



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
CARRERA INGENIERÍA AMBIENTAL

**EVALUACIÓN DEL PROCESO DE CO-PIRÓLISIS DE MEZCLAS
DE BIOMASA LIGNOCELULÓSICA Y RESIDUOS PLÁSTICOS
PARA LA OBTENCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLE**

Trabajo de Integración Curricular

Tipo: Proyecto de Investigación

Presentado para optar el grado académico de:

INGENIERA AMBIENTAL

AUTORA: KATHERINE LISSETTE ULPO CARRERA

DIRECTOR: Ing. PAÚL GUSTAVO PALMAY PAREDES MSc.

Riobamba – Ecuador

2022

©2022, Katherine Lissette Ulpo Carrera

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

Yo, KATHERINE LISSETTE ULPO CARRERA, declaro que el presente Trabajo de Integración Curricular es de mi autoría y que los resultados del mismo son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otra fuente están debidamente citados y referenciados.

Como autora asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de Integración Curricular; el patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 13 de Abril de 2022



Katherine Lissette Ulpo Carrera
180534234-0

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
CARRERA INGENIERÍA AMBIENTAL

El Tribunal del Trabajo de Integración Curricular certifica que: El Trabajo de Integración Curricular; Tipo: Proyecto de Investigación, **EVALUACIÓN DEL PROCESO DE COPIRÓLISIS DE MEZCLAS DE BIOMASA LIGNOCELULÓSICA Y RESIDUOS PLÁSTICOS PARA LA OBTENCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLE**, realizado por la señorita: **KATHERINE LISSETTE ULPO CARRERA**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del Trabajo de Integración Curricular, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal autorizada su presentación.

	FIRMA	FECHA
Ing. Paulina Fernanda Bolaños Logroño MSc. PRESIDENTA DEL TRIBUNAL		2022-04-13
Ing. Paúl Gustavo Palmay Paredes MSc. DIRECTOR DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR		2022-04-13
Ing. Andrés Agustín Beltrán Dávalos MSc. MIEMBRO DEL TRIBUNAL		2022-04-13

DEDICATORIA

A mis padres, a mis hermanos, a mi sobrinito Damián, a mi Melissa y todos aquellos ángeles en mi vida, sobre todo a mi abuelita Rosa porque todo tu amor y consejos inculcados en mí por 19 años me enseñaron a luchar y no desvanecer, siempre pusiste tu confianza en mí y aunque ya no estes presente en mi vida te llevo en mi corazón y anhelo estés orgullosa de mí. Todo mi esfuerzo va dedicado a ustedes. Los amo infinitamente.

Katherine

AGRADECIMIENTO

A Dios por ser luz y guía en mi vida. A la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo por darme la oportunidad de forjarme como profesional en sus aulas. A mis padres Carmen y Rodrigo por ser mi fortaleza, por sus consejos y su amor incondicional, a mis hermanos por su apoyo y cariño. A mis amigos que siempre han estado presentes dándome ánimos para seguir adelante, pero sobre todo a mi mejor amigo Daniel gracias por tu amistad sincera. A todas las personas que han estado presentes apoyándome durante todo este proceso, a mi tutor el Ing. Paúl Palmay por su amistad, por su paciencia, por las oportunidades que me ha brindado, por transmitirme su confianza y compartir sus conocimientos conmigo gracias a usted todo esto es posible, al Ing. Andrés Beltrán por su amistad, su apoyo desinteresado y sus consejos para poder llevar a cabo este propósito, de igual manera a la Ing. Paulina Bolaños por todo el apoyo brindado, a los docentes, técnicos, pasantes, y a todas las personas que me han prestado su ayuda mil gracias.

Katherine

TABLA DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE TABLAS.....	ix
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	xi
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xii
ÍNDICE DE ABREVIATURAS.....	xiii
RESUMEN.....	xiv
ABSTRACT.....	xv
INTRODUCCIÓN.....	1

CAPÍTULO I

1. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL.....	4
1.1. Marco Teórico.....	4
1.1.1. Antecedentes.....	4
1.2. Marco Conceptual.....	6
1.2.1. Biomasa lignocelulósica.....	6
1.2.1.1. Componentes principales de la biomasa lignocelulósica.....	6
1.2.1.2. Clasificación de la biomasa lignocelulósica.....	8
1.2.1.3. Residuos de biomasa lignocelulósica.....	8
1.2.2. Plásticos.....	8
1.2.2.1. Clasificación.....	8
1.2.2.2. Tipos de plásticos.....	9
1.2.2.3. Poliestireno.....	10
1.2.2.4. Polipropileno.....	11
1.2.2.5. Residuos plásticos.....	11
1.2.3. Tecnologías de tratamiento de residuos.....	11
1.2.4. Co-pirólisis.....	12
1.2.4.1. Tipos de co-pirólisis.....	12
1.2.4.2. Parámetros que intervienen en la co-pirólisis.....	13
1.2.4.3. Productos de la co-pirólisis.....	15
1.2.4.4. Influencia del plástico en los productos líquidos de co-pirólisis.....	15
1.2.5. Biocombustibles.....	16
1.2.5.1. Clasificación de los biocombustibles.....	16

CAPÍTULO II

2.	MARCO METODOLÓGICO	18
2.1.	Localización de estudio	18
2.2.	Método de muestreo	18
2.3.	Técnicas de recolección de datos	19
2.3.1.	<i>Recolección de las muestras</i>	19
2.3.2.	<i>Preparación de la biomasa</i>	20
2.3.3.	<i>Análisis elemental orgánico de la biomasa lignocelulósica</i>	21
2.3.4.	<i>Determinación del número de pruebas co-pirólíticas</i>	22
2.3.5.	Preparación de las mezclas de biomasa y residuos plásticos	22
2.3.6.	<i>Preparación del equipo pirolítico</i>	22
2.3.7.	<i>Pruebas de co-pirólisis</i>	23
2.3.8.	<i>Caracterización de los productos obtenidos</i>	24
2.3.9.	<i>Análisis estadístico</i>	30

CAPÍTULO III

3.	MARCO DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	34
3.1.	Resultados	34
3.1.1.	<i>Resultados del contenido de la humedad de la Biomasa</i>	34
3.1.2.	<i>Resultados análisis elemental orgánico de la biomasa lignocelulósica</i>	35
3.1.3.	<i>Resultados de los rendimientos de los productos de co-pirólisis</i>	35
3.1.4.	<i>Resultados de destilación del biocombustible</i>	38
3.1.5.	<i>Resultados de densidad, densidad relativa y gravedad API</i>	39
3.1.6.	<i>Resultados de viscosidad</i>	40
3.1.7.	<i>Resultado de poder calorífico</i>	40
3.1.8.	<i>Punto de inflamación</i>	41
3.1.9.	<i>Índice de Cetano Calculado</i>	41
3.1.10.	<i>Análisis FT-IR</i>	42
3.1.10.1.	<i>Análisis FT-IR de los productos sólidos</i>	42
3.1.10.2.	<i>Análisis FT-IR productos líquidos</i>	43
3.1.11.	<i>Resultados análisis cromatográfico GC-MS</i>	47
3.1.12.	<i>Análisis estadístico</i>	49
3.2.	Discusión	51

CONCLUSIONES	54
RECOMENDACIONES	56
BIBLIOGRAFÍA	
ANEXOS	

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1: Clasificación de la biomasa lignocelulósica según su procedencia.....	8
Tabla 2-1: Tipos de plásticos	9
Tabla 1-3: Resultados análisis elemental orgánico de la biomasa lignocelulósica	35
Tabla 2-3: Peso en gramos de los productos obtenidos en el proceso de co-pirólisis T1-C1 ..	35
Tabla 3-3: Rendimiento en porcentaje (%) de los productos obtenidos de co-pirólisis T1-C1	35
Tabla 4-3: Peso en gramos de los productos obtenidos en el proceso de co-pirólisis T1-C2 ..	36
Tabla 5-3: Rendimiento en porcentaje (%) de los productos obtenidos de co-pirólisis T1-C2	36
Tabla 6-3: Peso en gramos de los productos obtenidos en el proceso de co-pirólisis T2-C1 ..	36
Tabla 7-3: Rendimiento en porcentaje (%) de los productos obtenidos de co-pirólisis T2-C1	36
Tabla 8-3: Peso en gramos de los productos obtenidos en el proceso de co-pirólisis T2-C2 ..	36
Tabla 9-3: Rendimiento en porcentaje (%) de los productos obtenidos de co-pirólisis T2-C2	37
Tabla 10-3: Curva de destilación	38
Tabla 11-3: Resultados de densidad, densidad relativa y gravedad API	39
Tabla 12-3: Clasificación de los combustibles según su gravedad API y su densidad.....	39
Tabla 13-3: Resultados de viscosidad cinemática.....	40
Tabla 14-3: Resultados punto de inflamación del biocombustible	41
Tabla 15-3: Resultados del índice de cetano calculado	41
Tabla 16-3: Espectros análisis FT-IR.....	45
Tabla 17-3: Hidrocarburos presentes en el biocombustible a T2-C1.....	48
Tabla 18-3: Hidrocarburos presentes en el biocombustible a T2-C2.....	48
Tabla 19-3: Tipos de hidrocarburos por el número de carbonos.....	48
Tabla 20-3: Resumen estadístico descriptivo para el rendimiento.....	49
Tabla 21-3: Prueba de hipótesis T-student.....	51

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1:	Estructura de la celulosa	6
Figura 2-1:	Estructura de la hemicelulosa	7
Figura 3-1:	Estructura de la lignina	7
Figura 4-1:	Polimerización del poliestireno.....	10
Figura 5-1:	Polimerización del polipropileno	11
Figura 6-1:	Tecnologías de tratamiento de residuos	12
Figura 1-2:	Ubicación Laboratorio de Operaciones Unitarias ESPOCH.....	18
Figura 2-2:	Residuos de poda recolectados	19
Figura 3-2:	Residuos plásticos de PS y PP	19
Figura 4-2:	Muestras de biomasa seca.....	20
Figura 5-2:	Balanza de humedad.	21
Figura 6-2:	Equipo de molienda y tamizado.....	21
Figura 7-2:	Mezcla de biomasa y residuos plásticos	22
Figura 8-2:	Equipo pirolítico	24
Figura 9-2:	Destilador ASTM.....	25
Figura 10-2:	Sistema de análisis de viscosidad.....	27
Figura 11-2:	Equipo para el análisis del punto de inflamación.....	28
Figura 12-2:	Espectrofotómetro de Infrarrojo	29
Figura 1-3:	Biomasa triturada	34

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1-2:	Diagrama del proceso completo de co-pirólisis	32
Gráfico 2-2:	Esquema del diseño experimental	33
Gráfico 1-3:	Rendimiento de los productos obtenidos de la co-pirólisis	38
Gráfico 2-3:	Curva general de destilación	38
Gráfico 3-3:	Curvas de destilación.....	39
Gráfico 4-3:	Análisis comparativo IR de los residuos sólidos obtenidos	42
Gráfico 5-3:	Análisis comparativo IR del producto líquido a T1-C1 con diésel comercial....	43
Gráfico 6-3:	Análisis comparativo IR del producto líquido a T1-C2 con diésel comercial....	43
Gráfico 7-3:	Análisis comparativo IR del producto líquido a T2-C1 con diésel comercial....	44
Gráfico 8-3:	Análisis comparativo IR del producto líquido a T2-C2 con diésel comercial....	44
Gráfico 9-3:	Familias de hidrocarburos de los biocombustibles a T2-C1 y T2-C2	49
Gráfico 10-3:	Gráfico de Caja y Bigotes	50

