólisis puede resultar afectado, ya que el producto líquido final contendrá una proporción considerable de agua, lo que afectaría su capacidad calorífica. Por lo tanto, el primer paso es acondicionar la muestra lo que para este estudio y aplicación significa secar la materia prima previamente al proceso de pirólisis. Se seleccionó una temperatura de secado de $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ con el fin de eliminar la mayor cantidad de agua posible, aprovechando una temperatura ligeramente superior al punto de ebullición del agua y con esto, se evitan daños en la materia prima debido a temperaturas más elevadas. El período de secado de 6 horas se determinó considerando el consumo energético asociado con este proceso, especialmente al utilizar un horno de una estufa eléctrica, cuyo consumo de energía podría aumentar significativamente. Además, al analizar las mediciones de cambio de masa para obtener la curva de secado (Figura 25), se observó que a partir de la quinta hora de secado (300 minutos), la masa de la materia prima permanecía constante. Por lo tanto, considerando este comportamiento junto con el alto consumo energético implicado, se decidió detener el proceso de secado, logrando así una baja humedad final en la materia prima, lista para ser sometida al proceso de pirólisis.

En contraste con lo mencionado por Dighero en 2023, quien sugiere una humedad inicial recomendada del 30-33% para llevar a cabo el proceso de pirólisis de materia orgánica, se observa que la humedad final alcanzada en los residuos de café tras el secado sugiere que no debería haber inconvenientes en la obtención de los diferentes productos. Sin embargo, es importante tener en cuenta que la humedad inicial de la materia prima en el proceso de pirólisis de residuos orgánicos puede variar dependiendo del tipo de residuo y de sus condiciones de almacenamiento. En general, esta humedad suele ser relativamente alta en comparación con otros procesos industriales. La eficiencia del proceso de pirólisis se ve afectada por la competencia del agua con los productos deseados durante la reacción de pirólisis, lo que puede influir en la calidad y cantidad de los productos finales como el biochar, biogás y aceite bio-crudo. Por lo tanto, antes de someter la materia prima a la pirólisis, es común llevar a cabo un proceso de secado para reducir su contenido de humedad a un nivel óptimo, lo que contribuirá a maximizar los rendimientos de los productos deseados.

Por otro lado, el proceso de preparación de la materia prima fue de suma importancia, ya que se requería realizar un análisis termogravimétrico de los residuos que serían empleados, con el propósito de entender las condiciones de descomposición de esta. Como se evidencia en las Figuras 36 a 38 y en el Cuadro 29, el intervalo de temperatura donde ocurre la mayor degradación de la materia prima se encuentra entre 179 °C y 357 °C. No obstante, considerando el intervalo mencionado anteriormente, se estableció que el rango experimental del proceso de pirólisis comenzará a 150 °C y llegará hasta los 300 °C, de manera que se asemeje al intervalo obtenido en los análisis termogravimétricos. Esto se realiza con el fin de evitar someter la muestra, que contiene un cierto porcentaje de humedad, a una temperatura inicial alta que pueda afectar la obtención del producto líquido, el cual es de nuestro interés.

Uno de los posibles inconvenientes que pudo surgir durante el proceso de secado de la materia prima fue que, al ser un procedimiento estático, la mayor parte del calor proveniente del horno de la estufa eléctrica afectó principalmente las capas externas o superficiales de los residuos de café. Esto sugiere que las capas intermedias recibieron la cantidad necesaria de calor para eliminar eficazmente el agua de su composición. Sin embargo, como se evidencia en el Cuadro 13, la humedad final de la materia prima mostró una variación mínima. Al realizar un análisis estadístico de los datos de humedad, se obtuvo un coeficiente de variación del 1.32%, lo que indica que el proceso de secado no fue uniformemente eficiente. Por otro lado, otro aspecto que podría haber

afectado el proceso fue el hecho de que, para construir la curva de secado representada en la Figura 25, era necesario abrir el horno donde se llevaba a cabo el secado. Esto ocasionaba una pérdida de calor del sistema de secado hacia el entorno al sacar y volver a introducir la muestra para continuar con el proceso. Como resultado, se generaba un desequilibrio dentro del horno, lo que no permitía que el secado fuera completamente uniforme a lo largo de las 6 horas de duración del proceso.

Con el rango de temperatura de operación para el proceso de pirólisis establecido, se optó por mantener constante la alimentación de materia prima al reactor en todas las ejecuciones, permitiendo así una comparación directa de la cantidad de productos obtenidos por operación y su rendimiento, con especial atención en el producto líquido. La pirólisis lenta se caracteriza por ser tener tasas de calentamiento cuidadosamente seleccionadas, permitiendo que el calor se transfiera gradualmente al material orgánico. Esta elección de una velocidad controlada de calentamiento permite maximizar la eficiencia y selectividad de los productos obtenidos. Esto se logra mediante un control preciso de la temperatura en diferentes etapas del proceso, evitando así una descomposición excesiva de la materia prima y la formación de subproductos no deseados. Dado que se trata de una pirólisis de velocidad lenta, se seleccionaron dos tasas de calentamiento para evaluar los rendimientos de obtención de producto líquido en cada una. Cabe recalcar que la pirólisis lenta de residuos de café de percoladora es una tecnología emergente que ofrece numerosos beneficios ambientales, económicos y energéticos. Este proceso se destaca por su capacidad para gestionar eficazmente los residuos orgánicos, transformándolos en productos valiosos como biochar, bioaceite y gases pirolíticos, en lugar de ser desechados en vertederos y generar emisiones de metano. Al reducir significativamente la cantidad de residuos sólidos y minimizar los impactos ambientales, esta tecnología contribuye a la sostenibilidad. Además, los productos resultantes tienen aplicaciones energéticas que pueden generar energía renovable, con el bioaceite sirviendo como combustible para calderas y motores, y los gases pirolíticos para la generación de electricidad y calor. El biochar, por su parte, ofrece beneficios agrícolas al mejorar la retención de agua y nutrientes en el suelo, actuar como sumidero de carbono y reducir la necesidad de fertilizantes químicos. Económicamente, la pirólisis lenta es viable debido a la diversificación de productos y el valor agregado a los residuos. La tecnología es flexible y escalable, adaptándose a diferentes tamaños de producción y necesidades específicas, y puede integrarse con otras tecnologías de gestión de residuos y producción de energía. Finalmente, promueve la economía circular al reutilizar desechos y convertirlos en recursos útiles, apoyando prácticas sostenibles en la industria y la agricultura.

La primera tasa de calentamiento para llevar a cabo el proceso de pirólisis lenta fue de 15 °C cada 20 minutos. Según los datos del Cuadro 9 de la sección de Resultados, en promedio se obtuvieron 10.5g \pm 0.2g de producto líquido en las cuatro ejecuciones realizadas, lo que equivale a un rendimiento del 21.00% \pm 0.20% respecto a la cantidad de materia prima alimentada. La segunda tasa fue de 15 °C cada 30 minutos. Según los datos del mismo Cuadro, la cantidad promedio de producto líquido obtenido en las ejecuciones a esta tasa de calentamiento fue de 13.6g \pm 0.2g, manteniendo siempre una alimentación de 50.0g de materia prima. En cuanto al rendimiento, este fue superior al anterior, alcanzando un 27.20% \pm 0.41%. Este leve aumento en la cantidad de producto líquido obtenido puede atribuirse al mayor tiempo de exposición de la materia prima al calor proporcionado por la mufla en la segunda tasa de calentamiento, lo que favorece la degradación de la materia para la obtención de los diversos productos, específicamente el líquido. Se observó que la cantidad de producto sólido disminuyó, mientras que la producción de productos gaseosos se mantuvo similar en ambas tasas de calentamiento, como se detalla en los Cuadros 17 y 18 de los Datos Originales. No se llevaron a cabo más pruebas con diferentes tasas de calentamiento debido a los altos costos energéticos asociados con la realización de las pruebas adicionales requeridas para obtener un análisis estadísticamente confiable. Además, no se disponía de la cantidad suficiente de materia prima para llevar a cabo estas pruebas adicionales. Como resultado, se tendría que haber procesado un lote diferente de materia prima para el secado, el cual no tendría el mismo contenido de humedad que los resultados obtenidos con las tasas de calentamiento ya establecidas. Esto habría generado variaciones en la cantidad de producto líquido obtenido, afectando así los rendimientos.

En cuanto al comportamiento del producto líquido durante el tiempo de operación del proceso de pirólisis, en la tasa de calentamiento de 15 °C cada 20 minutos, la recuperación de producto líquido mostró una tendencia casi lineal a lo largo de las dos horas y media en las que se recuperó el líquido, hasta alcanzar los 300 °C durante 20 minutos. Sin embargo, se observa un cambio en esta tendencia alrededor del minuto 190 aproximadamente, donde la recuperación del producto líquido pasa de ser lineal a casi constante. Esto significa que la cantidad de producto líquido recuperado en la última media hora de operación es mínima en comparación con el resto del tiempo. Por lo tanto, se puede concluir que, si el tiempo de operación hubiera sido prolongado, es decir, si el intervalo de temperatura hubiera sido extendido, la recuperación durante ese tiempo adicional habría sido insignificante y solo habría aumentado el consumo energético del proceso, generando un resultado negativo en contraposición a los objetivos buscados en este trabajo.

En el caso del comportamiento del producto líquido con la tasa de calentamiento de 15 °C cada 30 minutos, se observó una tendencia de recuperación de líquido casi lineal durante aproximadamente dos horas a partir del momento en que comenzó la recuperación del material líquido. Después de estas dos horas, entre los minutos 220 y 330 de operación, la recuperación mostró una ligera tendencia decreciente. Sin embargo, a diferencia del comportamiento observado en la primera tasa de calentamiento, no se observó una tendencia hacia una recuperación casi nula a partir de cierto punto de la operación. En este caso, ocurre lo opuesto, ya que, si el rango de temperatura de operación hubiera sido mayor, la recuperación de producto líquido habría sido significativa, lo que habría aumentado el rendimiento del producto líquido. En comparación, en la operación con la otra tasa de calentamiento, donde el rendimiento habría sido casi igual al obtenido si se aumentaba el rango de temperatura. No obstante, la decisión de no ampliar el rango de temperatura de la tasa de calentamiento de 15 °C/30 min se debió al deseo de mantener una comparación en el mismo intervalo de temperatura de operación. En lugar de variar la temperatura, se optó por ajustar el tiempo de contacto de la materia prima con el calor proporcionado por la mufla al reactor. Por lo tanto, para evaluar el rendimiento de la tasa de calentamiento de 15 °C/30 min, también sería necesario extender la operación de la tasa de calentamiento de 15 °C/20 min.

Uno de los desafíos encontrados al llevar a cabo este proceso de pirólisis fue la temperatura inicial del intervalo de operación. Iniciar el proceso de pirólisis con temperaturas superiores a los 150 °C establecidos, o utilizar velocidades de calentamiento superiores, habría acelerado significativamente la producción de productos gaseosos, lo que habría resultado en una saturación del sistema, desde el interior de la mufla hasta el condensador. Esto se debió a que, en una de las primeras pruebas realizadas, se empleó un rango de temperatura de operación de 250 °C a 350 °C. Sin embargo, al calentar la muestra de materia prima rápidamente, el sistema se saturó de gases, especialmente el condensador, lo que resultó en la incapacidad de condensar adecuadamente dichos gases. Esto afectó negativamente todo el proceso durante esa prueba en particular. Por lo tanto, basándose en la experiencia adquirida y en los datos obtenidos del análisis termogravimétrico, se decidió establecer un rango de temperatura más bajo, específicamente de 150 °C a 300 °C. Además, otro inconveniente en el sistema del proceso (como se ilustra en la Ilustración 6) es que el tramo por el cual se desplazan los gases de chimenea no está recubierto, sino que está expuesto al ambiente. Esta exposición genera un intercambio de calor que favorece el cambio de fase de los gases antes de llegar al condensador. Como resultado, los productos tardan más en salir, especialmente el líquido, debido al recorrido adicional, lo que provoca que queden atrapados dentro del tubo, afectando tanto la cantidad total de producto obtenido. Se enfrentaron

problemas adicionales al pesar la masa del producto líquido obtenido, ya que se empleaban dos balones para llevar a cabo esta tarea. Sin embargo, el proceso de manipulación de estos balones, al retirarlos y volver a colocarlos, resultaba en algunas pérdidas de material, principalmente debido a la pérdida de algunas gotas durante este intercambio. Este fenómeno tuvo un impacto leve en los rendimientos del producto líquido para cada una de las tasas de calentamiento, que fueron del 21.0% para la tasa de 15 °C/20 min y del 27.2% para la tasa de 15 °C/30 min.

Al igual que en cualquier proceso de pirólisis, se obtienen productos sólidos y gaseosos. El biochar producido puede tener una alta porosidad, lo que le confiere una capacidad significativa de adsorción. Además, este biochar podría contener altos niveles de nutrientes inorgánicos, como potasio y fósforo, lo cual es muy beneficioso para las actividades agrícolas. En cuanto a los productos gaseosos obtenidos, estos generalmente son una mezcla de hidrocarburos ligeros, como monóxido de carbono (CO) y otros gases volátiles. Algunas aplicaciones del biochar incluyen su uso como biofertilizante, gracias a las características mencionadas anteriormente. El biochar libera nutrientes de forma lenta y sostenida, mejorando la salud del suelo y disminuyendo la necesidad de fertilizantes químicos. En cuanto a los gases pirolíticos, su principal uso sería la generación de electricidad y calor, debido al alto potencial energético de su composición.