ÍNDICE DE ANEXOS

- ANEXO A:** PROCESO COMPLETO PARA LA OBTENCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLE MEDIANTE CO-PIRÓLISIS
- ANEXO B:** ANÁLISIS CROMATOGRÁFICO DEL COMBUSTIBLE T2-C1, N#1
- ANEXO C:** ANÁLISIS CROMATOGRÁFICO DEL COMBUSTIBLE T2-C1, N#2
- ANEXO D:** ANÁLISIS CROMATOGRÁFICO DEL COMBUSTIBLE T2-C1, N#3
- ANEXO E:** ANÁLISIS CROMATOGRÁFICO DEL BIOCOMBUSTIBLE A T2-C2, N#1
- ANEXO F:** ANÁLISIS CROMATOGRÁFICO DEL BIOCOMBUSTIBLE A T2-C2, N#2
- ANEXO G:** ANÁLISIS CROMATOGRÁFICO DEL BIOCOMBUSTIBLE A T2-C2, N#3

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

PP	Polipropileno
PS	Poliestireno
PE	Polietileno
HDPE	Polietileno de alta densidad
LDPE	Polietileno de baja densidad
PET	Tereftalato de polietileno
PVC	Cloruro de polivinilo
°C	Grados centígrados
%H	Porcentaje de humedad
P_i	Peso inicial
P_f	Peso final
CHN	Carbono, hidrógeno, nitrógeno
%R	Rendimiento
ρ	Densidad
m	Masa
v	Volumen
ν	Viscosidad cinemática
η	Viscosidad absoluta
C	Constante de calibración del viscosímetro
t	Tiempo
ASTM	American Society for Testing and Materials
G	Gravedad API
GE	Gravedad específica
ICC	Índice de Cetano Calculado
D	Densidad a 15 °C
B	Temperatura media de ebullición, °C
FT-IR	Espectroscopía Infrarroja Transformada de Fourier
GC-MS	Cromatografía de Gases acoplada a espectrometría de masas
T1	Temperatura 1
T2	Temperatura 2
C1	Composición 1
C2	Composición 2

RESUMEN

El objetivo de la presente investigación fue evaluar el proceso de co-pirólisis de la mezcla de biomasa lignocelulósica con residuos plásticos de poliestireno (PS) y polipropileno (PP) para obtener biocombustible y determinar sus principales características fisicoquímicas. Para llevar a cabo el procedimiento se utilizó un reactor tipo batch con una tasa calentamiento de 12 °C·min⁻¹ a una presión de -0,05 MPa purgado con nitrógeno y conectado a un sistema de enfriamiento que alimentaba agua a 10 °C con el fin de condensar los gases. Para las pruebas de co-pirólisis se trabajó con una temperatura de 400 °C (T1) y otra de 450 °C (T2) con 2 composiciones de mezcla, la primera denominada C1 que contenía 25% de biomasa y 75% plástico (50% PS y 50% PP), la segunda denominada C2 con 25% de biomasa y 75% plástico (75% PS y 25% PP), obteniendo productos sólidos, líquidos (biocombustibles) y gaseosos. Para la caracterización de los biocombustibles obtenidos se utilizaron técnicas de Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FT-IR), Cromatografía de Gases Acoplada a Espectrometría de Masas (GC-MS) y normativas para combustibles. Como resultado el máximo rendimiento de los biocombustibles fue del 73% a 450 °C con la mezcla C2, constituidos principalmente por compuestos oxigenados, olefinas, naftenos y compuestos nitrogenados esto debido a la composición elemental de la biomasa, además, su poder calorífico fue de 40152 kJ·kg⁻¹. En conclusión se determinó que el biocombustible con mayor rendimiento se debió a la presencia de PS que por su estructura polimérica fue más fácil su despolimerización por adición de calor, por otro lado, de acuerdo con sus características fisicoquímicas este podría ser utilizado como aditivo de combustibles convencionales, por lo que se recomienda que el biocombustible no sea empleado de forma directa en motores.

Palabras clave: <INGENIERÍA AMBIENTAL>, <TRATAMIENTO DE RESIDUOS>, <CO-PIRÓLISIS>, <BIOMASA LIGNOCELULÓSICA>, <RESIDUOS PLÁSTICOS>, <POLIESTIRENO>, <POLIPROPILENO>, <BIOCOMBUSTIBLE>.

LEONARDO
FABIO
MEDINA
NUSTE

Firmado digitalmente por LEONARDO
FABIO MEDINA NUSTE
Nombre de reconocimiento (DN):
c=EC, o=BANCO CENTRAL DEL
ECUADOR, ou=ENTIDAD DE
CERTIFICACION DE INFORMACION-
ECBCE, l=QUITO,
serialNumber=000621485,
cn=LEONARDO FABIO MEDINA NUSTE
Fecha: 2022.04.25 11:08:15 -05'00'



0775-DBRA-UTP-2022

ABSTRACT

The aim of the current research was to evaluate the co-pyrolysis process of the lignocellulosic biomass with polystyrene (PS) and polypropylene (PP) plastic waste mixture to obtain biofuel and determine its main physicochemical characteristics. The procedure was carried out in a batch reactor with a heating rate of 12 °C-min⁻¹ at a pressure of -0.05 MPa, this was purged with nitrogen and connected to cooling system which provides water at 10 °C to condense the gases. For the copyrolysis tests, it was necessary to work at a temperature of 400 °C (T1) and 450 °C (T2) with 2 mixture compositions; the first composition was called C1 and contained 25% biomass and 75% plastic (50% PS and 50% PP), the second one was called C2 and contained 25% biomass and 75% plastic (75% PS and 25% PP); in this way, solid, liquid (biofuels) and gaseous products were obtained. Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR) as well as Gas Chromatography coupled to Mass Spectrometry (GC-MS) and fuel standards were used to characterize the biofuels obtained. As a result, the maximum yield of biofuels was determined in a 73% at 450 °C with C2 mixture, which mainly contained oxygenated compounds, olefins, naphthenes and nitrogenous compounds due to the elemental composition of the biomass. In addition, its calorific value was 40152 kJ·kg⁻¹. It was concluded that the biofuel with the highest yield was the one which evidenced the presence of PS, which due to its polymeric structure was easier to depolymerize through the heat addition; on the other hand and according to its physicochemical characteristics it could be used as an additive for conventional fuels, so it is recommended not to use biofuel directly in engines.

Keywords: : <ENVIRONMENTAL ENGINEERING>, <WASTE TREATMENT>, <CO-PYROLYSIS>, <LIGNOCELLULOSE BIOMASS>, <PLASTIC RESIDUES>, <POLYSTYRENE>, <POLYPROPYPYLENE>, <BIOFUEL>.



Firmado electrónicamente por:

**PAUL ROLANDO
ARMAS PESANTEZ**

INTRODUCCIÓN

Para el proceso de co-pirólisis se trabaja a temperaturas en un rango de 350 °C a 650 °C, en el cual se obtienen 3 tipos de productos: carbón, aceite y gas, pero para obtener un porcentaje líquido más alto en comparación a los otros productos las condiciones de la temperatura y la composición de la mezcla a utilizar en el proceso no son específicamente conocidas, es decir, teóricamente se han encontrado temperaturas que favorecen al rendimiento líquido o del aceite en un rango de 400 °C a 500 °C, pero no una temperatura propia, de igual manera la composición de la mezcla de residuos no es característica. Además del rendimiento, la composición química del producto obtenido también depende de ambas variables, ya que la temperatura y la composición de la mezcla de residuos plásticos y residuos de biomasa lignocelulósica, son importantes en el resultado final esto se debe a que ambos factores según investigaciones anteriores pueden alterar su composición y obtener un biocombustible de buenas características o contrarias.

Hoy en día con la alta generación y acumulación de residuos orgánicos y residuos plásticos acompañados del agotamiento de las energías convencionales como son los combustibles fósiles se han ido explorando energías alternas producidas a base de estos residuos. Generalmente, los métodos de conversión bioquímicos o termoquímicos se emplean normalmente para convertir este tipo de residuos en energía útil (Uzoejinwa et al., 2018, p.468), dentro de estos métodos la co-pirólisis siendo el punto de partida para los procesos de combustión y gasificación de mezclas de combustibles fósiles y renovables es un tratamiento considerable para conseguir un combustible alternativo líquido conocido como biocombustible (Bonelli, 2019, p.63). Sin embargo, aun sabiendo que las condiciones del proceso pueden alterar ciertas características del biocombustible, se puede determinar las mejores condiciones para obtener un biocombustible con un buen rendimiento y de buenas características mediante experimentación, por lo que la co-pirólisis es un método o tratamiento térmico opcional con el que se puede obtener buenos resultados. Asimismo, según Uzoejinwa et al. (2018, p.469), la co-pirólisis es un proceso de producción simple y seguro para combustibles de alta calidad, ya que no produce hidrogenación a alta presión; por lo tanto, la transferencia de hidrógeno también puede estar involucrada en la co-pirólisis bajo condiciones de presión ambiental. Por lo tanto, el proceso de co-pirólisis de biomasa y plástico es un método de mejora eficaz que no solo aumentará la cantidad de aceite producido, sino que también mejorará su calidad en términos de alto poder calorífico, porque los plásticos sintéticos son característicamente polímeros derivados principalmente de productos del petróleo con alto contenido de carbono e hidrógeno, que tienen poco o ningún oxígeno que es favorable para la calidad del combustible, ya que, una de las características principales para que un biocombustible sea bueno es que tenga bajo contenido de oxígeno y agua por lo que también es importante que la biomasa tenga un porcentaje de humedad baja o nula que se puede alcanzar mediante un proceso

de secado a 105 °C durante 24 horas en una estufa, y además estos combustibles alternos ofrecen un alto poder calorífico comparable al de los combustibles fósiles convencionales (diésel y gasolina).

Por lo tanto, la co-pirólisis siendo un tratamiento térmico de residuos es eficiente para obtener biocombustible de buenas propiedades a condiciones adecuadas, además, al no ser un proceso tan complejo se podría implementar a nivel industrial en el futuro siendo una alternativa energética que pueda dar posibles soluciones a problemas ambientales.

OBJETIVOS

❖ Objetivo General

- Evaluar el proceso de co-pirólisis de mezclas de biomasa lignocelulósica y residuos plásticos para la obtención de biocombustible.

❖ Objetivos específicos

- Determinar los puntos de ajuste de operación del proceso de co-pirólisis mediante revisión bibliográfica y pruebas en el equipo pirolítico.
- Determinar la influencia en el rendimiento líquido del tipo de plástico usado en la co-pirólisis de biomasa lignocelulósica.
- Evaluar los productos líquidos obtenidos del proceso de co-pirólisis mediante su caracterización.