En el ámbito de las propiedades fisicoquímicas, las densidades, se observa que el biodiésel tiene una densidad teórica de 880 kg/m³, el diésel de 850 kg/m³ y la gasolina de 720 kg/m³ (RACE, 2023). Sin embargo, los valores obtenidos para el producto líquido presentaron diferencias significativas, registrando densidades de 999.05 kg/m³ y 999.10 kg/m³. Estos valores están considerablemente por encima de las densidades esperadas para los biocombustibles y combustibles convencionales. Esta disparidad podría deberse nuevamente a la presencia de agua en la muestra. Cuando hay agua diluida en una muestra de producto líquido y estos tienen una densidad menor que la del agua, la tendencia es que la solución resultante incremente su densidad final. En cuanto a las viscosidades obtenidas para el producto líquido (registrando 8.10 cSt y 7.93 cSt), se observa que estas cifras están por encima de las viscosidades del biodiésel (4.77 cSt), diésel (3.33 cSt) y gasolina (0.8 cSt). Esta disparidad puede atribuirse al método empleado para medir las viscosidades. Aunque el método utilizado no es el más recomendable, no fue posible utilizar un equipo de mayor tamaño debido a que la muestra total de producto líquido no era suficiente para emplear un viscosímetro y obtener datos más precisos de este parámetro. Además, otro factor que pudo contribuir al aumento de las viscosidades es la presencia de compuestos pesados, lo que podría influir en el incremento de este parámetro.

En el caso del poder calorífico, se destaca como una de las más significativas para evaluar si el producto líquido obtenido posee similitudes con otros biocombustibles alternativos o con los combustibles convencionales, los cuales son los más comúnmente utilizados. De acuerdo con investigaciones realizadas en la Universidad de Strathclyde, el poder calorífico promedio del biodiésel se sitúa en torno a 37,500 J/g. En contraste, el diésel convencional presenta un poder calorífico de aproximadamente 42,600 J/g, y el de la gasolina alcanza cerca de 43,500 J/g (RACE, 2023). Al comparar estos valores con los obtenidos en cada uno de los procesos de pirólisis junto con sus respectivas tasas de calentamiento (registrando 11,538 J/g y 11,886 J/g, según los datos del Cuadro 9), se evidencia que los poderes caloríficos obtenidos están por debajo del biodiésel, el biocombustible más ampliamente utilizado en la actualidad, y considerablemente por debajo de los combustibles derivados del petróleo. Esto podría atribuirse a la presencia de agua en la muestra del producto líquido obtenido. Los resultados de la cromatografía de gases-masas, que se encuentran detallados en los Cuadros 19 y 20, revelan la presencia de agua en cierto porcentaje en el producto líquido. Esta presencia de humedad en la materia prima, incluso después del proceso de secado, afecta el cálculo del poder calorífico por varias razones. En primer lugar, el agua tiene un alto calor específico, lo que implica que absorbe y retiene energía térmica sin experimentar un cambio significativo en su temperatura. En segundo lugar, durante el proceso de combustión utilizado para calcular el poder calorífico, el agua absorbe parte de la energía liberada para vaporizarse, lo que reduce la cantidad de energía disponible para aumentar la temperatura de los productos de la combustión. Esta combinación de factores contribuye a la reducción del poder calorífico obtenido. Sin embargo, el producto aún conserva la capacidad de liberar una cantidad sustancial de energía cuando se somete a un proceso de combustión.

Según la información encontrada en la literatura, el líquido resultante del proceso de pirólisis de residuos de café de percoladora está compuesto principalmente por compuestos oxigenados de bajo peso molecular, tales como alcoholes, aldehídos, cetonas, ésteres, éteres y ácidos carboxílicos. Además, se observa la presencia de monómeros de lignina, como el fenol, junto con otros compuestos como el ácido hexadecanoico y la 1,2-ciclopentanodiona (referencia). Los datos de los Cuadros 19 y 20 indican que el líquido obtenido contiene una proporción significativa de compuestos orgánicos oxigenados debido a la descomposición de la materia prima, incluyendo acetaldehído, ácido acético, furanometanoles y maltol. Se identificó la presencia de piridina como un monómero de lignina en una proporción considerable, así como la presencia del compuesto 1,2-ciclopentanodiona. Estos resultados sugieren la obtención de compuestos similares durante el

proceso de pirólisis de la misma materia prima, lo cual concuerda con la información presente en la literatura.

El bioaceite obtenido del proceso de pirólisis lenta tiene diversas aplicaciones energéticas, pero generalmente presenta un poder calorífico inicial bajo en comparación con otros combustibles convencionales. Para aumentar su poder calorífico y mejorar su viabilidad como combustible, es necesario someterlo a un tratamiento. Uno de los tratamientos recomendados es la hidrodesoxigenación, que elimina el oxígeno del bioaceite en forma de agua utilizando hidrógeno gas, aumentando así su compatibilidad con los combustibles tradicionales. No obstante, este proceso requiere una inversión en infraestructura y el suministro de hidrógeno, lo cual puede ser costoso. Otro tratamiento recomendado es la destilación fraccionada, que separa las diferentes fracciones del biocombustible para aislar los compuestos con mayor contenido energético. En este proceso, el bioaceite se calienta hasta evaporarse y los vapores se condensan en diferentes fracciones según sus puntos de ebullición, permitiendo obtener fracciones más ligeras y de mayor poder calorífico, además de eliminar impurezas. Sin embargo, esto requiere un equipo de destilación complejo. Por otro lado, la adición de aditivos puede mejorar el poder calorífico y las propiedades de combustión del biocombustible. Al añadir compuestos como metanol o etanol, se aumenta el valor energético. Sin embargo, debido a las mezclas generadas, se necesitarían controles de calidad adicionales.

En relación al balance de masa y energía del sistema completo, que abarca tanto el proceso de secado como el de pirólisis, se logró cuantificar y equilibrar adecuadamente las masas de cada uno de los productos y subproductos. Sin embargo, en términos energéticos, se observa en las Figuras 28 y 29 que el proceso de pirólisis de residuos de café de percoladora no es viable desde el punto de vista energético. Esto se debe a que la energía suministrada a todo el sistema, incluyendo el secado y la pirólisis, no se compensa, ya que se suministraron alrededor de 105,000 kJ durante el proceso y los productos liberaron alrededor de 2,000 kJ. La baja calidad energética de los productos, especialmente del producto líquido, es la causa principal de este desequilibrio. Para mejorar la viabilidad energética del proceso, sería necesario someter el producto líquido a otro proceso, como la deshidratación, para aumentar su poder calorífico y así incrementar la energía proporcionada por este producto. Un enfoque similar debería aplicarse al producto sólido, ya que aún contiene un cierto porcentaje de humedad. De esta manera, el proceso resultaría económicamente inviable debido al consumo excesivo necesario para obtener este tipo de producto.

IX. CONCLUSIONES

1. Se llevó a cabo el proceso de secado de los residuos de café de percoladora, logrando una eliminación de humedad del 94%. Inicialmente, la materia prima presentaba una humedad del 51.73%, la cual se redujo a un 2.68% al finalizar el proceso de secado, lo que lo hace adecuado para poder realizar el análisis termogravimétrico y el proceso de pirólisis.
2. En el proceso de pirólisis, se observó que la tasa de calentamiento de 15 °C cada 30 minutos produjo la mayor cantidad de producto líquido (13.6g), lo que resultó en un rendimiento del 27.20%. En contraste, la tasa de calentamiento de 15 °C cada 20 minutos produjo 10.5g de producto líquido, equivalente a un rendimiento del 21.00%. La razón principal radica en el tiempo durante el cual la materia prima está expuesta al calor en la tasa de calentamiento de 15°C cada 30 minutos.
3. Las propiedades fisicoquímicas medidas en el producto líquido presentan una variación significativa en comparación con las propiedades teóricas de productos similares. En el caso de las propiedades de un biodiésel, la densidad es de 880 kg/m³, la viscosidad es de 4.77 cSt y el poder calorífico es de 37,500 J/g. Los valores obtenidos del producto líquido fueron: la densidad de 999.05 kg/m³ y 999.10 kg/m³; para la viscosidad se obtuvo 8.10 cSt y 7.93 cSt y para el poder calorífico se obtuvieron datos de 11,538 J/g y 11,886 J/g. Esta variación se debe a la presencia de un cierto porcentaje de agua en la muestra, lo cual influye en los resultados, además de que los métodos de medición utilizados pueden no ser los más precisos.
4. La producción de biocombustibles líquidos a partir de residuos de café de percoladora no es factible desde el punto de vista energético. Esto se debe a que el proceso de secado requiere 43,200 kJ y el de pirólisis alrededor de 60,000 kJ, dependiendo del tiempo de funcionamiento del horno. La energía suministrada no se compensa con la energía generada por los productos, ya que tienen un bajo poder calorífico. Por lo tanto, este proceso conlleva un alto consumo energético y una inversión económica considerable.

X. RECOMENDACIONES

1. Dado el entendimiento del proceso de secado de la materia prima, se aconseja llevar a cabo la operación de secado de manera ininterrumpida, dado que el acto de abrir y cerrar el horno podría interferir con el proceso de secado. Asimismo, se sugiere considerar la utilización de un horno de convección forzada u optar por el secado solar, con el objetivo de obtener una distribución de secado más uniforme y reducir el consumo de energía.
2. Se recomienda emplear diferentes tasas de calentamiento a las utilizadas para evaluar si se logra obtener un rendimiento superior en comparación con el obtenido utilizando la tasa de calentamiento de 15 °C cada 30 minutos.
3. Cuando se reproduzca el procedimiento para obtener propiedades fisicoquímicas del producto líquido derivado del proceso de pirólisis lenta, asegurarse de minimizar la exposición al aire y a la luz para prevenir la oxidación. Emplear contenedores y equipos inertes, trabajar en un ambiente controlado y completar los análisis de manera rápida. Además, considerar el uso de agentes antioxidantes si es necesario, y verificar la precisión de tus mediciones mediante calibraciones y estándares de referencia adecuados.
4. Se sugiere llevar a cabo un proceso de tratamiento del producto líquido, como una hidroxigenación para eliminar el oxígeno. Otro procedimiento sería la destilación fraccionada, para concentrar compuestos fracciones con compuestos con mayor poder calorífico. Esto, para que el combustible líquido obtenido compita de mejor forma con combustibles alternativos o con combustibles convencionales que se utilizan en la actualidad.
5. Realizar un estudio técnico y económico del proceso de pirólisis lenta de la materia prima utilizada para determinar los potenciales beneficios que tiene llevar a cabo este experimento, así como las posibles mejoras en temas de consumo energético, contaminantes, alternativas catalíticas, etc.

XI. BIBLIOGRAFÍA

- Anuar, S., *et al.* (2016). A review on pyrolysis of plastics wastes. *ELSEVIER*.
- APPA. (2022). *Asociación de Empresas de Energías Renovables*. Obtenido de ¿Qué es la biomasa?: <https://www.appa.es/appa-biomasa/que-es-la-biomasa/>
- BYJUS. (2023). *Unit of Density*. Obtenido de <https://byjus.com/physics/unit-of-density/>
- CarbonNeutral+. (2023). *¿Qué son los biocombustibles y qué tipos existen?* Obtenido de <https://www.carbonneutralplus.com/que-son-los-biocombustibles/>
- Chen, N., *et al.* (2017). *Study on vacuum pyrolysis of coffee industrial residue for bio-oil production*. Obtenido de <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/59/1/012065>
- de León, P., & Rodríguez, R. (2021). *Central American Business Intelligence (CABI): La importancia del café en la economía de Guatemala: Productividad, Sostenibilidad, Migración y Huella*. cabi economics.
- El Tiempo. (2023). *Ingenieros australianos usan residuos de café para producir un hormigón más resistente*. Obtenido de <https://www.eltiempo.com/vida/ciencia/ingenieros-usan-residuos-de-cafe-para-producir-un-hormigon-30-mas-resistente-798631>
- Euskovazza. (2018). *El grano del café: tipos, variedades, términos y cómo diferenciarlos*. Obtenido de <https://euskovazza.com/el-mundo-del-cafe/granos-del-cafe-tipos-y-variedades/>
- INDUCOM Ecuador. (2023). *INDUCOM Ecuador - Equipos Industriales*. Obtenido de <https://inducom-ec.com/>
- INFINITIA. (12 de septiembre de 2022). *INFINITIA RESEARCH: TGA ¿Qué es el análisis termogravimétrico?* Obtenido de <https://www.infinitiaresearch.com/noticias/tga-que-es-el-analisis-termogravimetrico/>
- Interempresas. (2023). *Feria Virtual: Secadores continuos*. Obtenido de <https://www.interempresas.net/Quimica/FeriaVirtual/Producto-Secador-rotatorio-de-frutos-secos-211316.html>
- Jahirul, M., *et al.* (2012). *MDPI*. Obtenido de Biofuels Production through Biomass Pyrolysis - A Technological Review: <https://www.mdpi.com/1996-1073/5/12/4952>
- McCabe, W., Smith, J., & Harriott, P. (2007). *Operaciones Unitarias en Ingeniería Química*. México: McGraw-Hill.
- Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales. (2018). *Guía para la Identificación Gráfica de los Residuos Sólidos Comunes*. Obtenido de https://www.marn.gob.gt/wpfd_file/guia-para-la-identificacion-grafica-de-los-residuos-solidos-comunes/

- Ministerio de Energía y Minas. (2020). *Energía de la Biomasa*. Obtenido de <https://mem.gob.gt/que-hacemos/area-energetica/energias-renovables/energia-de-la-biomasa/>
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (s.f.). *Valorización Energética/Tratamientos térmicos*. Obtenido de <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/prevencion-y-gestion-residuos/flujo/domesticos/gestion/sistema-tratamiento/pirolisis.html>
- National Geographic. (2024). *Biomass Energy*. Obtenido de <https://education.nationalgeographic.org/resource/biomass-energy/>
- NESTLE España. (s.f.). *BONKA: Café de Cultivo Sostenible*. Obtenido de <https://www.bonka.es/amor-por-el-cafe/de-donde-viene-el-cafe#:~:text=El%20caf%C3%A9%20es%20originario%20de,de%20%C3%81frica%2C%20Am%C3%A9rica%20y%20Asia.>
- PRIMAGAS. (2023). *¿Qué es el poder calorífico?* Obtenido de <https://www.primagas.es/blog/que-es-poder-calorifico>
- Puerta, G. (2011). *Composición química de una taza de café*. Colombia: Centro Nacional de Investigaciones de Café.
- RACE. (2023). *Real Automóvil Club de España*. Obtenido de *¿Cuál es el poder calorífico de la gasolina?:* [https://www.race.es/poder-calorifico-y-otros-combustibles#:~:text=Por%20tanto%2C%20por%20todo%20lo,\(42.600%20kJ%20Fkg\).](https://www.race.es/poder-calorifico-y-otros-combustibles#:~:text=Por%20tanto%2C%20por%20todo%20lo,(42.600%20kJ%20Fkg).)
- Rivera, A. (2019). *Estudio de la pirólisis rápida de cisco de café en un horno con calentamiento por inducción magnética*. Medellín, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Rodrigues, V. (2021). *Advances in the Pyrolysis Process and the Generation of Bioenergy*. Obtenido de <https://www.intechopen.com/chapters/78772>
- Sahai, S. (2021). *Bleed Green: A COMPLETE GUIDE FOR SUSTAINABLE COFFEE WASTE RECYCLING*. Obtenido de <https://bleedgreenfoundation.com/coffee-waste-management/>
- TEC INSTRUMENTAL. (2016). *Equipos de Análisis térmico*. Obtenido de https://www.tecinstrumental.com/contenidos/2016/01/18/Editorial_3023.php
- ThermoFisher Scientific. (2024). *Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS) Information*. Obtenido de <https://www.thermofisher.com/gt/en/home/industrial/mass-spectrometry/mass-spectrometry-learning-center/gas-chromatography-mass-spectrometry-gc-ms-information.html>
- Treybal, R. (1988). *Operaciones de Transferencia de Masa*. México: McGraw-Hill.

UNIR. (2024). *Tipos de técnicas de muestreo: los principales y sus características*. Obtenido de:
<https://mexico.unir.net/noticias/ingenieria/tipos-tecnicas-muestreo/#:~:text=Existen%20dos%20grandes%20grupos%20de,de%20la%20muestra%20a%20estudiar.>

Universidad Complutense de Madrid. (s.f.). *Cromatografía de Gases-Masas (GC-MS)*. Obtenido de:
<https://cai.ucm.es/ciencias-tierra-arqueometria/tecnicas-geologicas/tecnicas/cromatografia-de-gases-masas-gc-ms/38/>

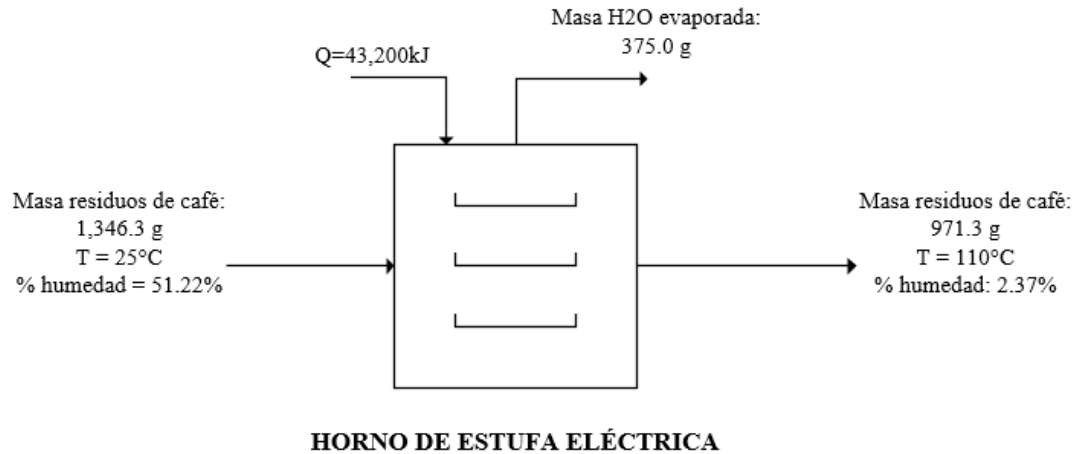
Universidad de Strathclyde. (s.f.). *Biodiésel*. Obtenido de
https://www.esru.strath.ac.uk/EandE/Web_sites/06-07/Biodiesel/biodiesels.htm

YINDA Machinery. (2024). *Secador de bandejas*. Obtenido de
<https://www.yindamachinery.com/es/secador-de-bandejas/>

XII. ANEXOS

A. BALANCES DE MASA Y ENERGÍA

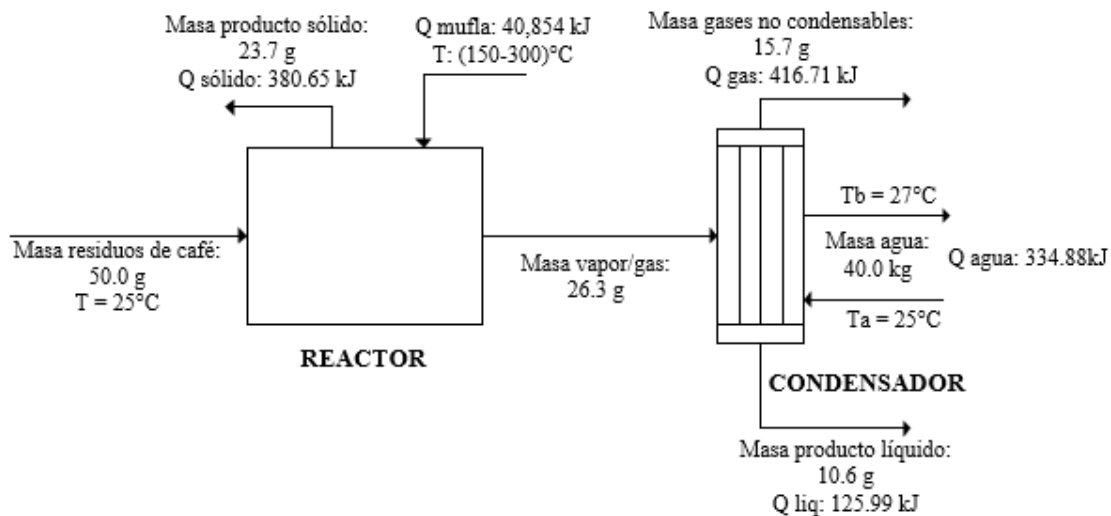
Figura 31: Balance de masa y energía del proceso de secado de la materia prima



Fuente: Elaboración propia, 2024

La figura precedente ilustra el balance de masa y energía correspondiente al proceso de secado de los residuos de café de percoladora. Este proceso se ejecutó en el horno de una estufa eléctrica Indurama OVIEDO, con una potencia de 2,000W y una duración de 6 horas. Se empleó el programa Microsoft Visio para elaborar el diagrama del balance.

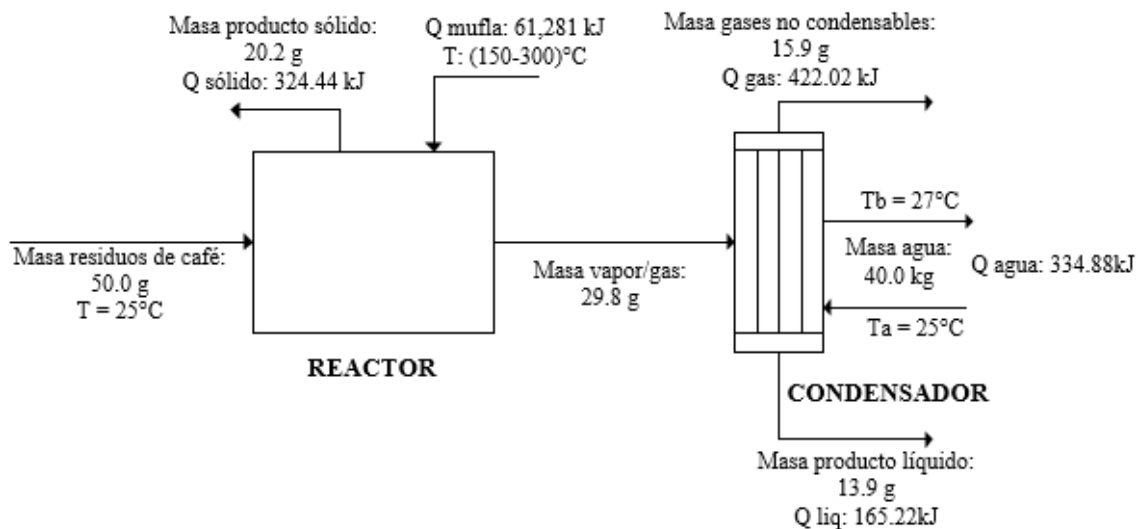
Figura 32: Balance de masa y energía del proceso de pirólisis con tasa de calentamiento 1



Fuente: Elaboración propia, 2024

La figura anterior muestra el balance de masa y energía del proceso de pirólisis lenta con una tasa de calentamiento de $15^{\circ}\text{C}/20$ min. Se emplearon un reactor de 100.0g, una mufla ThermoScientific THERMOLYNE y un condensador del kit CORNING Organic Chemistry para llevar a cabo este proceso. Los datos utilizados pertenecen a una de las corridas y están detallados en el Cuadro 17 de la sección de datos originales.

Figura 33: Balance de masa y energía del proceso de pirólisis con tasa de calentamiento 2



Fuente: Elaboración propia, 2024

La figura anterior muestra el balance de masa y energía del proceso de pirólisis lenta con una tasa de calentamiento de 15 °C/30 min. Se emplearon un reactor de 100.0g, una mufla ThermoScientific THERMOLYNE y un condensador del kit CORNING Organic Chemistry para llevar a cabo este proceso. Los datos utilizados pertenecen a una de las corridas y están detallados en el Cuadro 18 de la sección de datos originales.

B. DATOS ORIGINALES

Cuadro 13: Humedad de los residuos de café de percoladora antes del secado

Corrida	Masa (g) (± 0.001 g)	% humedad ($\pm 0.005\%$)
1	0.518	52.05%
2	0.506	51.87%
3	0.510	51.76%
4	0.502	51.22%

Fuente: Elaboración propia, 2024

Se exhibe el peso de las muestras introducidas en el analizador de humedad OHAUS MB120 para calcular su humedad inicial antes del procedimiento de desecación. Estas muestras fueron expuestas a las mismas condiciones de temperatura utilizadas durante el proceso de secado.

Cuadro 14: Mediciones de masa para realizar curva de secado

Medición	Tiempo (min)	Masa (g) (± 0.001 g)
0	0	5.00
1	30	3.65
2	60	2.88
3	90	2.42
4	120	2.13
5	150	1.92
6	180	1.78
7	210	1.68
8	240	1.59
9	270	1.53
10	300	1.50
11	330	1.47
12	360	1.45

Fuente: Elaboración propia, 2024

Se presentan los registros obtenidos de una muestra de 5.0 gramos de residuos de café durante el procedimiento de desecación. Este proceso se efectuó utilizando una estufa eléctrica Indurama OVIEDO, donde la muestra se extraía del horno cada 30 minutos y se pesaba mediante una balanza analítica OHAUS Pioneer.

Cuadro 15: Humedad de los residuos de café después del secado

Corrida	Masa (g) (± 0.001 g)	% humedad ($\pm 0.005\%$)
1	0.508	2.37%
2	0.509	3.01%
3	0.504	2.56%
4	0.501	2.78%

Fuente: Elaboración propia, 2024

Se exhibe el peso de las muestras introducidas en el analizador de humedad OHAUS MB120 para calcular su humedad final después del procedimiento de desecación. Estas muestras fueron expuestas a las mismas condiciones de temperatura que se aplicaron durante el proceso de secado.

Cuadro 16: Temperaturas de operación para muestras de residuos de café de percoladora

Muestra	Rango de temperatura teórica de operación (°C)	Temperatura experimental (°C)	Masa perdida (%)
1	179.03 – 354.99	294.9	48.2
2	178.5 – 358.2	297.57	49.1
3	181.17 – 357.67	297.71	49.4

Fuente: Elaboración propia, 2024

El cuadro anterior muestra el intervalo de temperatura ideal para operar con muestras de residuos de café de percoladora, junto con el porcentaje de pérdida de masa de las muestras dentro de dicho rango de operación. Estos resultados fueron generados por el Laboratorio del Centro Tecnológico de Cementos Progreso S.A.

Cuadro 17: Datos de temperatura y producto líquido obtenido por el proceso de pirólisis con tasa de calentamiento 1

Tiempo (mins)	Temperatura (°C)	Producto líquido obtenido (g)
0	150	0.0
5	151	0.0
10	151	0.0
15	150	0.0
20	150	0.0
25	165	0.0
30	166	0.0
35	166	0.0
40	165	0.0
45	181	0.0
50	182	0.0
55	180	0.0
60	180	0.0
65	196	0.0
70	196	0.1
75	195	0.4
80	195	0.7
85	211	0.9
90	212	1.2
95	212	1.6
100	210	1.9
105	226	2.5
110	226	2.8
115	225	3.4
120	225	3.7
125	241	4.3
130	241	4.9
135	240	5.2
140	240	5.5

Tiempo (mins)	Temperatura (°C)	Producto líquido obtenido (g)
145	256	5.9
150	256	6.3
155	255	6.9
160	255	7.1
165	272	7.5
170	271	7.9
175	271	8.4
180	270	8.9
185	286	9.3
190	286	9.6
195	285	9.9
200	285	10
205	301	10
210	300	10.1
215	300	10.1
220	300	10.1

Fuente: Elaboración propia, 2024

Este cuadro presenta los registros de temperatura y la producción de líquido durante la fase de pirólisis. La tasa de calentamiento empleada para recolectar estos datos fue de 15 °C cada 20 minutos, como se describe en la metodología. Para la medición, se empleó la balanza semi-analítica OHAUS Valor3000Xtreme.