CAPÍTULO I

1. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

1.1. Marco Teórico

1.1.1. Antecedentes

En Ecuador en el 2012 se determinó una generación anual de residuos sólidos de 4.1 millones de toneladas, es decir, aproximadamente una persona producía 0,73 kg/hab*día de residuos y se tenía una estimación para el 2017 de 5.5 millones de toneladas anuales, por lo cual se requería de una gestión y tratamiento de residuos adecuada ya que éstos son fuentes de contaminación del suelo, agua y aire. Debido al aumento de ingresos, aumento de consumo y altas tasas de crecimiento urbano e industrial la generación de RSU es más relevante (MAE-PNGIDS, 2014, p.2). Los residuos sólidos urbanos (RSU) son generados por actividades domésticas y pueden ser clasificados en: papel, cartón, plásticos, vidrios, residuos de comida, jardines y materiales orgánicos similares, entre otros (Rosario Flores, 2016, p.9). Debido al impacto causado por la generación de estos desechos se han ideado varios sistemas de tratamiento de residuos implementando nuevas tecnologías. Haciendo un enfoque en los residuos orgánicos y los residuos plásticos que tienen un consumo alto, en varios estudios se han aplicado diferentes tratamientos para estos residuos, por un lado el tratamiento de los plásticos se ha dado por reciclaje mecánico, reciclaje químico y la recuperación energética (Espinoza, 2009, pp.5-6) y por otro lado para los residuos orgánicos que comprenden a la biomasa lignocelulósica se han venido realizando tratamientos como: la conversión biológica, la conversión mecánica, la conversión química y la conversión termoquímica (Salinas et al., 2018, p.25).

Enfocándonos en los procesos de tratamientos térmicos que involucran a la co-pirólisis que surge de la mezcla de dos tipos de residuos diferentes como la biomasa lignocelulósica y plásticos de distintos tipos, a continuación se muestran estudios que detallan la obtención de combustibles a partir de este proceso y cuáles fueron las condiciones óptimas de operación con las que se trabajó y, además, cuales fueron los resultados obtenidos.

“EFECTOS DE DIFERENTES CONDICIONES SOBRE LA CO-PIRÓLISIS COMPORTAMIENTO DEL RASTROJO DE MAÍZ Y EL POLIPROPILENO” Fengze Wu, Haoxi Ben, Yunyi Yang, Hang Jia, Rui Wang and Guangting Han.

En esta investigación los resultados mostraron que la co-pirólisis de rastrojo de maíz y polipropileno puede incrementar el rendimiento del aceite de pirólisis. En una proporción 1:3 de maíz: polipropileno, el rendimiento de aceite de pirólisis fue de 52.1%. Con el aumento de la

temperatura de pirólisis, el rendimiento de aceite de pirólisis aumentó primero y luego disminuyó, y alcanzó el rendimiento óptimo a 550 °C (Wu et al., 2020, p.1).

“CO-PIRÓLISIS DE RESIDUOS PLÁSTICOS Y BIOMASA SÓLIDA PARA LA PRODUCCIÓN SINÉRGICA DE BIOCOMBUSTIBLES Y PRODUCTOS QUÍMICOS: UNA REVISIÓN”. Zhiwei Wang, Kiran G. Burra, Tingzhou Lei, Ashwani K. Gupta.

En esta revisión nos señala que en el producto líquido obtenido de la co-pirólisis el alto contenido de hidrógeno, especialmente de HDPE, LDPE, PP y PS, puede proporcionar transferencia de H durante el proceso con biomasa leñosa (lignocelulósica) y proporcionaría un mayor rendimiento de líquido obteniendo hasta un 60% a temperaturas de 400 a 600 °C, además, se producen efectos sinérgicos entre ambos residuos que pueden mejorar la composición química de los productos y su poder calorífico (Wang et al., 2021, p.37).

“PRODUCCION DE HIDROCARBUROS A PARTIR DE LA PIROLISIS DE NUEZ DE MANGO CON CATALIZADORES Y MEZCLA CON PLÁSTICO” Aguilar Carlos.

Esta investigación ha demostrado la efectividad de la co-pirólisis de biomasa (nuez de mango) con plástico (LDPE) trabajando a una temperatura de reacción de 450 °C obteniendo un rendimiento de productos líquidos de hasta un 70% (Husada, 2019, p.2).

“CO-PIRÓLISIS DE BIOMASA Y RESIDUOS PLÁSTICOS COMO TECNOLOGÍA DE CONVERSIÓN TERMOQUÍMICA PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES DE ALTA CALIDAD: AVANCES RECIENTES Y DIRECCIONES FUTURAS EN OTRAS PARTES DEL MUNDO” Benjamin Bernard Uzoejinwa, Xiuhua He, Shuang Wang, Abd El-Fatah Abonará, Yamin Hu, Qian Wang.

En esta investigación sobre estudios de co-pirólisis explica que el PE, PS Y PP al tener un alto contenido de hidrógeno de aproximadamente el 14% en masa pueden mejorar el rendimiento y la calidad del producto líquido. Además, que este proceso puede tener rendimientos líquidos de un 75% a una temperatura moderada de 500 °C (Uzoejinwa et al., 2018, pp.469-471).

“IMPACTO DE LAS MEZCLAS PLÁSTICAS EN EL RENDIMIENTO DEL PRODUCTO DE LA CO-PIRÓLISIS DE MATERIALES RICOS EN LIGNINA” Marcin Sajdak.

En esta investigación se utilizó un reactor de lecho fijo, y los materiales se trataron a temperatura entre 400 y 600 °C con una tasa de calentamiento de 10 °C min⁻¹ en una atmósfera inerte por N₂ obteniendo efectos positivos en los rendimientos de los líquidos y gases (Sajdak, 2017, p.415).

“DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS TERMODINÁMICOS DEL PROCESO DE PIRÓLISIS DE TERMOPLÁSTICOS POST-CONSUMO POR ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO NO ISOMÉTRICO” Palmay Paul, Puente Cesar, Barzallo Diego, Joan Carles Bruno.

En esta investigación se determinaron los parámetros termodinámicos del proceso de pirólisis para diferentes plásticos post-consumo entre ellos poliestireno y polipropileno partiendo de la

temperatura ambiente hasta alcanzar los 550 °C. En lo cual se determinó las tasas de calentamiento óptimas para el proceso pirólisis siendo de 10 y 15 °C·min⁻¹ (Palmay et al., 2021, pp.1-14).

1.2. Marco Conceptual

1.2.1. Biomasa lignocelulósica

La biomasa se define como un recurso renovable derivado de todos los materiales orgánicos producidos por procesos naturales y actividades humanas, es decir, es cualquier materia orgánica que fue o hace parte de un organismo vivo. Se compone de una mezcla de carbono, hidrógeno, oxígeno, con pequeñas cantidades de azufre y nitrógeno, y también de materiales poliméricos naturales como la celulosa, hemicelulosa y lignina (Castro, 2018, p.18).

La biomasa lignocelulósica conocida como biomasa de origen vegetal, es generada básicamente en procesos agrícolas, forestales e industriales (Castro, 2018, p.18). Además, es considerada como una fuente prometedora de energía renovable ya que este tipo de biomasa puede ser convertida en formas útiles de energía como biocombustibles y productos químicos a través de procesos termoquímicos (Afanasjeva et al., 2017, p.27).

1.2.1.1. Componentes principales de la biomasa lignocelulósica

❖ Celulosa

La celulosa está compuesta por subunidades de D-glucosa unidas por un enlace glucosídico β 1-4. Se compone de piezas con una estructura cristalina. Las capas de celulosa se juntan y forman paquetes de celulosa, que son en su mayoría independientes y débilmente unidos a través de enlaces de hidrógeno (Giovanni y Ortiz, 2011, p.43). Es una estructura de carbohidrato polimérico, denominada polisacárido, constituye el 50% del material de la pared celular de la biomasa. Puede degradarse alrededor de 320-370 °C (Castro, 2018, pp.18-19).

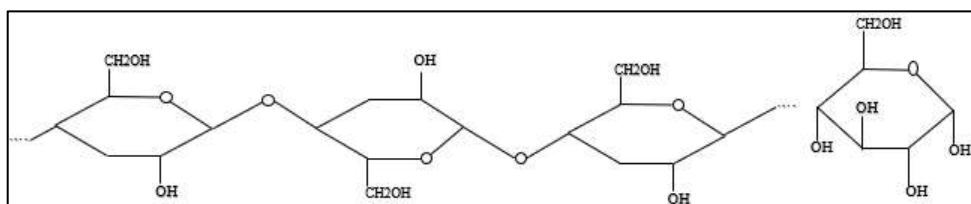


Figura 1-1: Estructura de la celulosa

Fuente: (Castro, 2018).

Realizado por: (Ulpo, K, 2022).

❖ Hemicelulosa

La hemicelulosa es una estructura compleja de carbohidratos que consiste en polímeros de diferentes azúcares como xilosa, arabinosa, manosa, glucosa, galactosa y ácidos de azúcar. La hemicelulosa sirve como una conexión entre la lignina y los paquetes de celulosa y le da rigidez al conjunto de celulosa-hemicelulosa-lignina (Giovanni y Ortiz, 2011, p.43). Se encuentra coligado con la celulosa en la pared celular, este tipo de polisacárido tiene una estructura ramificada que se caracteriza por ser amorfa y de poca resistencia. Se degrada a temperaturas entre 180-290 °C (Castro, 2018, p.19).

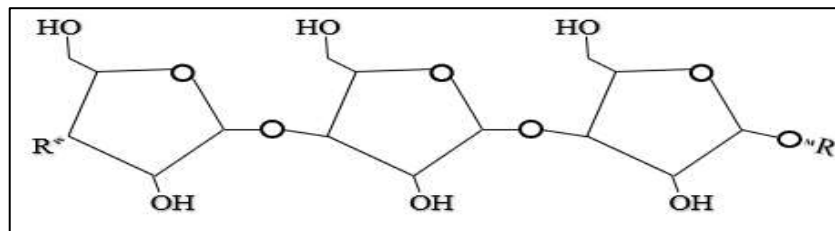


Figura 2-1: Estructura de la hemicelulosa

Fuente: (Castro, 2018).

Realizado por: (Ulpo, K, 2022).

❖ Lignina

La lignina es uno de los polímeros naturales más abundantes después de la celulosa y la hemicelulosa, está presente en la pared celular. Su objetivo es dar soporte estructural, impermeabilidad, y la resistencia contra el ataque microbiano y el estrés oxidativo a la planta (Giovanni y Ortiz, 2011, p.43). La lignina es un polímero aromático, el cual es altamente ramificado y al presentarse en gran cantidad en la biomasa puede aportar características importantes que permiten considerar la aplicación de algún tipo de proceso de transformación o tratamiento, debido a que se puede aumentar su poder calorífico, densidad, etc. Este polímero es encontrado particularmente en la madera y la corteza (Castro, 2018, p.20).

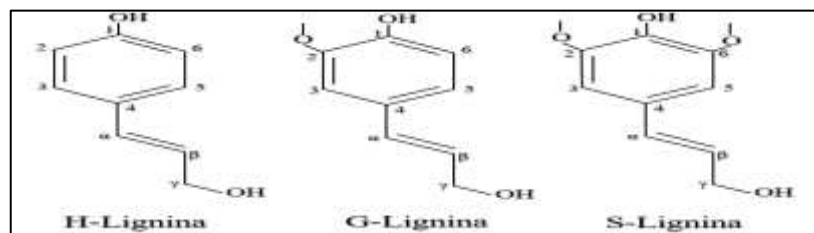


Figura 3-1: Estructura de la lignina

Fuente: (Castro, 2018).