Cuadro 18: Datos de temperatura y producto líquido obtenido por el proceso de pirólisis con tasa de calentamiento 2

Tiempo (mins)	Temperatura (°C)	Producto líquido (g)
0	150	0.0
5	151	0.0
10	151	0.0
15	152	0.0
20	151	0.0

Tiempo (mins)	Temperatura (°C)	Producto líquido obtenido (g)
25	150	0.0
30	150	0.0
35	165	0.0
40	166	0.0
45	167	0.0
50	166	0.0
55	165	0.0
60	165	0.0
65	181	0.0
70	182	0.0
75	182	0.0
80	180	0.0
85	180	0.0
90	180	0.1
95	196	0.3
100	196	0.7
105	197	0.9
110	195	1.3
115	195	1.6
120	195	1.9
125	211	2.2
130	212	2.6
135	212	3.0
140	211	3.4
145	210	3.9
150	210	4.5
155	226	4.9
160	227	5.3
165	226	5.8
170	226	6.4
175	225	6.7
180	225	7.0

Tiempo (mins)	Temperatura (°C)	Producto líquido obtenido (g)
185	241	7.2
190	242	7.4
195	241	7.8
200	240	8.4
205	240	8.9
210	240	9.5
215	256	9.7
220	257	9.9
225	256	10.2
230	255	10.4
235	255	10.6
240	255	10.8
245	271	11.0
250	272	11.2
255	271	11.4
260	270	11.7
265	270	11.8
270	270	12.0
275	286	12.2
280	286	12.4
285	286	12.6
290	285	12.7
295	285	12.8
300	285	12.9
305	301	13.0
310	302	13.1
315	300	13.2
320	300	13.3
325	300	13.5
330	300	13.6

Fuente: Elaboración propia, 2024

Este cuadro presenta los registros de temperatura y la producción de líquido durante la fase de pirólisis. La tasa de calentamiento empleada para recolectar estos datos fue de 15 °C cada 30 minutos, como se describe en la metodología. Para la medición, se empleó la balanza semi-analítica OHAUS Valor3000Xtreme.

Cuadro 19: Productos obtenidos por el proceso de pirólisis con tasa de calentamiento 1

Corrida	Masa inicial inicial (g) (±0.1g)	Masa producto líquido (g) (±0.1g)	Masa producto sólidos (g) (±0.1g)	Masa producto gaseoso (g) (±0.1g)
1	50.0	10.6	23.7	15.7
2	50.0	10.1	23.1	16.8
3	50.0	10.5	22.9	16.6
4	50.0	10.8	23.4	15.8

Fuente: Elaboración propia, 2024

Se presentan las cantidades de materia prima utilizadas en cada ejecución de pirólisis en el reactor de 100 gramos del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle. Asimismo, se exhiben las masas de los productos obtenidos en cada corrida, utilizando una tasa de calentamiento de 15 °C cada 20 minutos.

Cuadro 20: Productos obtenidos por el proceso de pirólisis con tasa de calentamiento 2

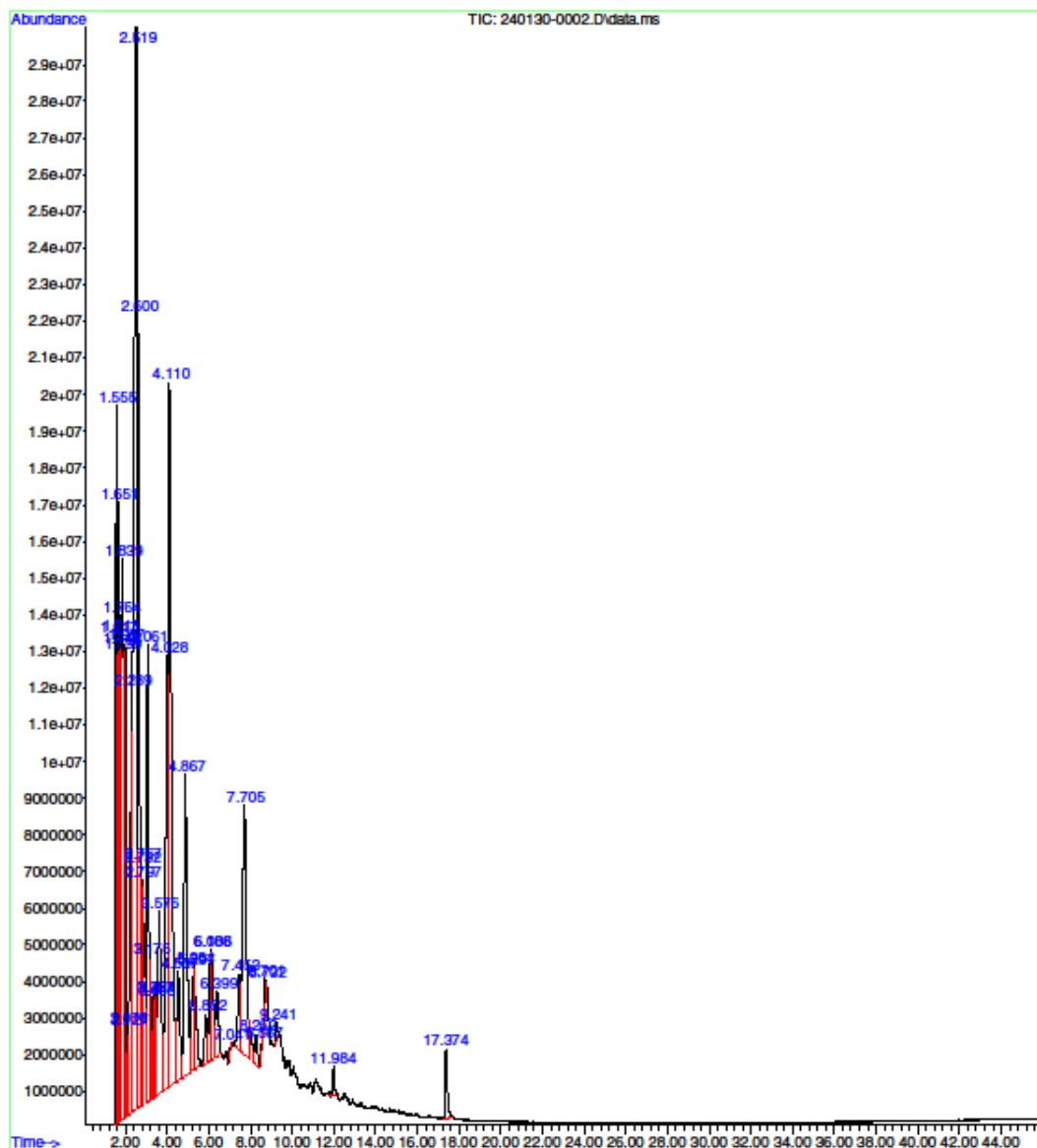
Corrida265	Masa inicial inicial (g) (±0.1g)	Masa producto líquido (g) (±0.1g)	Masa producto sólidos (g) (±0.1g)	Masa producto gaseoso (g) (±0.1g)
1	50.0	13.9	20.2	15.9
2	50.0	13.6	20.4	16.0
3	50.0	13.1	19.8	17.1
4	50.0	13.8	19.3	16.9

Fuente: Elaboración propia, 2024

Se presentan las cantidades de materia prima utilizadas en cada ejecución de pirólisis en el reactor de 100 gramos del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle.

Asimismo, se exhiben las masas de los productos obtenidos en cada corrida, utilizando una tasa de calentamiento de 15 °C cada 30 minutos.

Figura 34: Cromatograma de la muestra de producto líquido obtenido en el proceso de pirólisis con tasa de calentamiento 1

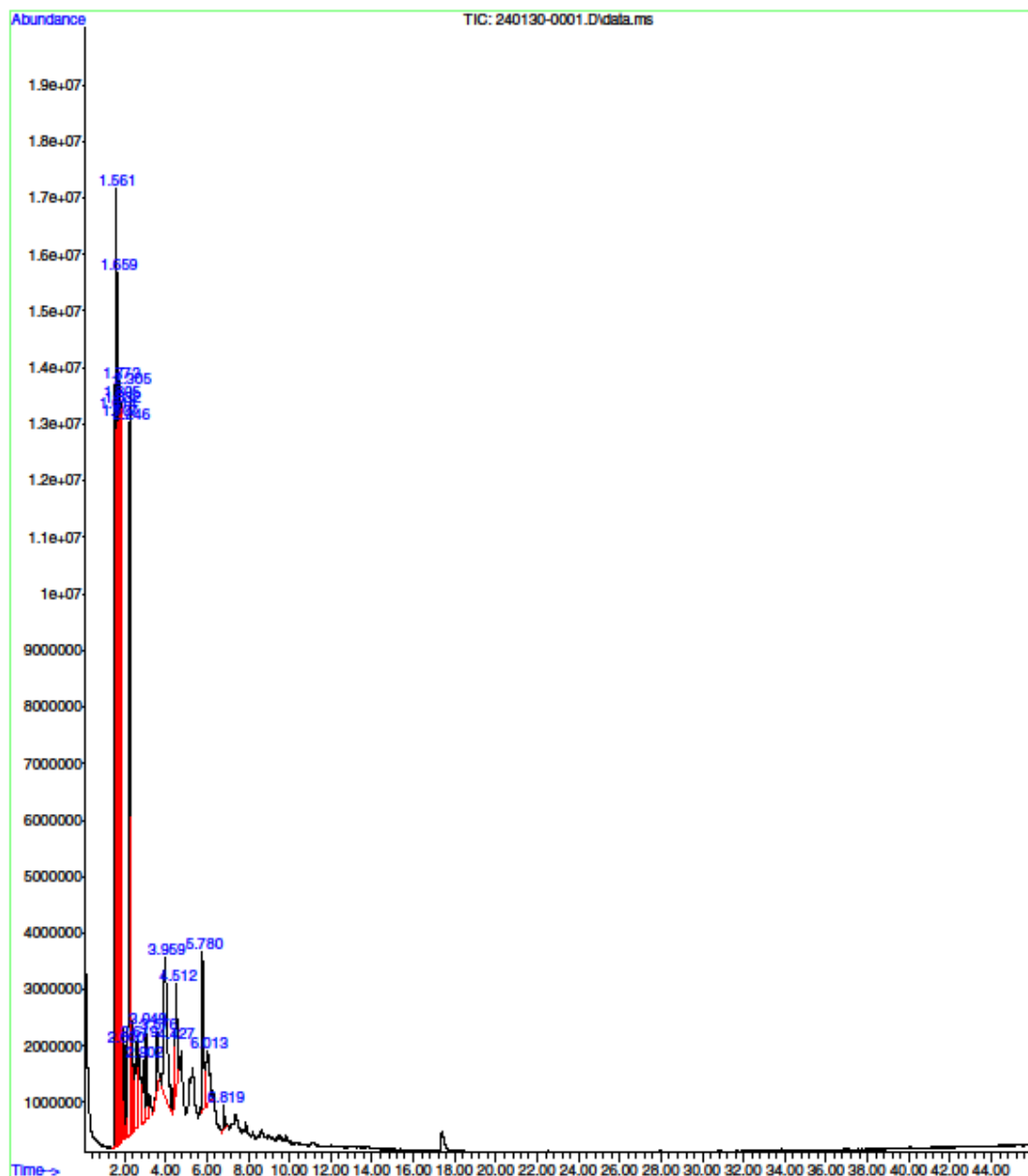


Fuente: Universidad del Valle de Guatemala, 2024

Se presenta el gráfico cromatográfico generado a partir de la muestra del producto líquido obtenido mediante el proceso de pirólisis, con una tasa de calentamiento de 15 °C cada 20 minutos.

En el eje Y se representa la abundancia de los compuestos, mientras que en el eje X se indica el tiempo de retención en minutos. Estos resultados fueron obtenidos por personal del Laboratorio de Análisis Instrumental Avanzada de la Universidad del Valle de Guatemala.

Figura 35: Cromatograma de la muestra de producto líquido obtenido en el proceso de pirólisis con tasa de calentamiento 2



Se presenta el gráfico cromatográfico generado a partir de la muestra del producto líquido obtenido mediante el proceso de pirólisis, con una tasa de calentamiento de 15 °C cada 20 minutos. En el eje Y se representa la abundancia de los compuestos, mientras que en el eje X se indica el tiempo de retención en minutos. Estos resultados fueron obtenidos por personal del Laboratorio de Análisis Instrumental Avanzada de la Universidad del Valle de Guatemala. Estos resultados fueron obtenidos por personal del Laboratorio de Análisis Instrumental Avanzada de la Universidad del Valle de Guatemala.

Cuadro 21: Mediciones de poder calorífico de los productos obtenidos del proceso de pirólisis con tasa de calentamiento 1

Corrida	Poder calorífico producto líquido (J/kg)	Poder calorífico producto sólido (J/kg)
1	12,542	16,460
2	11,820	15,265
3	10,634	16,639
4	11,158	15,881

Fuente: Elaboración propia, 2024

El cuadro anterior exhibe los poderes caloríficos de los productos sólidos y líquidos de diversas ejecuciones del proceso de pirólisis, con una tasa de calentamiento de 15 °C/20 min. Se empleó una bomba calorimétrica IKA C 200 para realizar estas mediciones

Cuadro 22: Mediciones de poder calorífico de los productos obtenidos del proceso de pirólisis con tasa de calentamiento 2.

Corrida	Poder calorífico producto líquido (J/kg)	Poder calorífico producto sólido (J/kg)
1	12,321	16,625
2	11,563	15,691
3	11,248	16,124
4	12,410	15,934

Fuente: Elaboración propia, 2024

El cuadro anterior exhibe los poderes caloríficos de los productos sólidos y líquidos de diversas ejecuciones del proceso de pirólisis, con una tasa de calentamiento de 15 °C/30 min. Se empleó una bomba calorimétrica IKA C 200 para realizar estas mediciones.

Cuadro 23: Mediciones realizadas para cálculo de densidad del producto líquido obtenido con tasa de calentamiento 1

Corrida	Masa (g) (± 0.0001 g)	Volumen (mL) (± 0.2 mL)
1	9.9567	10.0
2	10.0014	10.0
3	10.0003	10.0
4	10.0034	10.0

Fuente: Elaboración propia, 2024

Se presentan las mediciones de peso y volumen efectuadas en los productos líquidos derivados del procedimiento de pirólisis. La masa fue calculada con una balanza analítica OHAUS Pioneer, mientras que el volumen se determinó utilizando una probeta de 10 mL KIMAX. Estas mediciones se llevaron a cabo en el producto obtenido mediante un proceso de pirólisis con una tasa de calentamiento de 15 °C cada 20 minutos.

Cuadro 24: Mediciones realizadas para cálculo de densidad del producto líquido obtenido con tasa de calentamiento 2

Corrida	Masa (g) (± 0.0001 g)	Volumen (mL) (± 0.2 mL)
1	9.9892	10.0
2	9.9723	10.0
3	10.0023	10.0
4	10.0012	10.0

Fuente: Elaboración propia, 2024

Se presentan las mediciones de peso y volumen efectuadas en los productos líquidos derivados del procedimiento de pirólisis. La masa fue calculada con una balanza analítica OHAUS Pioneer, mientras que el volumen se determinó utilizando una probeta de 10 mL KIMAX. Estas

mediciones se llevaron a cabo en el producto obtenido mediante un proceso de pirólisis con una tasa de calentamiento de 15 °C cada 30 minutos.

Cuadro 25: Mediciones realizadas para cálculo de viscosidad del producto líquido obtenido con tasa de calentamiento 1

Corrida	Distancia recorrida (cm) (±0.1 cm)	Tiempo (s) (±0.01 s)
1	5.0	8.87
2	5.0	7.92
3	5.0	7.98
4	5.0	8.02

Fuente: Elaboración propia, 2024

Se presentan los registros de tiempo y distancia recorrida de los productos líquidos generados mediante el proceso de pirólisis. Para medir el tiempo, se empleó un cronómetro del iPhone 13, mientras que la distancia se determinó utilizando una regla BOLIK de 30 cm. Estas mediciones se llevaron a cabo en el producto resultante de un proceso de pirólisis con una tasa de calentamiento de 15 °C cada 20 minutos.

Cuadro 26: Mediciones realizadas para cálculo de viscosidad del producto líquido obtenido con tasa de calentamiento 2

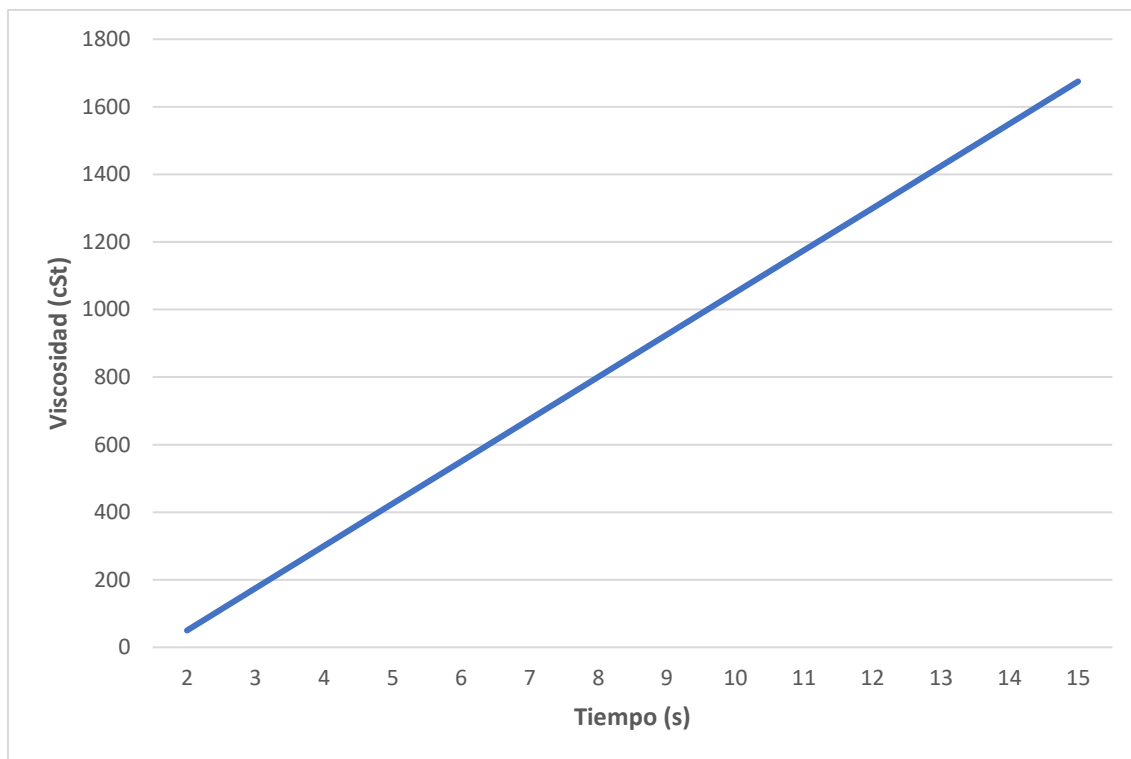
Corrida	Distancia recorrida (cm) (±0.1 cm)	Tiempo (s) (±0.01 s)
1	5.0	7.91
2	5.0	7.97
3	5.0	8.01
4	5.0	8.11

Fuente: Elaboración propia, 2024

Se presentan los registros de tiempo y distancia recorrida de los productos líquidos generados mediante el proceso de pirólisis. Para medir el tiempo, se empleó un cronómetro del iPhone 13, mientras que la distancia se determinó utilizando una regla BOLIK de 30 cm. Estas mediciones se

llevaron a cabo en el producto resultante de un proceso de pirólisis con una tasa de calentamiento de 15 °C cada 30 minutos.

Figura 36: Gráfica de viscosidad con base en tiempo



Fuente: INDUCOM Ecuador, 2023

Se muestra el gráfico que representa las mediciones de viscosidad del producto líquido resultante del proceso de pirólisis en función del tiempo de desplazamiento del mismo.

C. DATOS CALCULADOS

Cuadro 27: Humedad inicial de los residuos de café recolectados

Corrida	Humedad (%)	Media de la humedad (%)	Desviación estándar humedad (%)	Valor inferior Intervalo de confianza al 95%	Valor superior Intervalo de confianza al 95%	Coefficiente de variación
1	52.05% ± 0.01%	51.73% ± 0.36%	0.36%	51.30%	52.15%	0.69%
2	51.87% ± 0.01%					
3	51.76% ± 0.01%					
4	51.22% ± 0.01%					

Fuente: Elaboración propia, 2024

El cuadro anterior presenta los datos computados que representan la humedad inicial de la materia prima empleada en el proceso de pirólisis, antes de su paso por el secado. También se incluye el análisis estadístico realizado sobre estos datos. La información utilizada está detallada en el Cuadro 11 de la sección de datos originales.

Cuadro 28: Humedad final de los residuos de café recolectados

Corrida	Humedad (%)	Media de la humedad (%)	Desviación estándar humedad (%)	Valor inferior Intervalo de confianza al 95%	Valor superior Intervalo de confianza al 95%	Coefficiente de variación
1	2.37% ± 0.01%	2.68% ± 0.36%	0.28%	2.35%	3.01%	1.32%
2	3.01% ± 0.01%					
3	2.56% ± 0.01%					
4	2.78% ± 0.01%					

Fuente: Elaboración propia, 2024

El cuadro anterior presenta los datos computados que representan la humedad final de la materia prima empleada en el proceso de pirólisis, antes de su paso por el secado. También se incluye el análisis estadístico realizado sobre estos datos. La información utilizada está detallada en el Cuadro 13 de la sección de datos originales.

Cuadro 29: Temperaturas de operación óptimas para residuos de café de percoladora

Muestra	Rango de temperatura de operación (°C)	Temperatura experimental (°C)
Residuo de café	179.57 – 356.95	296.72

Fuente: Elaboración propia, 2024

El cuadro anterior exhibe las medias del intervalo de temperatura de operación para las muestras de residuos de café de percoladora, junto con la temperatura experimental óptima para realizar el proceso de pirólisis. Los datos utilizados para obtener estos resultados se encuentran en

el Cuadro 14 de la sección de datos originales, así como en las figuras de la sección de Análisis Externos de los Anexos.

Cuadro 30: Producto líquido obtenido del proceso de pirólisis con tasa de calentamiento 1

Corrida	Producto líquido obtenido (g)	Media del producto líquido (g)	Desviación estándar producto líquido (g)	Valor inferior Intervalo de confianza al 95%	Valor superior Intervalo de confianza al 95%	Coefficiente de variación
1	10.6 ± 0.1	10.5 ± 0.2	0.29	10.15	10.85	2.80%
2	10.1 ± 0.1					
3	10.5 ± 0.1					
4	10.8 ± 0.1					

Fuente: Elaboración propia, 2024

El cuadro anterior exhibe los datos derivados del producto líquido obtenido mediante el proceso de pirólisis con una tasa de calentamiento de 15 °C/20 min. También se incluye el análisis estadístico efectuado sobre estos datos. La información empleada se encuentra en el Cuadro 17 de la sección de datos originales.

Cuadro 31: Rendimiento del producto líquido del proceso de pirólisis con la primera tasa de calentamiento

Corrida	Rendimiento producto líquido (%)	Media del rendimiento de producto líquido (%)	Desviación estándar rendimiento del producto líquido (%)	Valor inferior Intervalo de confianza al 95%	Valor superior Intervalo de confianza al 95%	Coefficiente de variación
1	21.20% ± 0.16%	21.00% ± 0.20%	0.59%	20.31%	21.69%	2.80%
2	20.20% ± 0.15%					
3	21.00% ± 0.17%					
4	21.60% ± 0.16%					

Fuente: Elaboración propia, 2024

El cuadro anterior exhibe los datos derivados del rendimiento del producto líquido obtenido mediante el proceso de pirólisis con una tasa de calentamiento de 15 °C/20 min. También se incluye el análisis estadístico efectuado sobre estos datos. La información empleada se encuentra en el Cuadro 17 de la sección de datos originales.

Cuadro 32: Producto líquido obtenido del proceso de pirólisis con tasa de calentamiento 2

Corrida	Producto líquido obtenido (g)	Media del producto líquido (g)	Desviación estándar producto líquido (g)	Valor inferior Intervalo de confianza al 95%	Valor superior Intervalo de confianza al 95%	Coefficiente de variación
1	13.9 ± 0.1	13.6 ± 0.2	0.36	13.01g	14.02g	2.62%
2	13.6 ± 0.1					
3	13.1 ± 0.1					
4	13.8 ± 0.1					

Fuente: Elaboración propia, 2024

El cuadro anterior exhibe los datos derivados del producto líquido obtenido mediante el proceso de pirólisis con una tasa de calentamiento de 15 °C/30 min. También se incluye el análisis estadístico efectuado sobre estos datos. La información empleada se encuentra en el Cuadro 18 de la sección de datos originales.

Cuadro 33: Rendimiento del producto líquido del proceso de pirólisis con la segunda tasa de calentamiento

Corrida	Rendimiento producto líquido (%)	Media del rendimiento de producto líquido (%)	Desviación estándar rendimiento del producto líquido (%)	Valor inferior Intervalo de confianza al 95%	Valor superior Intervalo de confianza al 95%	Coefficiente de variación
1	27.80% ± 0.21%	27.20% ± 0.41%	0.71%	26.16%	28.04%	2.62%
2	27.20% ± 0.21%					
3	26.20% ± 0.21%					
4	27.60% ± 0.21%					

Fuente: Elaboración propia, 2024

El cuadro anterior exhibe los datos derivados del rendimiento del producto líquido obtenido mediante el proceso de pirólisis con una tasa de calentamiento de 15 °C/30 min. También se incluye el análisis estadístico efectuado sobre estos datos. La información empleada se encuentra en el Cuadro 18 de la sección de datos originales.

Cuadro 34: Poder calorífico del producto líquido del proceso de pirólisis con la primera tasa de calentamiento

Corrida	Poder calorífico producto líquido (J/g)	Media del poder calorífico del producto líquido (J/g)	Desviación estándar del poder calorífico del producto líquido (J/g)	Valor inferior Intervalo de confianza al 95%	Valor superior Intervalo de confianza al 95%	Coefficiente de variación
1	12,542 ± 93.65	11,538 ± 175.96	826.47	10,566	12,611	7.16%
2	11,820 ± 90.07					
3	10,634 ± 83.92					
4	11,158 ± 83.88					

Fuente: Elaboración propia, 2024

El cuadro anterior exhibe los datos derivados del poder calorífico del producto líquido obtenido mediante el proceso de pirólisis con una tasa de calentamiento de 15 °C/20 min. También se incluye el análisis estadístico efectuado sobre estos datos. La información empleada se encuentra en el Cuadro 21 de la sección de datos originales.

Cuadro 35: Poder calorífico del producto líquido del proceso de pirólisis con la segunda tasa de calentamiento

Corrida	Poder calorífico producto líquido (J/g)	Media del poder calorífico del producto líquido (J/g)	Desviación estándar del poder calorífico del producto líquido (J/g)	Valor inferior Intervalo de confianza al 95%	Valor superior Intervalo de confianza al 95%	Coefficiente de variación
1	12,321 ± 92.00	11,886 ± 181.13	570.14	11,214	12,656	4.80%
2	11,563 ± 88.11					
3	11,248 ± 88.76					
4	12,410 ± 93.29					

Fuente: Elaboración propia, 2024

El cuadro anterior exhibe los datos derivados del poder calorífico del producto líquido obtenido mediante el proceso de pirólisis con una tasa de calentamiento de 15 °C/30 min. También se incluye el análisis estadístico efectuado sobre estos datos. La información empleada se encuentra en el Cuadro 22 de la sección de datos originales.

Cuadro 36: Densidad del producto líquido del proceso de pirólisis con la primera tasa de calentamiento

Corrida	Densidad producto líquido (kg/m ³)	Media de la densidad del producto líquido (kg/m ³)	Desviación estándar de la densidad del producto líquido (kg/m ³)	Valor inferior Intervalo de confianza al 95%	Valor superior Intervalo de confianza al 95%	Coefficiente de variación
1	995.67 ± 19.91	999.05 ± 39.96	2.25	993.39	1001.70	0.23%
2	1,000.14 ± 20.00					
3	1,000.03 ± 20.00					
4	1,000.34 ± 20.01					

Fuente: Elaboración propia, 2024

En el cuadro previo se muestran los resultados obtenidos para la densidad del producto líquido derivado del proceso de pirólisis con la tasa de calentamiento 15 °C/20 min. Además, se proporcionan los análisis estadísticos correspondientes. Estos datos se basan en la información del Cuadro 23 de la sección de datos originales.