Realizado por: (Ulpo, K, 2022).

1.2.1.2. Clasificación de la biomasa lignocelulósica

Tabla 1-1: Clasificación de la biomasa lignocelulósica según su procedencia

Clasificación de la biomasa lignocelulósica	Natural	Se obtiene de forma natural, sin intervención humana		
	Residual	Seca	Forestal	Tratamientos selvícolas
				Aprovechamientos madereros
			Agrícola	Cultivo herbáceos
				Podas y arranques frutales
		Residuos de industrias agroalimentarias		
		Residuos de industrias de transformación de la madera		
	Húmeda	Residuos ganaderos		
		Residuos industriales		
	Cultivos energéticos	Destinados a la producción de calor		
Destinados a la producción de biocarbones				

Fuente: (Arauzo et al., 2014).

Realizado por: (Ulpo, K, 2022).

1.2.1.3. Residuos de biomasa lignocelulósica

La biomasa residual es aquella generada de actividades agrícolas, domésticas, industriales, etc. De estas actividades se generan desechos que provienen de materia orgánica o vegetal y también de residuos animales que son dispuestos finalmente en rellenos sanitarios o utilizados para realizar compostaje. Los residuos orgánicos son llamados también biomasa y en el caso de que su composición sea mayormente leñosa se la conoce como biomasa lignocelulósica.

1.2.2. Plásticos

Los plásticos son polímeros de alto peso molecular que se sintetizan por lo general de compuestos de bajo peso molecular o se pueden obtener también por modificación química de materiales naturales de alto peso molecular como la celulosa (Cristan et al., 2003, p.67).

1.2.2.1. Clasificación

Según Cristan et al. (2003, pp.67-68), de acuerdo a su comportamiento ante el calor se clasifican en dos grupos:

❖ Termoplásticos







Los termoplásticos se caracterizan por estar compuestos de moléculas lineales con pocos o ningún enlace cruzado, que al calentarse se vuelven blandos y empiezan a fluir, pero al enfriarse se vuelven sólidos. Este proceso se puede repetir numerosas veces.


❖ Termoestables

Los plásticos termoestables, están formados inicialmente de moléculas lineales que por calentamiento forman irreversiblemente una red de enlaces cruzados, dando un producto final generalmente más duro, fuerte y más resistente al calor.

1.2.2.2. Tipos de plásticos

Tabla 2-1: Tipos de plásticos

Plásticos	Propiedades	Aplicaciones	Símbolo
PET (Tereftalato de Polietileno)	Claridad, fuerza/dureza, resistencia al calor.	Botellas plásticas de bebidas, envases para alimentos	
HDPE (Polietileno de alta densidad)	Poco flexible, resistente a los químicos, opaco, de fácil pigmentación, fabricación y manejo.	Envases para detergentes, aceites, lácteos, shampoo y fundas.	
PVC (Policloruro de vinilo)	Versátil, fuerte y duro, resistencia a grasas, aceites y químicos.	Envase para plomería, tuberías, mangueras, empaques de dulces.	
LDPE (Polietileno de baja densidad)	Resistente a la humedad, flexible y fácil de sellar, se raya fácilmente.	Fundas para alimentos congelados, lácteos, dulces, bolsas de basura.	
PP (Polipropileno)	Medianamente flexible, parcialmente cristalino y termoresistente.	Fundas para frituras, sorbetes, tarrinas, vasos desechables y cintas de empaque.	
PS (Poliestireno)	Material rígido y transparente, no polar, e impermeable al agua.	Espuma Flex, contenedores, botellas, envases de alimentos e imitaciones de cristal.	

<p>OTROS (Las resinas de plásticos o mezclas)</p>	<p>Depende del tipo o la combinación de materiales.</p>	<p>Botellas de agua, partes de autos, teléfonos, artículos médicos y juguetes, etc.</p>	
--	---	---	---

Fuente: (Arfamaini, 2016).

Realizado por: (Ulpo, K, 2022).

1.2.2.3. Poliestireno

El poliestireno (PS) es un polímero termoplástico que se obtiene de la polimerización del estireno que es un líquido transparente e incoloro, obtenido como derivado del petróleo y del gas natural, pero que también se encuentra en la naturaleza como tal, este pasa a través de un proceso químico en el cual los compuestos de bajo peso molecular se agrupan químicamente entre sí, dando lugar a una molécula de gran peso llamada poliestireno (María, 2017, p.12).

El poliestireno es un plástico presente en gran cantidad de productos que son utilizados diariamente, debido a esto es importante recalcar que es totalmente reciclable y se identifica con el número 6 en el símbolo de reciclado de los envases plásticos (Centro de Información Técnica (CIT), 2011, p.3).

Según María (2017, pp.15-16), existen cuatro tipos principales de poliestireno:

- Poliestireno cristal, es transparente, rígido y quebradizo.
- Poliestireno de alto impacto, es resistente y opaco, que en la práctica también se denomina poliestireno choque.
- Poliestireno expandido, es muy ligero
- Poliestireno extrusionado, es similar al expandido, pero más denso e impermeable.

Todos los tipos de poliestireno pueden ser reciclados.

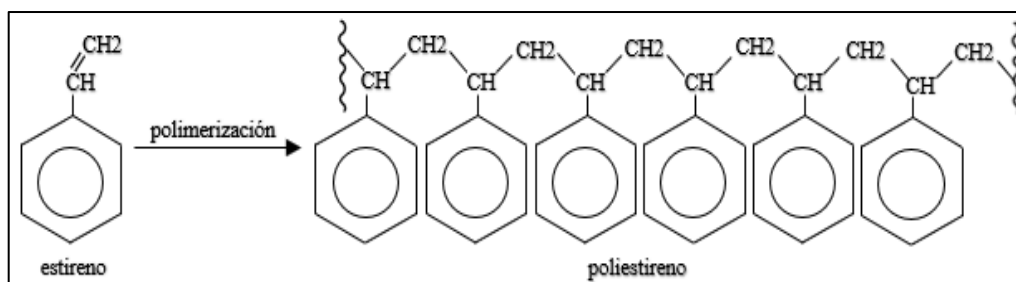


Figura 4-1: Polimerización del poliestireno

Fuente: (Anda, 2005).

Realizado por: (Ulpo, K, 2022).

1.2.2.4. Polipropileno

El polipropileno (PP) es un polímero termoplástico comercial, semicristalino, blanco y un poco opaco. Es un plástico termo conformado muy rígido y duro, que tiene una excelente resistencia al impacto, a los productos líquidos corrosivos y a la dieléctrica, debido a sus propiedades es utilizado en diferentes sectores, además de ser una alternativa económica (Monzó, 2015, p.23).

El polipropileno se obtiene a partir de la polimerización del propileno que es un producto gaseoso obtenido a partir del proceso de refinado de petróleo, en presencia de un catalizador y en condiciones de presión y temperatura controladas. La moléculas de propileno reaccionan a través de un catalizador organometálico dando lugar a la síntesis del polipropileno (Monzó, 2015, pp.23-24).

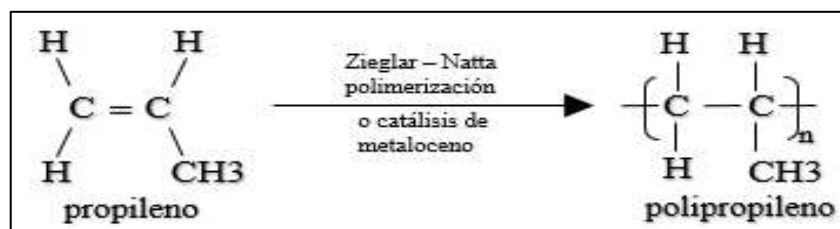


Figura 5-1: Polimerización del polipropileno

Fuente: (Janosik, 2016)

Realizado por: (Ulpo, K, 2022).

1.2.2.5. Residuos plásticos

Los plásticos después de ser utilizados o haber cumplido su vida útil son desechados convirtiéndose en residuos, estos residuos representan un gran porcentaje de residuos sólidos producidos por los seres humanos, representando un problema ambiental ya que la mayoría termina acumulada en la naturaleza, esto sucede más en países en vías de desarrollo que tienen deficiente gestión ambiental y no aprovechan este tipo de residuos pudiéndoles devolver su valor a través de un sistema de tratamientos. Los residuos de poliestireno y polipropileno se pueden encontrar fácilmente en productos de uso diario como botellas, envases, platos, vasos, etc.

1.2.3. Tecnologías de tratamiento de residuos

De acuerdo con Cortolima (2002, p.70) existen los siguientes sistemas de tratamiento para el aprovechamiento de residuos:

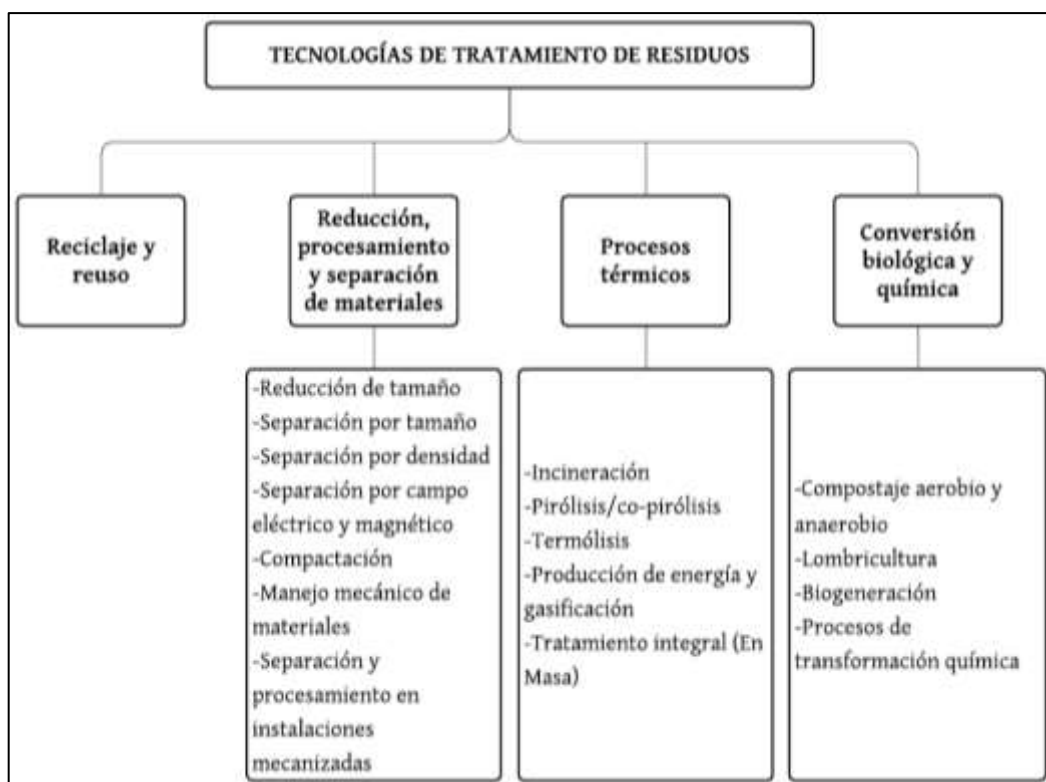


Figura 6-1: Tecnologías de tratamiento de residuos

Fuente: (Cortolima, 2002).

Realizado por: (Ulpo, K, 2022).

1.2.4. Co-pirólisis

La co-pirólisis es un proceso de descomposición térmica en el que se emplean mezclas de diferentes materiales o combustibles, uno de tipo renovable y otro de tipo fósil, esto ocurre en ausencia de oxígeno por lo que se realiza una inyección de nitrógeno, helio o argón en el proceso para lograr una atmósfera inerte. La co-pirólisis es el primer paso en los procesos de combustión y gasificación, seguido de una oxidación total o parcial de los productos primarios, en la cual rompe los enlaces de las cadenas de los polímeros hasta llegar a sus monómeros. Este proceso puede trabajar con temperaturas de 350 a 650 °C. Comprende tres etapas: la alimentación de la materia prima, la transformación de la masa orgánica y la obtención de tres tipos de productos: coque, bio-aceite y gas (Klug, 2012, p.37).

1.2.4.1. Tipos de co-pirólisis

Los tipos de pirólisis o co-pirólisis han sido categorizados como lenta, intermedia, rápida y flash, pero las más comúnmente utilizadas son los procesos lento y rápido. En el proceso lento el producto principal que se obtiene es el carbón debido a que ocurre a temperaturas entre 500 y 600

°C máximo con baja velocidad de calentamiento y mayor tiempo de residencia. Por otro lado, el aceite e pirólisis es el producto principal del proceso rápido que ocurre a temperatura altas hasta 650 °C con una alta velocidad de calentamiento y cortos tiempos de residencia (Uzoejinwa et al., 2018, p.476).

1.2.4.2. Parámetros que intervienen en la co-pirólisis

❖ Temperatura

La temperatura es uno de los parámetros más importantes del proceso de co-pirólisis. La temperatura empleada adecuadamente favorece a la rotura de moléculas complejas para dar lugar a moléculas más sencillas, por lo cual, si se aumenta la temperatura incrementa la producción de gases pero disminuye el rendimiento de líquidos y sólidos (Ferrer, 1996, p.43).

❖ Composición de la mezcla

La composición de la mezcla para la prueba co-pirólisis juega un papel muy importante al tratarse de dos materias diferentes, ya que los productos a obtener dependen del tipo de polímero a degradar, su estructura y tipo de enlace (Morocho, 2019, p.19).

❖ Humedad

La humedad es uno de los parámetros más importantes que se atribuye mayormente a la biomasa, ya que la eliminación de esta previa al proceso de transformación termoquímica permite un aprovechamiento óptimo de la capacidad energética (Castro, 2018, p.52).

❖ Cantidad de la mezcla

La cantidad de la muestra influye directamente sobre la transferencia de materia y calor en el reactor, por lo que puede ser que no haya variaciones significativas en cuanto a los productos que se vayan a obtener si es que las cantidades no difieren mucho (Ferrer, 1996, p.45).

❖ Tamaño de la partícula

El tamaño de partícula juega un papel muy importante ya que durante el proceso de co-pirólisis si la partícula es pequeña el calentamiento será constante, por lo cual los gases que se generan en

el proceso tendrán mayor facilidad al salir de la partícula evitando la producción de reacciones secundarias (Castro, 2018, p.42).

❖ **Velocidad de calentamiento**

La velocidad de calentamiento corresponde al tiempo que es necesario para que las partículas se calienten y lleguen al punto de descomposición. De esto también depende la variación en la proporción de los productos obtenidos en el proceso (Crespo, 2013, p.19). Se considera óptima a $12\text{ }^{\circ}\text{C min}^{-1}$ según estudios previos.

❖ **Presión**

El proceso de co-pirólisis se realiza en una atmósfera inerte, con ausencia de oxígeno, llevado a cabo con la formación de vacío. Al trabajar a presiones altas la formación de gases no condensables incrementa disminuyendo la producción de líquidos (Morocho, 2019, p.20).

❖ **Tiempo de residencia**

Este es un parámetro importante debido a que si los materiales son sometidos a tiempos de residencia largos se aumenta el rendimiento en la producción de gases, pero si se trabaja con tiempos de residencia cortos existe un mayor rendimiento de hidrocarburos líquidos (Morocho, 2019, p.20).

❖ **Atmósfera de reacción**

Para propiciar una atmósfera inerte en el proceso de co-pirólisis se hace empleo de gases inertes de arrastre como el nitrógeno o el helio, inclusive se podrían utilizar vapores condensables de disolventes como el metanol y el etilglicol (Morocho, 2019, p.21).

❖ **Tipo de reactor**

El tipo de reactor a utilizar es el reactor batch o por lotes, este tipo de reactor está dotado de agitación y camisa de calentamiento, en este se carga la materia y se lo deja cierto tiempo dependiendo de la reacción y la temperatura de operación para posteriormente ser descargado y poder iniciar nuevamente el ciclo (Ibáñez, 2019, p.8).

1.2.4.3. Productos de la co-pirólisis

❖ Productos sólidos

Son los productos sólidos que quedan después del proceso de co-pirólisis, estos suelen ser una suma entre los materiales sin reaccionar más el material sólido o carbón que se produce (Baray-Guerrero et al., 2019, p.4). Sin embargo debido a la naturaleza de los materiales que se utilizan en la co-alimentación del proceso, estos están compuestos además de carbono posiblemente por las impurezas que poseen los plásticos (Crespo, 2013, p.27).

❖ Productos líquidos

El líquido de co-pirólisis se forma a temperatura ambiente, es de color marrón oscuro y puede fluir libremente. Este líquido se forma rápida y simultáneamente por la despolimerización y fragmentación de la celulosa, hemicelulosa y lignina de la biomasa (Baray-Guerrero et al., 2019, p.3); en el plástico se da por una despolimerización y rotura de sus enlaces químicos al ser muy sensibles al calor (Lojano, 2020, p.33).

❖ Productos gaseosos

Los gases obtenidos de la pirólisis son usualmente combustibles con un poder calorífico bajo o medio. Contienen monóxido de carbono, hidrógeno y metano, se encuentran también gases no combustibles como el dióxido de carbono y el nitrógeno en mayor proporción. Los altos porcentajes de dióxido de carbono contenidos en los gases indican que hubo una reducción incompleta del material (Crespo, 2013, pp.26-27).

1.2.4.4. Influencia del plástico en los productos líquidos de co-pirólisis

La materia volátil es importante para la producción de la fracción líquida en el proceso de co-pirólisis, ya que a cuanta mayor concentración de materias volátiles más cantidad de aceite. El plástico consiste principalmente en materias volátiles, en si el polipropileno (PP) contiene entre 95.08–100.00% de materias volátiles, mientras que el poliestireno (PS) contiene entre 97.85–99.80%. La presencia de materias altamente volátiles y la ausencia de humedad en su composición hacen de estos plásticos un material de co-alimentación eficaz para mejorar la calidad de los combustibles de biomasa durante la co-pirólisis. Asimismo, el análisis último o elemental hecho a diferentes materiales plásticos de desecho indica que el plástico está compuesto, principalmente,

de carbono e hidrógeno; sin embargo, contiene poco oxígeno, poco nitrógeno y trazas de azufre. Los altos contenidos de carbono e hidrógeno en los plásticos lo convierten en una buena fuente de hidrocarburos líquidos y, por lo tanto, cuando se pirólisan con la biomasa pueden mejorar, no solo el rendimiento, sino también la calidad del biocombustible producido, a través de las interacciones sinérgicas que ocurren durante la co-pirólisis (Uzoejinwa et al., 2018, p.476).

1.2.5. Biocombustibles

Los biocombustibles son recursos energéticos desarrollados por el ser humano a partir de biomasa, estos pueden ser líquidos, sólidos y gaseosos. Su objetivo es liberar energía a través de la combustión (Álvarez, 2009, p.63).

1.2.5.1. Clasificación de los biocombustibles

❖ Primera generación

Estos combustibles tienen procedencia de biomasa agrícola con alto contenido de almidón, azúcares y aceites, además, también se emplean grasas animales, aceites de desecho, etc. Son producidos empleando procesos de fermentación, digestión anaeróbica y transesterificación, obteniendo etanol, metanol, n-butanol, biodiesel y biogás (Álvarez, 2009, p.63).

❖ Segunda generación

Los materiales utilizados son residuos agrícolas y forestales compuestos mayormente por celulosa. Estos pasan por procesos sacarificación-fermentación y gasificación, y se obtienen productos como etanol, metanol, gas de síntesis biodiesel, 2.5-dimetilfurano, etc (Álvarez, 2009, p.64).

❖ Tercera generación

Se utilizan insumos vegetales no alimenticios y con alta capacidad energética almacenada por lo que son conocidos como “cultivos energéticos”. Los procesos de obtención de este producto se encuentran en desarrollo, pero se ha logrado producir biodiesel y etanol en plantas piloto (Álvarez, 2009, p.64).

❖ **Cuarta generación**

Estos biocombustibles son producidos a partir de bacterias que son genéticamente modificadas las cuales emplean CO₂ para obtener el biocombustible (Álvarez, 2009, p.65).

CAPÍTULO II

2. MARCO METODOLÓGICO

2.1. Localización de estudio

El presente proyecto fue realizado en la provincia de Chimborazo, ciudad de Riobamba, en el sector de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Ciencias, dentro del Laboratorio de Operaciones Unitarias.

- Provincia: Chimborazo.
- Cantón: Riobamba.
- Sector: ESPOCH.



Figura 1-2: Ubicación Laboratorio de Operaciones Unitarias ESPOCH

Realizado por: (Ulpo, K, 2022).

2.2. Método de muestreo

Es un muestreo no probabilístico criterial que se planteó, ya que no responde a fórmulas específicas sino al criterio del experimentador, donde planteamos los porcentajes a trabajar y vamos analizando cuál es la mejor viabilidad para llegar a nuestro resultado final.

2.3. Técnicas de recolección de datos

2.3.1. *Recolección de las muestras*

❖ **Recolección de la biomasa lignocelulósica**

La biomasa lignocelulósica fue recogida de una forma aleatoria de los residuos de poda generados por el mantenimiento de las áreas verdes realizado los días miércoles y viernes en los ingresos y avenidas principales de la institución por el Departamento de Infraestructura y Mantenimiento (DIM) de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.



Figura 2-2: Residuos de poda recolectados

Realizado por: (Ulpo, K, 2022).

❖ **Recolección de los residuos plásticos**

Los residuos plásticos para utilizar fueron obtenidos a partir de residuos sólidos plásticos urbanos obtenidos de una planta recicladora de la ciudad de Riobamba, los mismos que fueron triturados y lavados en el laboratorio de Operaciones Unitarias de la Facultad de Ciencias en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.



Figura 3-2: Residuos plásticos de PS y PP

Realizado por: (Ulpo, K, 2022).