Cuadro 37: Densidad del producto líquido del proceso de pirólisis con la segunda tasa de calentamiento

Corrida	Densidad producto líquido (kg/m ³)	Media de la densidad del producto líquido (kg/m ³)	Desviación estándar de la densidad del producto líquido (kg/m ³)	Valor inferior Intervalo de confianza al 95%	Valor superior Intervalo de confianza al 95%	Coefficiente de variación
1	998.92 ± 19.98	999.10 ± 39.96	1.40	996.45	1000.75	0.14%
2	997.23 ± 19.94					
3	1,000.23 ± 20.00					
4	1,000.12 ± 20.00					

Fuente: Elaboración propia, 2024

En el cuadro previo se muestran los resultados obtenidos para la densidad del producto líquido derivado del proceso de pirólisis con la tasa de calentamiento 15 °C/30 min. Además, se proporcionan los análisis estadísticos correspondientes. Estos datos se basan en la información del Cuadro 24 de la sección de datos originales.

Cuadro 38: Viscosidad del producto líquido obtenido del proceso de pirólisis con tasa de calentamiento 1

Corrida	Viscosidad (cSt)
1	875
2	775
3	790
4	800

Fuente: Elaboración propia, 2024

El cuadro anterior muestra los datos de viscosidad cinemática del producto líquido obtenido a través del proceso de pirólisis con la primera tasa de calentamiento. Se tomaron en cuenta los datos de tiempo en el Cuadro 25 de la sección de datos originales, junto con la información proporcionada en la Figura 35.

Cuadro 39: Análisis estadístico de la viscosidad del producto líquido obtenido del proceso de pirólisis con tasa de calentamiento 1

Corrida	Viscosidad del producto líquido (cSt)	Media de la viscosidad del producto líquido (cSt)	Desviación estándar viscosidad del producto líquido (cSt)	Valor inferior Intervalo de confianza al 95%	Valor superior Intervalo de confianza al 95%	Coefficiente de variación
1	8.75 ± 0.75	8.10 ± 0.25	0.45	7.57	8.82	5.50%
2	7.75 ± 0.55					
3	7.90 ± 0.58					
4	8.00 ± 0.60					

Fuente: Elaboración propia, 2024

El cuadro anterior muestra los datos de viscosidad cinemática del producto líquido obtenido a través del proceso de pirólisis con la primera tasa de calentamiento. Así como su análisis estadístico. Se tomaron en cuenta los datos del Cuadro 38, junto con la información proporcionada en la figura 35.

Cuadro 40: Viscosidad del producto líquido obtenido del proceso de pirólisis con tasa de calentamiento 2

Corrida	Viscosidad (cSt)
1	740
2	790
3	800
4	805

Fuente: Elaboración propia, 2024

El cuadro anterior muestra los datos de viscosidad del producto líquido obtenido a través del proceso de pirólisis con la tasa de calentamiento inicial. Se tomaron en cuenta los datos de tiempo en el Cuadro 26 de la sección de datos originales, junto con la información proporcionada en la Figura 35.

Cuadro 41: Análisis estadístico de la viscosidad del producto líquido obtenido del proceso de pirólisis con tasa de calentamiento 2

Corrida	Viscosidad del producto líquido (cSt)	Media de la viscosidad del producto líquido (cSt)	Desviación estándar viscosidad del producto líquido (cSt)	Valor inferior Intervalo de confianza al 95%	Valor superior Intervalo de confianza al 95%	Coefficiente de variación
1	7.40 ± 0.48	7.83 ± 0.14	0.30	7.28	8-18	3.81%
2	7.90 ± 0.58					
3	8.00 ± 0.60					
4	8.05 ± 0.61					

Fuente: Elaboración propia, 2024

El cuadro anterior muestra los datos de viscosidad cinemática del producto líquido obtenido a través del proceso de pirólisis con la primera tasa de calentamiento. Así como su análisis

estadístico. Se tomaron en cuenta los datos del Cuadro 40, junto con la información proporcionada en la figura 35.

D. ECUACIONES

Ecuación 1: Desviación estándar muestral

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

Donde:

σ = Desviación estándar muestral

x_i = Valor de la medición

\bar{x} = Valor promedio

n = No. de datos

Ecuación 2: Intervalo de confianza al 95%

$$I.C. = \bar{x} \pm t_{student} * \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

Donde:

I.C. = Intervalo de confianza al 95%

\bar{x} = Valor promedio

$t_{student}$ = Valor de t student para una cola

σ = Desviación estándar muestral

n = No. de datos

Ecuación 3: Coeficiente de variación

$$C.V. = 100\% * \frac{\sigma}{\bar{x}}$$

Donde:

C.V. = Coeficiente de variación

σ = Desviación estándar muestral

\bar{x} = Valor promedio

Ecuación 4: Cálculo de incertidumbres para sumas y restas

$$S_y = \sqrt{S_a^2 + S_b^2 + \dots + S_n^2}$$

Donde:

S_y = Incertidumbre del valor calculado por suma o resta

$S_{a,b,\dots,n}$ = Incertidumbre de los valores usados para el cálculo

Ecuación 5: Cálculo de incertidumbres para multiplicaciones y divisiones

$$S_y = y * \sqrt{\left(\frac{S_a}{a}\right)^2 + \left(\frac{S_b}{b}\right)^2 + \dots + \left(\frac{S_n}{n}\right)^2}$$

Donde:

S_y = Incertidumbre del valor calculado por multiplicación o división

y = Valor al cual se quiere calcular la incertidumbre

$S_{a,b,\dots,n}$ = Incertidumbre de los valores usados para el cálculo

a, b, \dots, n = Valores utilizados para el cálculo

Ecuación 6: Media muestral

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}$$

Donde:

\bar{x} = Valor promedio

$x_{1,2,\dots,n}$ = Valor de los diferentes datos obtenidos

n = Cantidad de repeticiones

Ecuación 7: Masa agua eliminada por el proceso de secado

$$m_{\text{agua eliminada}} = m_0 - m_1$$

Donde:

m_0 = Masa materia prima inicial antes del proceso de secado

m_1 = Masa materia prima después del proceso de secado

Ecuación 8: Balance de masa del proceso de pirólisis

$$m_{alimentación} = m_{liq} + m_{gas} + m_{char}$$

Donde:

$m_{alimentación}$ = Masa de materia prima alimentada al reactor

m_{liq} = Masa producto líquido

m_{gas} = Masa producto gaseoso

m_{char} = Masa producto sólido

Ecuación 9: Rendimiento de producto líquido

$$\% \text{ producto} = \frac{m_{liq}}{m_{alimentación}} * 100\%$$

Donde:

$\% \text{ producto}$ = Rendimiento del producto líquido en proceso de pirólisis

$m_{alimentación}$ = Masa de materia prima alimentada al reactor

m_{liq} = Masa producto líquido

Ecuación 10: Flujo másico de agua utilizado en el condensador

$$\dot{m}_{H_2O} = q_{H_2O} * \rho_{H_2O @ 25^\circ C}$$

Donde:

\dot{m}_{H_2O} = Flujo másico del agua de enfriamiento

q_{H_2O} = Caudal del agua de enfriamiento

$\rho_{H_2O @ 25^\circ C}$ = Densidad del agua a 25°C

Ecuación 11: Masa de agua de enfriamiento utilizada en el proceso de pirólisis

$$m_{H_2O} = \dot{m}_{H_2O} * t_{op}$$

Donde:

m_{H_2O} = Masa de agua de enfriamiento

\dot{m}_{H_2O} = Flujo másico del agua de enfriamiento

t_{op} = Tiempo de operación del proceso de pirólisis

Ecuación 12: Calor añadido por la mufla en el proceso de pirólisis

$$Q = \dot{Q} * t_{op}$$

Donde:

Q = Calor añadido por la mufla en el proceso de pirólisis

\dot{Q} = Potencia de la mufla

t_{op} = Tiempo de operación del proceso de pirólisis

Ecuación 13: Calor removido en el condensador

$$Q_{cond} = m_{H_2O} * C_{p_{H_2O}} * \Delta T$$

Donde:

Q_{cond} = Calor removido en el condensador por el agua

m_{H_2O} = Masa de agua utilizada durante proceso de pirólisis

$C_{p_{H_2O}}$ = Poder calorífico del agua

ΔT = Cambio de temperatura del agua en el condensador

Ecuación 14: Calor proporcionado por los productos de pirólisis

$$Q = m_p * CP_p$$

Donde:

Q = Calor proporcionado por el producto líquido, gaseoso o sólido

m_p = Masas del producto líquido, gaseoso o sólido

CP_p = Capacidad calorífica del producto líquido, gaseoso o sólido

Ecuación 15: Densidad del producto líquido obtenido del proceso de pirólisis

$$\rho = \frac{m_{liq}}{V_{liq}}$$

Donde:

ρ = Densidad del producto líquido

m_{liq} = Masa del producto líquido

V_{liq} = Volumen del producto líquido

E. CÁLCULOS DE MUESTRA

Cálculo 1: Masa de agua eliminada de la materia prima en el proceso de secado

$$m_{agua\ eliminada} = 1346.3\ g - 971.3\ g$$

$$m_{agua\ eliminada} = 375.0\ g$$

El cálculo previo se llevó a cabo para determinar la cantidad de agua eliminada durante el proceso de desecación de la materia prima. Se empleó la ecuación 7 de la sección de ecuaciones para este propósito.

Cálculo 2: Rendimiento del producto líquido

$$\% \text{ producto} = \frac{10.6\ g}{50.0\ g} * 100\%$$

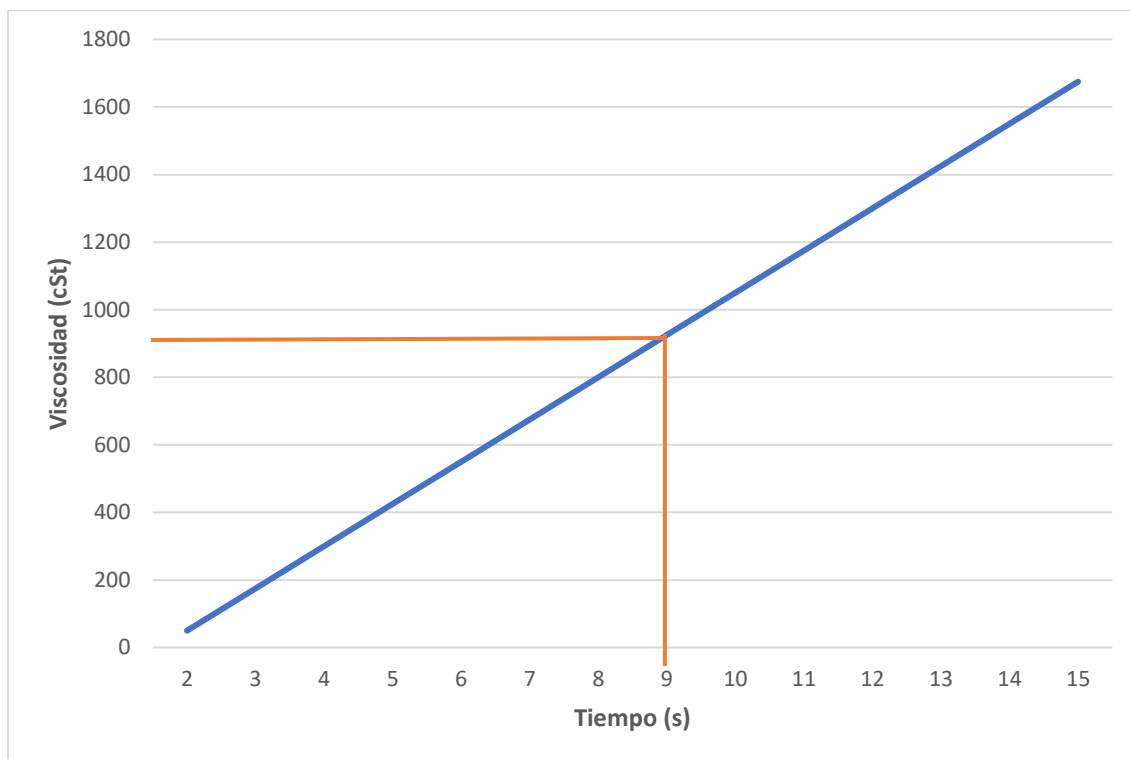
El cálculo previo se llevó a cabo con el objetivo de calcular el rendimiento porcentual del producto líquido generado durante el proceso de pirólisis. Los datos de este cálculo corresponden a una de las ejecuciones realizadas con la tasa de calentamiento 15 °C/20 min. Se aplicó la ecuación 9 de la sección de ecuaciones para este propósito.

Cálculo 3: Determinación de densidad del producto líquido obtenido

$$\rho = \frac{9.9567\ g}{10.0\ mL} * \frac{1\ kg}{1000\ g} * \frac{1000\ mL}{1\ L} * \frac{1000\ L}{1\ m^3} = 995.67\ kg/m^3$$

El cálculo anterior se llevó a cabo con el fin de establecer la densidad del producto líquido generado durante el proceso de pirólisis. Los datos de este cálculo provienen de una de las ejecuciones realizadas con una tasa de calentamiento de 15 °C/20 min. Para realizar este análisis, se empleó la ecuación 15 de la sección de ecuaciones.

Cálculo 4: Determinación de viscosidad cinemática del producto líquido obtenido



$$\mu = \frac{900}{100} = 9.0 \text{ cSt}$$

El cálculo anterior se llevó a cabo para establecer la viscosidad cinemática del producto líquido obtenido durante el proceso de pirólisis. Los datos de este análisis corresponden a una de las ejecuciones realizadas con una tasa de calentamiento de 15 °C/20 min. Para este propósito, se consultó la Figura 27 de la sección de datos originales.