2.3.2. Preparación de la biomasa

❖ Humedad de la muestra

La biomasa debe ser cortada en trozos de casi 5cm y sometida a un proceso de secado a 105°C durante 24 horas en una estufa para obtener un nivel de humedad menor al 10%.



Figura 4-2: Muestras de biomasa seca

Realizado por: (Ulpo, K, 2022).

Una vez realizado el proceso, la humedad que será secada de la muestra se determinará con la siguiente ecuación:

$$\%H = \frac{P_i - P_f}{P_i} \times 100 \quad \text{Ecu.1-2}$$

Donde:

%H: Porcentaje de humedad de la muestra.

P_i : Peso inicial de la biomasa.

P_f : Peso la biomasa después del secado.

Después se procederá a colocar 10 gramos de muestra seca en una balanza de humedad para determinar la humedad que contiene la muestra después de haber sido secada.



Figura 5-2: Balanza de humedad.

Realizado por: (Ulpo, K, 2022).

❖ Molienda

Una vez obtenida la muestra seca se procederá a triturar la biomasa en un equipo de molienda y tamizado para obtener un diámetro de 3mm aproximadamente.



Figura 6-2: Equipo de molienda y tamizado

Realizado por: (Ulpo, K, 2022).

2.3.3. Análisis elemental orgánico de la biomasa lignocelulósica

Al trabajar con un compuesto orgánico como la biomasa lignocelulósica es esencial conocer los elementos que la constituyen. El análisis elemental tiene por objetivo determinar la clase de elementos que lo conforman y la proporción en que se encuentran. Debido a esto se desarrolla en dos etapas el análisis cualitativo que permite determinar los elementos presentes y el análisis

cuantitativo que enumera los elementos de estudio y verifica la regularidad con que se presentan (Hidalgo, 2017, p.9). Este análisis se lleva a cabo en un analizador elemental FLASH 2000 con configuración CHN.

2.3.4.Determinación del número de pruebas co-pirolíticas

Las pruebas co-pirolíticas se realizarán a 2 temperaturas, temperatura 1: 400 °C y temperatura 2: 450°C, para cada temperatura se trabajarán con dos diferentes composiciones de mezcla entre biomasa y residuos plásticos:

Composición de mezcla 1: 25% Biomasa+75% Plásticos(50% PP+50% PS).

Composición de mezcla 2: 25% Biomasa+75% Plásticos(25% PP+75% PS).

Para cada composición y temperatura se realizarán 3 repeticiones o pruebas co-pirolíticas como se observa en el Gráfico 2-2.

2.3.5.Preparación de las mezclas de biomasa y residuos plásticos

Se pesaron en una balanza 500 gramos entre biomasa y residuos plásticos para cada mezcla a dos diferentes proporciones por temperatura:

125g de biomasa + 187,5g de poliestireno + 187,5 de polipropileno.

125g de biomasa + 281,25 de poliestireno + 93,75g de polipropileno.



Figura 7-2: Mezcla de biomasa y residuos plásticos

Realizado por: (Ulpo, K, 2022).

2.3.6.Preparación del equipo pirolítico

Para la producción de biocombustibles se utilizará un reactor tipo batch purgado con N₂ el cual está acoplado a un intercambiador de calor que es alimentado con agua a 10 °C por una bomba

de enfriamiento con el fin de condensar los gases y convertirlos en productos líquidos, este opera con una tasa calentamiento de $12\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ a una presión de $-0,05\text{ MPa}$.

Antes de iniciar las pruebas de co-pirólisis se debe preparar el reactor.

- Primero se debe realizar una limpieza del equipo pirolítico o reactor tipo batch para que no exista contaminación del producto.
- Después se debe cargar la mezcla de biomasa lignocelulósica y residuos plásticos en el reactor y sellar el mismo, de manera que no tenga ninguna entrada de aire o existan fugas en el proceso.
- Para culminar esta etapa se le inyecta nitrógeno al reactor creando una atmósfera inerte con el fin evitar que exista la formación de CO_2 y agua.

2.3.7. Pruebas de co-pirólisis

Una vez preparado el reactor pirolítico se procederá a realizar las pruebas de co-pirólisis proceso en el cual se obtendrá el biocombustible como producto final, este proceso cuenta con los siguientes pasos:

- Se iniciará el proceso con el encendido del equipo, este equipo necesita 220 voltios para cumplir su función.
- Después de encendido se deberá subir el voltaje de las resistencias y setear la temperatura del equipo en el control llevándola a 400 y $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ dependiendo de la prueba que se vaya a realizar, en promedio el equipo tardará 35 minutos en alcanzar dichas temperaturas desde la temperatura ambiente.
- El equipo cuenta con un intercambiador de calor o condensador el cual es alimentado con agua fría a $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ por un sistema de mangueras mediante una bomba de enfriamiento, esta bomba de enfriamiento se debe mantener encendida durante todo el proceso, debido a que ayudará que los gases que se vayan desprendiendo del proceso se condensen y se conviertan en productos líquidos.
- Este proceso tardará 5 horas en culminar, durante ese periodo de tiempo se debe revisar la presión del reactor, ya que al momento en que empiecen a generarse gases la presión tenderá a subir por lo que se debe realizar un vacío con una bomba de vacío bajando la presión a -0.05 MPa . Esto ocurrirá por lo general una vez que el reactor alcance las temperaturas que se teadas.
- El proceso en total se tardará 5 horas en culminar, pero los primeros productos líquidos deberán ser recolectados a las 2 horas y media, una vez que se recojan estos productos se deberá continuar con el proceso el resto de tiempo faltante. Los productos finales serán líquidos, sólidos y gaseosos.

- Una vez obtenidos los productos se procederá a pesar y a obtener el rendimiento líquido o eficiencia para lo cual se utilizará la siguiente ecuación:

$$\%R \text{ líquido} = \frac{\text{Peso del producto líquido}}{\text{Peso de la mezcla de biomasa y residuos plásticos}} \times 100 \quad \text{Ecu 2-2}$$

- Después de obtener el rendimiento líquido, se realizará una limpieza del equipo pirolítico y se recolectará el producto sólido el cual se pesará y se obtendrá su rendimiento aplicando la siguiente ecuación:

$$\%R \text{ sólido} = \frac{\text{Peso del producto sólido}}{\text{Peso de la mezcla de biomasa y residuos plásticos}} \times 100 \quad \text{Ecu 3-2}$$

- Una vez obtenidos los resultados de los pesos y rendimientos de los productos líquidos y los productos sólidos se obtendrá el rendimiento de los productos gaseosos por medio de la siguiente ecuación:

$$\%R \text{ gas} = \frac{\text{Peso del producto líquido} - \text{Peso del producto sólido}}{\text{Peso de la mezcla de biomasa y residuos plásticos}} \times 100 \quad \text{Ecu 4-2}$$



Figura 8-2: Equipo pirolítico

Realizado por: (Ulpo, K, 2022).

2.3.8. Caracterización de los productos obtenidos

Con la caracterización de los biocombustibles obtenidos se determinará cuáles de las pruebas realizadas a diferentes temperaturas y diferentes composiciones de mezcla es la mejor para obtener un biocombustible de buenas características.

❖ Destilación

La destilación de productos derivados del petróleo y productos líquidos se realiza mediante la Norma ASTM-D86, este proceso se lleva a cabo a presión atmosférica; para lo cual se utiliza un destilador ASTM en el que se coloca 100 mL de muestra, durante el proceso se determina cuantitativamente las características del intervalo de ebullición de productos como gasolinas, combustibles de diesel, mezclas de biodiesel, naftas, kerosenos, etc (Drews, 2008, p.1).



Figura 9-2: Destilador ASTM

Realizado por: (Ulpo, K, 2022).

Al finalizar la destilación los resultados obtenidos de la prueba se expresan como porcentaje evaporado o porcentaje recuperado frente a la temperatura que corresponda en una curva de destilación (Drews, 2008, p.4).

❖ Densidad

La determinación de la densidad absoluta de combustibles líquidos se realiza mediante un densímetro de vidrio y una serie de cálculos que se muestran a continuación.

Cálculos para la densidad absoluta:

$$\rho = \frac{m}{v} \qquad \text{Ecu 5-2}$$

Donde:

ρ : densidad

m: es la diferencia de la masa final con la masa inicial

v: volumen

La densidad relativa es el resultado entre la densidad absoluta de la muestra y la densidad del agua a 4 °C, pero la escala más comúnmente utilizada es la gravedad API a 15 °C. Este parámetro determina la calidad del combustible a partir de la norma ASTM-1298 (Drews, 2017, pp.1-4) para su cálculo se requiere una de fórmulas que se muestran a continuación:

$$\text{Gravedad API} = \frac{141,5}{GE} - 131,5 \quad \text{Ecu 6-2}$$

Donde:

GE: Gravedad específica o densidad relativa

$$GE = \frac{\rho_{\text{absoluta}}}{\rho_{H2O \text{ a } 15^{\circ}C}} \quad \text{Ecu 7-2}$$

❖ Viscosidad

La viscosidad se puede determinar a partir de la viscosidad cinemática que relaciona la viscosidad absoluta y densidad de un fluido. Este parámetro es importante en los combustibles porque da a conocer las cualidades de lubricación de un aceite y su capacidad de atomización (Morocho, 2019, p.59).

La viscosidad cinemática se determina mediante la norma ASTM 445 Método de Prueba Estándar para Viscosidad Cinemática de Líquidos Transparentes y Opacos mediante las siguientes ecuaciones:

$$\eta = \rho v \quad \text{Ecu 8-2}$$

Donde:

η : viscosidad absoluta ($\text{Kg} \cdot \text{ms}^{-1}$)

ρ : densidad ($\text{Kg} \cdot \text{m}^{-3}$)

v: viscosidad cinemática cSt ($\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)

$$v = Ct \quad \text{Ecu 9-2}$$

Donde:

C: constante de calibración del viscosímetro ($\text{mm}^2 / \text{s}) / \text{s}$)

t: tiempo de fluidez, (s)



Figura 10-2: Sistema de análisis de viscosidad

Realizado por: (Ulpo, K, 2022).

❖ Poder calorífico

El poder calorífico es una medida de la energía que se encuentra disponible en un combustible. Para determinar este parámetro se utiliza la Norma ASTM-D240, donde el poder calorífico se prueba quemando una muestra pesada en un calorímetro de bomba bajo condiciones controladas. El poder calorífico se calcula a partir de observaciones de la temperatura antes, durante y después de la combustión (Astm, 1997, p.3).

❖ Punto de inflamación

El punto de inflamación o flash point mide la inclinación de la muestra de biocombustible a formar una mezcla inflamable con el aire bajo condiciones de laboratorio que se encuentran controladas. Esta propiedad es importante para determinar el riesgo de inflamabilidad de un material o producto, se utiliza para reglamentaciones de transporte, seguridad y definir materiales inflamables o combustibles, además de señalar si son altamente volátiles o no (INEN, 2013, p.1).



Figura 11-2: Equipo para el análisis del punto de inflamación.

Realizado por: (Ulpo, K, 2022).

❖ Índice de cetano calculado

El índice de cetano calculado permite estimar el número de cetano ASTM cuando no se tiene a disposición un motor de ensayo para determinar este parámetro o cuando la cantidad de muestra es muy pequeña como para probarla en un motor (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2013, p. 1).

Este método de ensayo incorpora la siguiente ecuación:

$$\text{Índice Cetano Calculado} = 454,74 - 1641,416 D + 774,74 D^2 - 0,554 B + 97,803 (\log B)^2$$

Donde:

G = Densidad API, determinada por el Método de Ensayo ASTM D287, ASTM D1298 o ASTM D4052,

D = Densidad a 15 °C, g/ml, determinada por el Método de Ensayo ASTM D1298 o ASTM D4052,

B = Temperatura media de ebullición, ° C, determinada mediante el Método de Ensayo ASTM D86 y corregida a presión barométrica estándar.

❖ Análisis FT-IR

La espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier es un método por el cual se estudia la absorción o emisión de energía radiante originada por la interacción entre la radiación electromagnética y el material en estudio que puede ser un sólido, líquido o gas. La espectroscopia infrarroja se basa en que las moléculas tienen la posibilidad de rotar y vibrar a distintas

frecuencias. Es decir que, una molécula puede absorber la energía de fotones en el rango energético de infrarrojos en el caso en que exista una diferencia en el momento bipolar de la molécula mientras ocurre un movimiento vibracional rotacional y cuando la frecuencia asociada con la radiación resuena con el movimiento vibracional (Piqué y Vázquez, 2012, p.63).

Existen modos vibracionales que inducen oscilaciones que pueden entrar en resonancia con un haz de infrarrojo. Esto produce un intercambio de energía entre el haz y las moléculas. Para esto hay un comportamiento característico para un enlace con un tipo atómico, un entorno químico y una concentración de enlaces determinados. Se puede decir entonces, que en un espectro infrarrojo se pueden manifestar bandas asociadas a aproximadamente todos los compuestos moleculares. Cada una de estas bandas correspondería a un movimiento de vibración de uno de los enlaces dentro de la molécula. En la región del espectro situada entre 4000 y 1400 cm^{-1} , se puede identificar la mayoría de los grupos funcionales presentes en las moléculas orgánicas. Las absorciones que aparecen en esta zona provienen principalmente de las vibraciones de estiramiento. Mientras que la zona situada entre 1400 y 600 cm^{-1} , es por lo general, complicada, debido a que en ella aparecen una combinación de vibraciones de alargamiento, así como de flexión. Cada compuesto tiene una absorción característica en esta región, por lo que se la denomina la región de las huellas dactilares (Piqué y Vázquez, 2012, p.63). Este análisis se realiza en un Espectrómetro de Infrarrojo FT-IR modelo JASCO FT/IR-4100.



Figura 12-2: Espectrofotómetro de Infrarrojo

Realizado por: (Ulpo, K, 2022).

❖ **Análisis cromatográfico GC-MS**

Este análisis cromatográfico hace referencia a la asociación de dos técnicas, GC (cromatografía de gases) y MS (espectrometría de masas) dando lugar a una técnica combinada GC-MS que permite la separación e identificación de mezclas complejas. La utilización de la cromatografía de gases acoplada a un espectrómetro de masas requiere sistemas particulares de conexión. En

teoría, se trata de dos técnicas que trabajan en fase gaseosa y necesitan una muy pequeña cantidad de muestra para realizar su análisis, por lo que son muy acordes (Gutiérrez y Droguet, 2002, p.37). En definitiva, en este proceso una mezcla de compuestos es inyectada en el cromatógrafo de gases y es separada en la columna cromatográfica obteniendo la elución sucesiva de los compuestos individuales aislados que pasan inmediatamente al espectrómetro de masas. Así, cada uno de estos compuestos se registra en forma de pico cromatográfico y se identifica mediante su respectivo espectro de masas (Gutiérrez y Droguet, 2002, p.37). Una vez identificados se registran en una medida de hidrocarburos de nC_4 a nC_{40} para determinar sus diferentes fracciones. Este análisis se lleva a cabo en un equipo cromatográfico de la marca Agilent Technologies.

2.3.9. Análisis estadístico

El análisis se entiende la división de las partes de un todo hasta llegar a conocer sus principios. Por ende, el análisis estadístico consiste en un análisis que emplea métodos estadísticos para interpretar datos, ya sea para asistir en la toma de decisiones o para explicar los condicionantes que determinan lo que ocurre en algún fenómeno (Brooks, 2020, p.1).

Para el análisis estadístico y basado en la relación entre las variables de temperatura y composición de la mezcla con el rendimiento de los biocombustibles como se observa en el Gráfico 2-2, al tener cierto número de datos se determinó que realizar un análisis estadístico descriptivo sería lo más viable para la investigación.

❖ Estadística descriptiva

La estadística descriptiva formula recomendaciones sobre como resumir la información que se tiene, a través de tablas, gráficas o cuadros. Antes de llevar a cabo este análisis es necesario identificar las escalas de medición de las variables registradas, que pueden ser cuantitativas o cualitativas. Las cuantitativas pueden ser contables o medibles y clasificadas en continuas o discretas; mientras que las cualitativas se caracterizan por enfocarse en los atributos de las variables clasificándose en nominales u ordinales (Abáñdes y Fuentes, 2016, p.398).

❖ Medidas de tendencia central y de dispersión

Con los datos obtenidos en la investigación al presentarlos o resumirlos se debe ubicar su distribución, mediante la escala de medición de cada variable. Teniendo en cuenta que se trabaja con pesos o porcentajes, la escala será cuantitativa lo cual nos indica que algunos datos deben resumirse en un estimador de promedio y otros en uno de dispersión, el estimador de promedio

muestra la tendencia central o cifra que presenta el mejor valor de la muestra a través del promedio o media, la mediana o la moda (Abáñdes y Fuentes, 2016, p.399), mientras que en la medidas de dispersión se ha tomado en cuenta el coeficiente variación de Pearson. Además, es muy importante establecer si se tiene una distribución normal o no a través pruebas estadísticas como el sesgo o la curtosis que deben estar en un rango de ± 2 .

Debido a que el análisis estadístico descriptivo solo organiza, reúne y comunica cierta información no logra determinar la veracidad o no de la hipótesis propuesta, por lo que se realizan pruebas de hipótesis, de esta manera se utiliza la Prueba t-student la cual se complementa para obtener los resultados deseados. Para el análisis estadístico se utilizará el software Statgraphics Centurion.

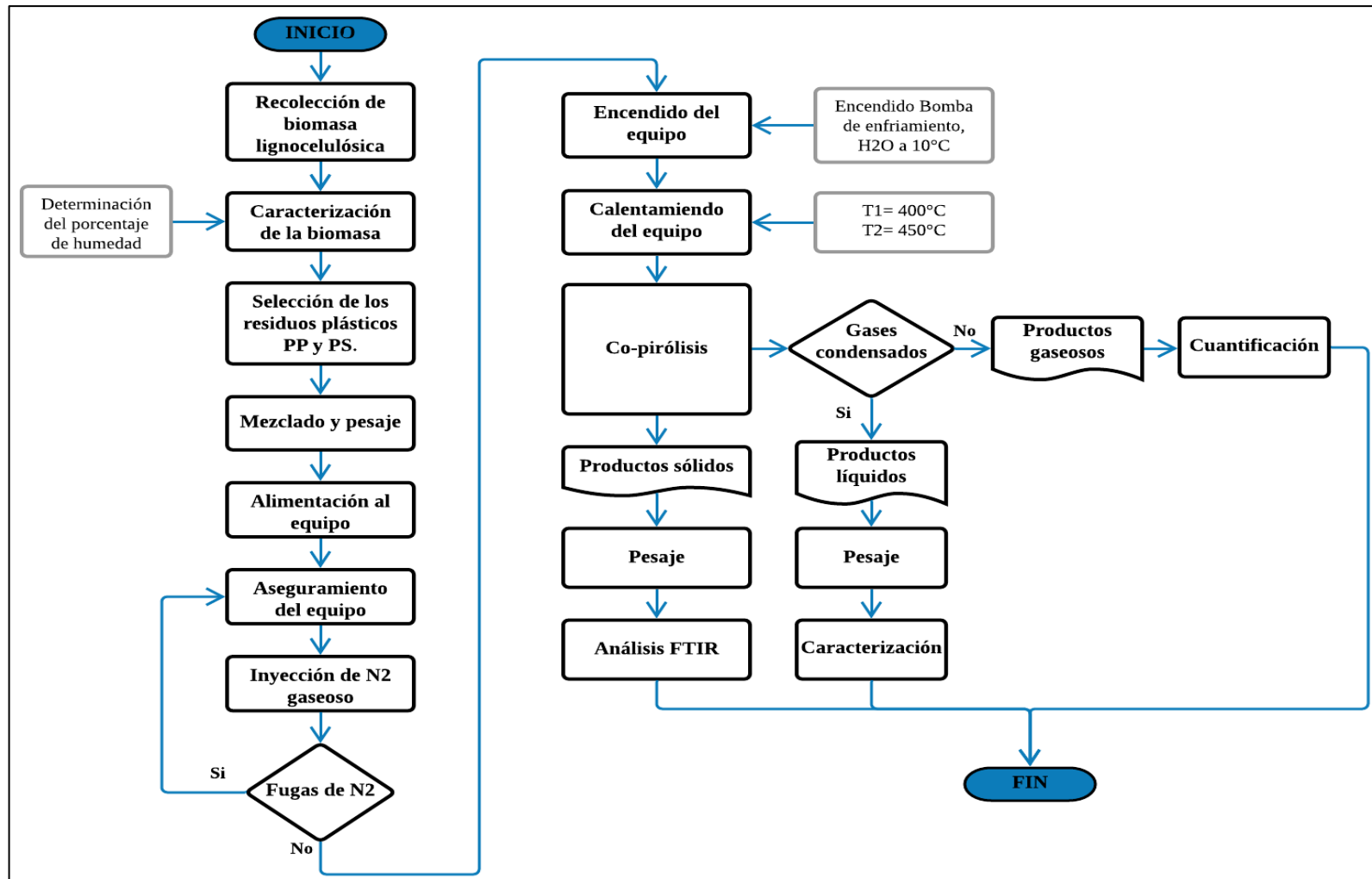


Gráfico 1-2: Diagrama del proceso completo de co-pirólisis

Realizado por: (Ulpo, K, 2022).