Cálculo 5: Balance de masa del proceso de pirólisis

$$m_{\text{alimentación}} - m_{\text{liq}} - m_{\text{char}} = m_{\text{gas}}$$

$$m_{\text{gas}} = 50.0g - 10.6g - 23.7g$$

$$m_{\text{gas}} = 15.7g$$

El cálculo previo se llevó a cabo para calcular la cantidad de masa del producto gaseoso obtenido mediante el balance de masa del proceso de pirólisis. Los datos utilizados en este cálculo

corresponden a una de las ejecuciones realizadas con una tasa de calentamiento de 15 °C/20 min. Para este propósito, se aplicó la ecuación 8 de la sección de ecuaciones.

Cálculo 6: Flujo de agua de enfriamiento en el condensador

$$\begin{aligned}\dot{m}_{H_2O} &= q_{H_2O} * \rho_{H_2O @ 25^\circ C} \\ q_{H_2O} &= 6.01 \frac{mL}{s} * \frac{1L}{1000mL} * \frac{1m^3}{1000L} = 6.01 * 10^{-6} \frac{m^3}{s} \\ \rho_{H_2O @ 25^\circ C} &= 997.05 \frac{kg}{m^3} \\ \dot{m}_{H_2O} &= \left(6.01 * 10^{-6} \frac{m^3}{s}\right) * \left(997.05 \frac{kg}{m^3}\right) = 0.0060 \frac{kg}{s} * \frac{3600 s}{1 h} = 21.57 \frac{kg}{h}\end{aligned}$$

El cálculo se llevó a cabo con el propósito de establecer el caudal de agua de refrigeración en el condensador del proceso de pirólisis. Se empleó la ecuación 10 de la sección de ecuaciones para realizar este cálculo.

Cálculo 7: Masa de agua de enfriamiento en el condensador

$$\begin{aligned}m_{H_2O} &= 21.57 \frac{kg}{h} * 4 h \\ m_{H_2O} &= 86.29 kg H_2O\end{aligned}$$

Este cálculo se llevó a cabo para calcular la cantidad de masa de agua utilizada para el enfriamiento en el condensador durante el funcionamiento del proceso de pirólisis con la tasa de calentamiento 15°C/20 min. Se empleó la ecuación 11 de la sección de ecuaciones para este propósito.

Cálculo 8: Calor añadido por la mufla en el proceso de pirólisis

$$Q = \left(3095 \frac{J}{s} * \frac{3600s}{1h}\right) * 4h = 44,568,000J * \frac{1kJ}{1000J} = 44,568 kJ$$

Este cálculo se efectuó con el fin de determinar la energía suministrada por la mufla durante el proceso de pirólisis con el tiempo de operación correspondiente a la tasa de calentamiento 15°C/20 min. Se empleó la ecuación 12 de la sección de ecuaciones para realizar este cálculo.

Cálculo 9: Calor removido por el condensador en el proceso de pirólisis

$$Q_{cond} = 86.29 \text{ kg } H_2O * 4.182 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} * ^\circ C} * 2^\circ C$$
$$Q_{cond} = 721.73 \text{ kJ}$$

El cálculo previo se llevó a cabo con el propósito de calcular la cantidad de calor eliminado por el condensador durante el proceso de pirólisis, considerando el cambio de temperatura correspondiente a la tasa de calentamiento 15 °C/20 min. Para este análisis, se aplicó la ecuación 13 de la sección de ecuaciones.

F. ANÁLISIS DE ERROR

Cálculo 10: Media muestral de la humedad inicial de los residuos de café recolectados

$$\bar{x} = \frac{52.05\% + 51.87\% + 51.76\% + 51.22\%}{4}$$
$$\bar{x} = 51.73\%$$

Se llevó a cabo este procedimiento para establecer el promedio de la humedad inicial de los desechos de café recolectados en la Universidad del Valle de Guatemala. Se empleó la ecuación 6 de la sección de ecuaciones para realizar este cálculo.

Cálculo 11: Desviación estándar de la humedad inicial de los residuos de café recolectados

$$\sigma = \sqrt{\frac{(52.05\% - 51.73\%)^2 + (51.87\% - 51.73\%)^2 + (51.76\% - 51.73\%)^2 + (51.22\% - 51.73\%)^2}{4 - 1}}$$
$$\sigma = 0.36\%$$

Se llevó a cabo este procedimiento para establecer la desviación estándar de la humedad inicial de los desechos de café recolectados en la Universidad del Valle de Guatemala. Se empleó la ecuación 1 de la sección de ecuaciones para realizar este cálculo.

Cálculo 12: Intervalo de confianza de la humedad inicial de los residuos de café de percoladora recolectado

$$I.C._{superior} = 51.73\% + 2.3534 * \frac{0.36\%}{\sqrt{4}} = 52.15\%$$

$$I.C._{superior} = 51.73\% - 2.3534 * \frac{0.36\%}{\sqrt{4}} = 51.30\%$$

Se llevó a cabo este procedimiento para establecer el intervalo de confianza con 95% de confianza de la humedad inicial de los desechos de café recolectados en la Universidad del Valle de Guatemala. Se empleó la ecuación 2 de la sección de ecuaciones para realizar este cálculo.

Cálculo 13: Coeficiente de variación de la humedad inicial de los residuos de café de percoladora recolectado

$$C.V. = 100\% * \frac{0.36\%}{51.73\%}$$

$$C.V. = 0.69\%$$

Se llevó a cabo este procedimiento para establecer el coeficiente de variación de la humedad inicial de los desechos de café recolectados en la Universidad del Valle de Guatemala. Se empleó la ecuación 3 de la sección de ecuaciones para realizar este cálculo.

Cálculo 14: Cálculo de incertidumbres para sumas y restas

$$S_{masa\ producto\ gaseosos} = \sqrt{(0.1g)^2 + (0.1g)^2 + (0.1g)^2 + (0.1g)^2} = 0.2g$$

Se realizó este procedimiento con el fin de determinar la incertidumbre asociada a un resultado obtenido mediante operaciones de suma o resta. La incertidumbre evaluada se refiere a la masa del producto gaseoso derivado del balance de masa del cálculo 5 en la sección de cálculos de muestra. Se empleó la ecuación 4 para realizar este cálculo de incertidumbre.


Cálculo 15: Cálculo de incertidumbres para multiplicaciones y divisiones

$$S_{densidad\ producto\ líquido} = 995.67 \frac{kg}{m^3} * \sqrt{\left(\frac{0.0001g}{9.9567g}\right)^2 + \left(\frac{0.2mL}{10.0mL}\right)^2} = 19.91 \text{ kg/m}^3$$

Se realizó este procedimiento con el fin de determinar la incertidumbre asociada a un resultado obtenido mediante operaciones de multiplicaciones y divisiones. La incertidumbre evaluada se refiere a la densidad del producto líquido del proceso de pirólisis del cálculo 3 en la sección de cálculos de muestra. Se empleó la ecuación 5 para realizar este cálculo de incertidumbre.

G. ANÁLISIS EXTERNOS

Figura 37: Análisis termogravimétrico realizado a la muestra 1 de residuos de café de percoladora en Centro Tecnológico de Cementos Progreso S.A.

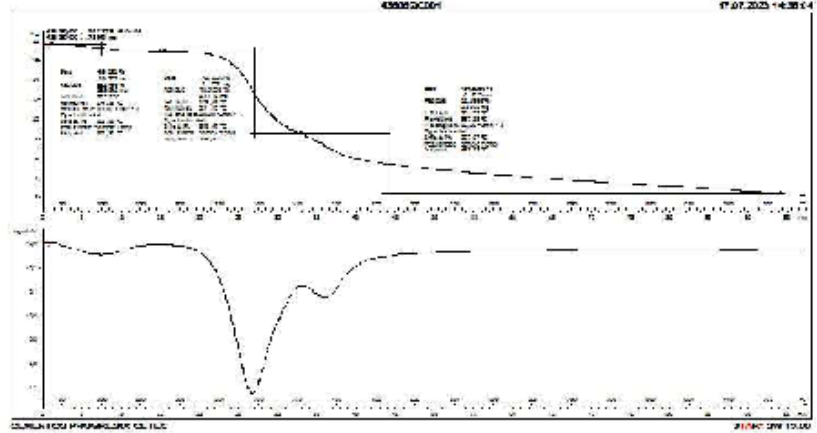
 CEMENTOS PROGRESO S. A. CENTRO TECNOLÓGICO 15 Ave. 15-01 zona 5, Finca La Pedrera, Ciudad de Guatemala, Guatemala. Tel: 2286-4178 cetec@osmpro.com				Orden de Trabajo (OT)	43805
				Fecha de emisión	2023-07-17
				Página	1 de 1
				Área de laboratorio	QC
				Fecha de recepción	-
Información del cliente	Cliente	Cementos Progreso	Dirección	Diagonal 6 15-01 Zona 10 Torre 8 Nivel 19 Edificio Centro Gerencial Las Margaritas Guatemala, Guatemala	
	Contacto	Loida Morales	Correo electrónico	-	Teléfono 2286 4100
Información de la muestra	Procedencia	Proyecto	Fecha de muestreo	-	Muestreo realizado por: Cliente
	Lugar de ensayo	Laboratorio CETEC			Fecha de OT 2023-07-12
	Proyecto	Residuo de café percoladora			Fecha de ensayo 2023-07-17

INFORME DE ENSAYO


ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO


MUESTRA Muestra # 1

43805(2023) 17.07.2023 - 14:30:14



Paso	Rango de temperatura teórica, °C		Temperatura experimental, °C	Masa perdida, %
1	36.23	174.22	100.8	3.91
2	179.03	354.99	204.9	48.2
3	354.99	967.38	463.52	34.83
--	--	--	--	--
--	--	--	--	--
--	--	--	--	--
--	--	--	--	--


 Analista



 Gerente de Laboratorio/Coordinador

Observaciones: -

CETEC NO se hace responsable de planes de muestreos y muestreos definidos por el cliente.
 CETEC NO se hace responsable de los usos que se le darán a este Informe.
 Este Informe NO es un certificado de calidad.
 Es responsabilidad del cliente la veracidad de la información proporcionada para la OT.
 CETEC proporciona únicamente resultados del(los) ensayo(s) realizado(s).
 Los resultados de ensayo se refieren únicamente a las muestras presentadas por el cliente. No debe reproducirse este Informe, a menos que se haga íntegramente.
 Este Informe es original si cuenta con holograma de seguridad, el cual está identificado con un correlativo único, para verificar la validez del mismo puede comunicarse al 2286-4178 o al correo cetec@osmpro.com.

FOR-001825

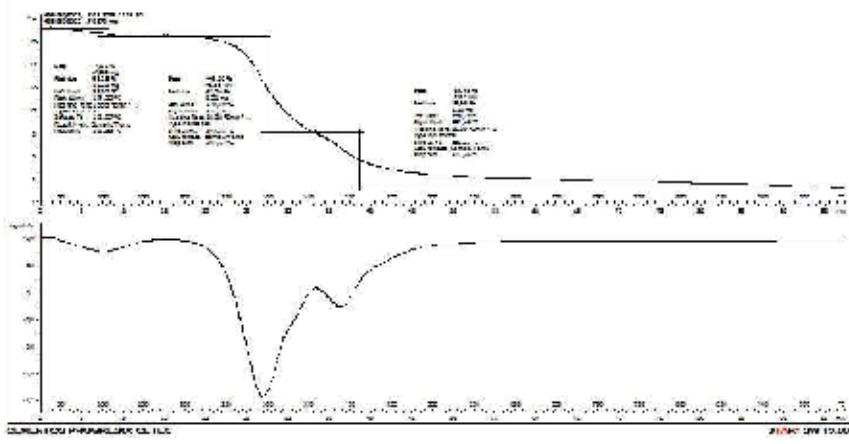
Figura 38: Análisis termogravimétrico realizado a la muestra 2 de residuos de café de percoladora en Centro Tecnológico de Cementos Progreso S.A.

 CEMENTOS PROGRESO S. A. CENTRO TECNOLÓGICO 15 Av. 15-01 zona 5, Finca La Pedrera, Ciudad de Guatemala, Guatemala. Tel: 2286-4178 cetec@cempro.com				Orden de Trabajo (OT)	43305
				Fecha de emisión	2023-07-17
				Página	1 de 1
				Área de laboratorio	QC
				Fecha de recepción	-
Información del cliente	Cliente	Cementos Progreso	Dirección	Diagonal 6 10-01 Zona 10 Torre II Nivel 19 Edificio Centro Gerencial Las Margaritas Guatemala, Guatemala	
	Contacto	Loida Morales	Correo electrónico	-	Teléfono 2286 4100
Información de la muestra	Procedencia	Proyecto	Fecha de muestreo	-	Muestreo realizado por: Cliente
	Lugar de ensayo	Laboratorio CETEC			Fecha de OT 2023-07-12
	Proyecto	Residuo de café percoladora			Fecha de ensayo 2023-07-17


INFORME DE ENSAYO
ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO


MUESTRA Muestra # 2

43305DC002 17.07.2023 14:32:03



Paso	Rango de temperatura teórica, °C		Temperatura experimental, °C	Massa perdida, %
1	37.3	174.22	101.53	4.01
2	178.5	358.2	297.57	49.1
3	358.74	961.49	411.35	27.45
-	-	-	-	-
-	-	-	-	-
-	-	-	-	-
-	-	-	-	-



 Analista


 Gerente de Laboratorio/Coordinador

Observaciones: -

CETEC NO se hace responsable de planes de muestreo y muestreo definidos por el cliente.
 CETEC NO se hace responsable de los usos que se le darán a este informe.
 Este informe NO es un certificado de calidad.
 Es responsabilidad del cliente la veracidad de la información proporcionada para la OT.
 CETEC proporciona únicamente resultados del(los) ensayo(s) realizado(s).
 Los resultados de ensayo se refieren únicamente a las muestras presentadas por el cliente. No debe reproducirse éste informe, a menos que se haga íntegramente.
 Este informe es original si cuenta con holograma de seguridad, el cual está identificado con un correlativo único, para verificar la validez del mismo puede comunicarse al 2286-4178 o al correo cetec@cempro.com.

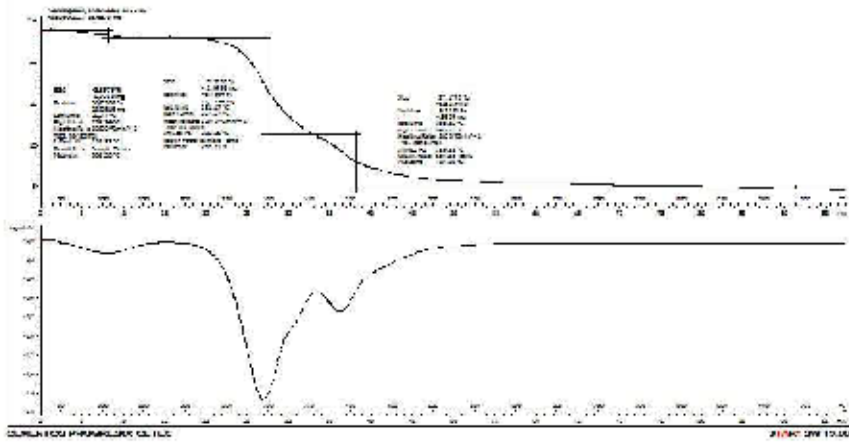
Figura 39: Análisis termogravimétrico realizado a la muestra 3 de residuos de café de percoladora en Centro Tecnológico de Cementos Progreso S.A.

 <p>CEMENTOS PROGRESO S. A. CENTRO TECNOLÓGICO 15 Av. 15-01 zona 5, Finca La Pedrera, Ciudad de Guatemala, Guatemala. Tel: 2286-4178 cetec@cempro.com</p>				<table border="1"> <tr><td>Orden de Trabajo (OT)</td><td>43808</td></tr> <tr><td>Fecha de emisión</td><td>2023-07-17</td></tr> <tr><td>Página</td><td>1 de 1</td></tr> <tr><td>Área de laboratorio</td><td>QC</td></tr> <tr><td>Fecha de recepción</td><td>-</td></tr> </table>		Orden de Trabajo (OT)	43808	Fecha de emisión	2023-07-17	Página	1 de 1	Área de laboratorio	QC	Fecha de recepción	-
Orden de Trabajo (OT)	43808														
Fecha de emisión	2023-07-17														
Página	1 de 1														
Área de laboratorio	QC														
Fecha de recepción	-														
Información del cliente	Cliente	Cementos Progreso	Dirección	Diagonal 8 10-01 Zona 10 Torre II Nivel 16 Edificio Centro Gerencial Las Margaritas Guatemala, Guatemala											
	Contacto	Loida Morales	Correo electrónico	-	Teléfono 2286 4100										
Información de la muestra	Procedencia	Proyecto	Fecha de muestreo	-	Muestreo realizado por: Cliente										
	Lugar de ensayo	Laboratorio CETEC			Fecha de OT 2023-07-12										
	Proyecto	Residuo de café percoladora			Fecha de ensayo 2023-07-17										


INFORME DE ENSAYO
ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO

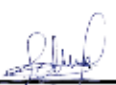
MUESTRA Muestra # 3

438082C003 17.07.2023 14:40:14



Paso	Rango de temperatura teórica, °C	Temperatura experimental, °C	Masa perdida, %
1	38.77	176.36	106.2
2	181.17	357.67	297.71
3	358.2	940.1	407.93
--	--	--	--
--	--	--	--
--	--	--	--
--	--	--	--
--	--	--	--


 Analista


 Gerente de Laboratorio/Coordinador

Observaciones: -

CETEC NO se hace responsable de planes de muestreo y muestreos definidos por el cliente.
 CETEC NO se hace responsable de los usos que se le darán a este informe.
 Este informe NO es un certificado de calidad.
 Es responsabilidad del cliente la veracidad de la información proporcionada para la OT.
 CETEC proporciona únicamente resultados del(los) ensayo(s) realizado(s).
 Los resultados de ensayo se refieren únicamente a las muestras presentadas por el cliente. No debe reproducirse éste informe, a menos que se haga íntegramente.
 Este informe es original al cuenta con holograma de seguridad, el cual está identificado con un correlativo único, para verificar la validez del mismo puede comunicarse al 2286-4178 o al correo cetec@cempro.com.

FOR-001926

H. METODOLOGÍA MUESTREO

La metodología de muestreo para la recolección de muestras de residuos de café debe ser cuidadosamente diseñada para asegurar que las muestras sean representativas y adecuadas para el análisis posterior. Aquí se presenta una metodología básica que se podría seguir:

1. Definir el objetivo de muestreo

Antes de comenzar, es importante definir claramente qué es lo que se quiere estudiar o analizar en los residuos de café. Por ejemplo, se podría estar interesado en la concentración de ciertos compuestos químicos, la presencia de contaminantes, o la composición de nutrientes.

2. Seleccionar el lugar de muestreo

Identificar los lugares donde se van a recolectar las muestras de residuos de café. Esto puede incluir:

- Plantas de procesamiento de café.
- Puntos de venta de café (cafeterías, tiendas).
- Lugares donde se consuma café regularmente.

3. Diseñar el plan de muestreo

- Tipo de muestra: Determinar si se va a recolectar muestras de café residual sólido (como posos de café) o líquido (por ejemplo, agua de lavado de café).
- Tamaño de la muestra: Definir cuántas muestras se van a recolectar. Según el marco teórico, se debe tomar en cuenta los posibles errores y la cantidad teórica necesaria.
- Ubicación y puntos de muestreo: Seleccionar los puntos específicos dentro de cada sitio donde se van a recolectar las muestras. Asegurarse de que estos puntos sean representativos de las prácticas de manejo de residuos de café en el lugar.

4. Métodos de recolección de muestras

- Muestreo aleatorio: Si es posible, utilizar un método de muestreo aleatorio para seleccionar las muestras de manera que todos los residuos tengan la misma probabilidad de ser incluidos.
- Técnica de muestreo: La técnica de recolección va a depender del tipo de residuo. Por ejemplo, para posos de café, podrías utilizar una cuchara estéril para recolectar muestras representativas de diferentes partes del recipiente o superficie donde se acumulan.
- Conservación de la muestra: Después de recolectar cada muestra, asegurarse de etiquetarla correctamente y almacenarla adecuadamente para mantener la integridad de los residuos y evitar la contaminación cruzada.

Consideraciones adicionales

- Control de variables: Intenta mantener controladas otras variables que puedan afectar la composición de los residuos de café, como el tiempo de almacenamiento, la temperatura o la exposición a contaminantes ambientales.
- Ética y seguridad: Asegúrate de cumplir con las normativas éticas y de seguridad relacionadas con la manipulación de residuos y el trabajo en el lugar de muestreo.

Al seguir esta metodología, podrás obtener muestras de residuos de café que sean representativas y adecuadas para el análisis científico o técnico que desees realizar.

XIII. ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Materia prima antes de ser sometida a proceso de secado



Fuente: Elaboración propia, 2024

Materia prima recolectada en food truck de Universidad del Valle de Guatemala. Equipos utilizados pertenecen al Laboratorio de Operaciones Unitarias de dicha universidad.

Ilustración 2: Humedad inicial de la materia prima



Fuente: Elaboración propia, 2024

Equipos y mediciones realizadas en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.

Ilustración 3: Estufa eléctrica donde se realizó el proceso de secado de la materia prima



Fuente: Elaboración propia, 2024

Equipos y mediciones realizadas en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.

Ilustración 4: Masa final de materia prima después del proceso de secado



Fuente: Elaboración propia, 2024

Equipos y mediciones realizadas en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.

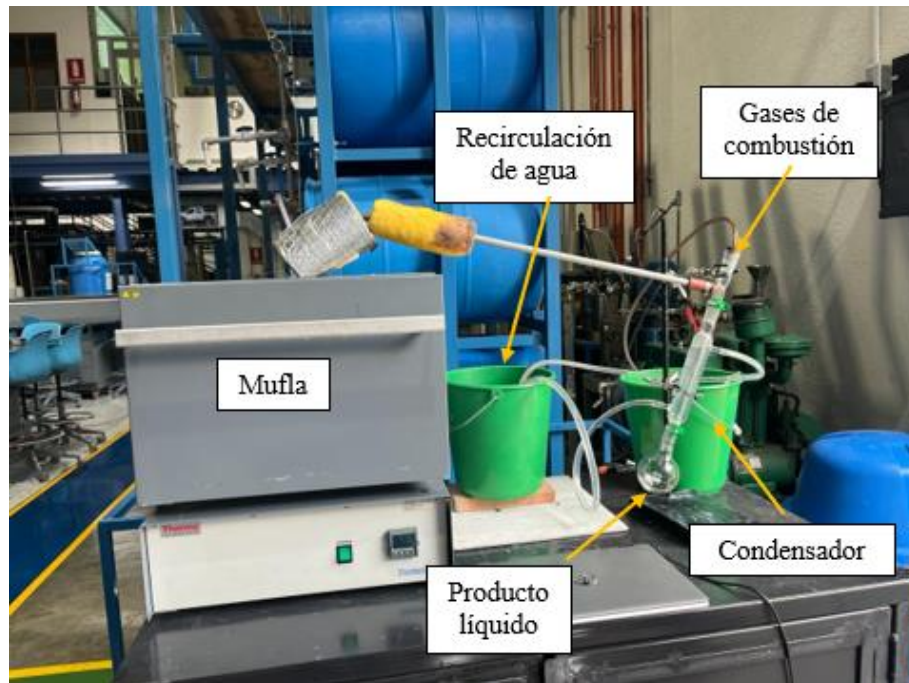
Ilustración 5: Humedad final de la materia prima luego del proceso de secado



Fuente: Elaboración propia, 2024

Equipos y mediciones realizadas en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.

Ilustración 6: Sistema para llevar a cabo el proceso de pirólisis



Fuente: Elaboración propia, 2024

Equipos y mediciones realizadas en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.

Ilustración 7: Reactor de pirólisis de 100g



Fuente: Elaboración propia, 2024

Equipos y mediciones realizadas en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.

Ilustración 8: Mufla ThermoScientific THERMOLYNE



Fuente: Elaboración propia, 2024

Equipos y mediciones realizadas en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.

Ilustración 9: Kit de destilación CORNING ORGANIC CHEMISTRY KIT



Fuente: Elaboración propia, 2024

Equipos y mediciones realizadas en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.

Ilustración 10: Masa de materia prima utilizada para el proceso de pirólisis



Fuente: Elaboración propia, 2024

Equipos y mediciones realizadas en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.

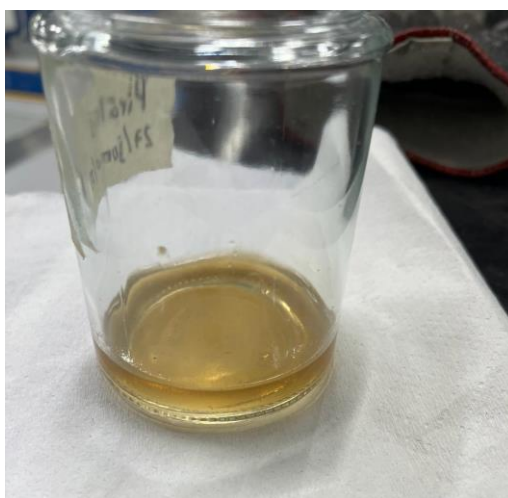
Ilustración 11: Producto líquido obtenido por proceso de pirólisis



Fuente: Elaboración propia, 2024

Equipos y mediciones realizadas en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.

Ilustración 14: Total de producto líquido obtenido de una de las corridas de proceso de pirólisis realizada



Fuente: Elaboración propia, 2024

Equipos y mediciones realizadas en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.

Ilustración 15: Bomba calorimétrica IKA C200



Fuente: Elaboración propia, 2024

Equipos y mediciones realizadas en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.

Ilustración 16: Bomba calorimétrica IKA C200



Fuente: Elaboración propia, 2024

Equipos y mediciones realizadas en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.

XIV. GLOSARIO

- **Análisis termogravimétrico:** Es un procedimiento de análisis térmico que consiste en medir la masa de una muestra a medida que varía la temperatura a lo largo del tiempo.
- **Balance de masa y energía:** Se emplean para registrar y calcular los movimientos de materia y energía entre un proceso industrial específico y su entorno, o entre las diferentes etapas que lo conforman.
- **Bioaceite:** El líquido resultante de un proceso de pirólisis, ya sea de manera lenta o rápida.
- **Biocombustibles:** Se refieren a combustibles renovables obtenidos a partir de recursos naturales o de desechos orgánicos, tanto de origen animal como vegetal.
- **Biomasa:** Material de origen orgánico empleado como fuente de energía, como los residuos de café de percoladora.
- **Bomba calorimétrica:** Es un aparato tradicionalmente empleado para calcular el poder calorífico de muestras de combustible sólido y líquido bajo condiciones de volumen constante.
- **Cromatografía de gases-masas:** Es un método que fusiona la capacidad de separación de la cromatografía de gases con la sensibilidad y selectividad del detector de masas. Esta unión posibilita el análisis y la cuantificación de trazas de compuestos en mezclas complejas con gran eficacia.
- **Densidad:** Es la proporción entre la masa de una sustancia y el espacio que esta ocupa en volumen.
- **Humedad:** Es un parámetro físico que se define de manera formal como la cantidad de agua que está disuelta en un gas o absorbida por un sólido.
- **Pirólisis:** Es el proceso de descomposición química de materiales orgánicos y diversos tipos de sustancias, excluyendo metales y vidrios, provocado por el calentamiento a temperaturas elevadas en ausencia de oxígeno.
- **Poder calorífico:** Es la medida de la energía liberada por unidad de masa.
- **Poso de café:** Es el material que queda después de preparar café mediante métodos de extracción como la filtración, la percolación o la preparación con cafetera de émbolo.
- **Viscosidad:** La resistencia que los materiales ofrecen a fluir y experimentar cambios en su forma.