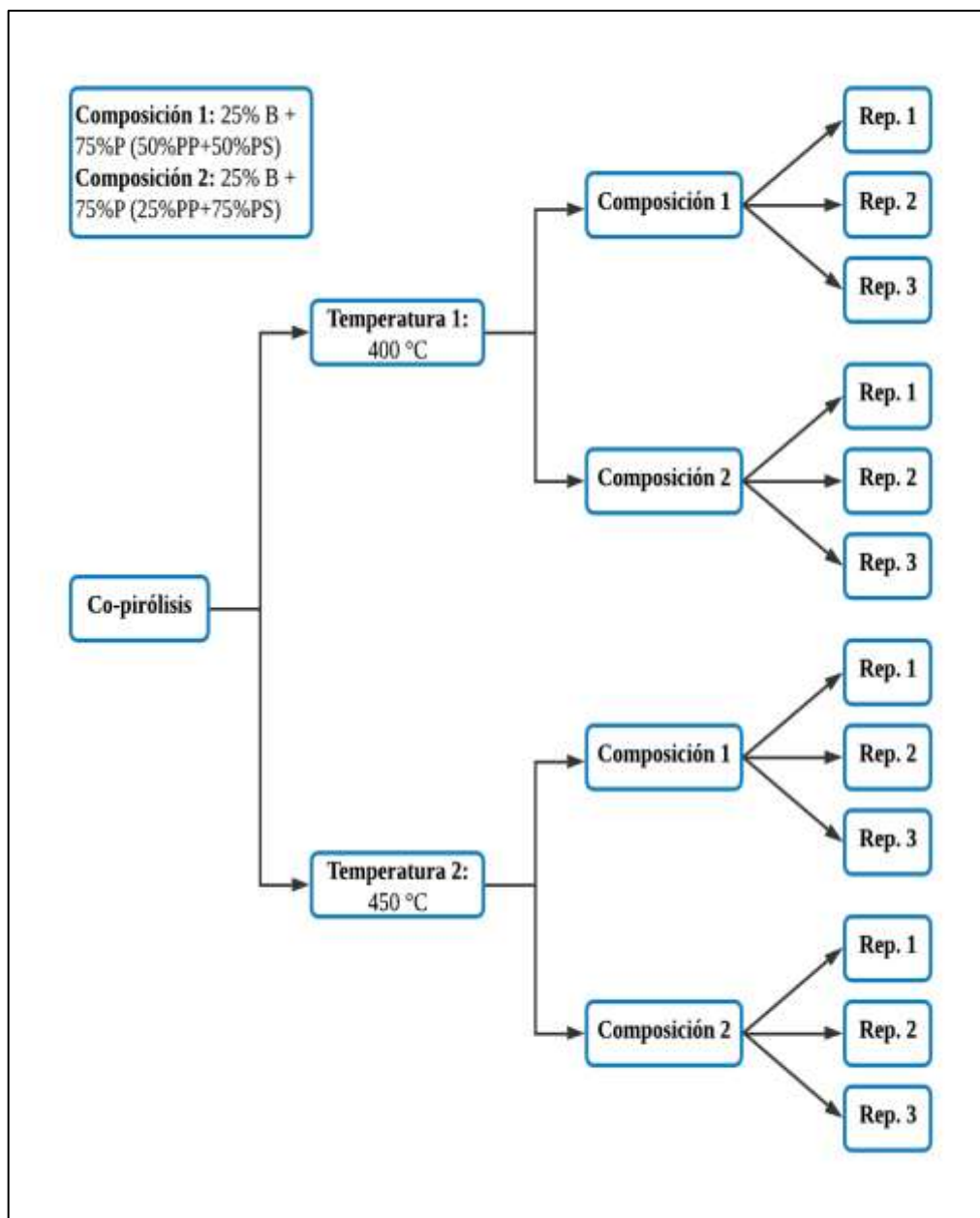


Gráfico 2-2: Esquema del diseño experimental

Realizado por: (Ulpo, K, 2022).

CAPÍTULO III

3. MARCO DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

3.1. Resultados

3.1.1. Resultados del contenido de la humedad de la Biomasa

Para la determinación del contenido de humedad de la biomasa se trabajó con una muestra de 50.0341 gramos, una vez que la muestra fue secada a 105 °C durante 24 horas se pesó obteniendo un peso de 40.0804 gramos, estos valores los reemplazamos en la siguiente ecuación y obtenemos el resultado:

$$\begin{aligned} \%H &= \frac{P_i - P_f}{P_i} \times 100 && \text{Ecu 1-3} \\ \%H &= \frac{50.0341gr - 40.0804gr}{50.0341gr} \times 100 \\ \%H &= 19.8 \end{aligned}$$

NOTA: El 19.8% nos indica el contenido de humedad que fue secado de la biomasa.

Luego la muestra fue llevada a una balanza de humedad, para determinar el contenido de humedad de la muestra seca que fue de 1.53%.

Una vez obtenida la humedad de la muestra se procedió a moler la muestra en un equipo de molienda y tamizado como se muestra en la Figura 1-3.



Figura 1-3: Biomasa triturada

Realizado por: (Ulpo, K, 2022).

3.1.2. Resultados análisis elemental orgánico de la biomasa lignocelulósica

Tabla 1-3: Resultados análisis elemental orgánico de la biomasa lignocelulósica

Muestras estándares	Elemento (%)		
	N	C	H
Estándar	17.01	42.30	4.43
“1”	1.28	46.55	5.46
“2”	1.17	45.48	5.88
“3”	1.16	47.09	6.02
Promedio	1.20	46.37	5.79

Realizado por: (Ulpo, K, 2022).

3.1.3. Resultados de los rendimientos de los productos de co-pirólisis

Se trabajó con 2 temperaturas diferentes y 2 composiciones de mezcla diferentes cada una con tres repeticiones.

Temperatura 1: 400°C

Temperatura 2: 450 °C

Composición de mezcla 1: 25% Biomasa+75%Plásticos(50% PP+50% PS)

Composición de mezcla 2: 25% Biomasa+75%Plásticos(25% PP+75% PS)

❖ Rendimientos:

Temperatura 1 – Composición 1

Tabla 2-3: Peso en gramos de los productos obtenidos en el proceso de co-pirólisis T1-C1

Productos	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3
Líquido	282.5	279	280.5
Sólido	150	156	153
Gaseoso	67.5	65	66.5

Realizado por: (Ulpo, K, 2022).

Tabla 3-3: Rendimiento en porcentaje (%) de los productos obtenidos de co-pirólisis T1-C1

Productos	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3
Líquidos	56.5	55.8	56.1
Sólido	30	31.2	30.6
Gaseoso	13.5	13	13.3

Realizado por: (Ulpo, K, 2022).

Temperatura 1 – Composición 2

Tabla 4-3: Peso en gramos de los productos obtenidos en el proceso de co-pirólisis T1-C2

Productos	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3
Líquido	327	325	323
Sólido	110	115	118
Gaseoso	63	60	59

Realizado por: (Ulpo, K, 2022).

Tabla 5-3: Rendimiento en porcentaje (%) de los productos obtenidos de co-pirólisis T1-C2

Productos	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3
Líquido	65.4	65	64.6
Sólido	22	23	23.6
Gaseoso	12.6	12	11.8

Realizado por: (Ulpo, K, 2022).

Temperatura 2 – Composición 1

Tabla 6-3: Peso en gramos de los productos obtenidos en el proceso de co-pirólisis T2-C1

Productos	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3
Líquido	346	344	342
Sólido	84	90	91
Gaseoso	70	66	67

Realizado por: (Ulpo, K, 2022).

Tabla 7-3: Rendimiento en porcentaje (%) de los productos obtenidos de co-pirólisis T2-C1

Productos	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3
Líquido	69.2	68.8	68.4
Sólido	16.8	18	18.2
Gaseoso	14	13.2	13.4

Realizado por: (Ulpo, K, 2022).

Temperatura 2 – Composición 2

Tabla 8-3: Peso en gramos de los productos obtenidos en el proceso de co-pirólisis T2-C2

Productos	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3
Líquido	365	364	361
Sólido	90	90	92
Gaseoso	45	46	47

Realizado por: (Ulpo, K, 2022).

Tabla 9-3: Rendimiento en porcentaje (%) de los productos obtenidos de co-pirólisis T2-C2

Productos	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3
Líquido	73	72.8	72.2
Sólido	18	18	18.4
Gaseoso	9	9.2	9.4

Realizado por: (Ulpo, K, 2022).

Una vez obtenidos los resultados de los rendimientos de cada producto conseguido del proceso de co-pirólisis como se muestra en el Gráfico 3-3 se puede determinar que las temperaturas de 400 °C y 450 °C en conjunto con las mezclas compuestas por biomasa lignocelulósica y residuos plásticos de PS y PP fueron óptimas para la obtención de combustibles líquidos teniendo rendimientos que superan el 50%, de manera particular el mayor rendimiento se puede observar a T2-C2 superando el 70%. Con lo expuesto se podría decir que 450 °C es la temperatura máxima con la que se podría trabajar para obtener productos líquidos, esto se debe a que la composición de la mezcla con la que se trabajó en la investigación está compuesta por 25% de biomasa y 75% de residuos plásticos, pues según Ipiates (2018, p.27) en la pirólisis de plásticos las temperaturas óptimas de trabajo para obtener mayor fracción de productos líquidos se da a temperaturas entre 330 y 450 °C, por otro lado la biomasa produce mayores rendimientos líquidos a temperaturas entre 450 y 550 °C hasta más (Pinedo, 2013, p.24), teniendo en consideración que nuestra composición de la mezcla tiene un mayor porcentaje de plásticos en relación a la biomasa en la que se destaca el PS es comprensible que T2-C2 presente mayor rendimiento líquido ya que esta temperatura favorece su formación a partir de ambos materiales, además, (Palmay, 2021, p.4) nos manifiesta que el PS a temperaturas próximas de 450 °C los enlaces C-C tienen una mayor ruptura lo cual genera mayor cantidad de hidrocarburos ligeros y de cadena corta favoreciendo a la formación de productos gaseosos por lo que no sería factible trabajar a temperaturas más altas. Por lo descrito, podemos observar que en la investigación realizada por Sajdak (2017, p.421) el rendimiento líquido de mezclas de biomasa lignocelulósica y residuos plásticos es de un 47 a 57% al trabajar con una temperatura de 600 °C esto debe a que la composición de la mezcla con la que se trabajó comprende un 16% de plásticos y un 84% de biomasa, lo que sostiene lo propuesto anteriormente.

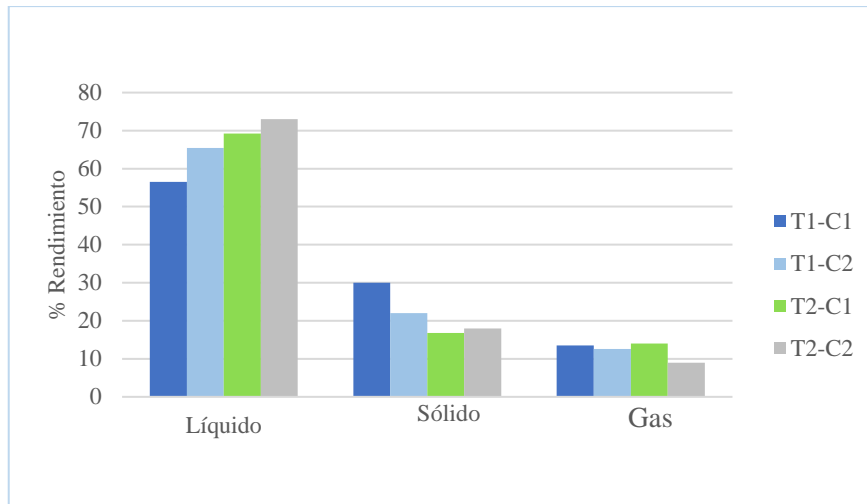


Gráfico 1-3: Rendimiento de los productos obtenidos de la co-pirólisis

Realizado por: (Ulpo, K, 2022).

3.1.4. Resultados de destilación del biocombustible

Tabla 10-3: Curva de destilación

Volumen	Temperatura
-	42
35	84
59	126
73	194
77	248
92	256

Realizado por: (Ulpo, K, 2022).

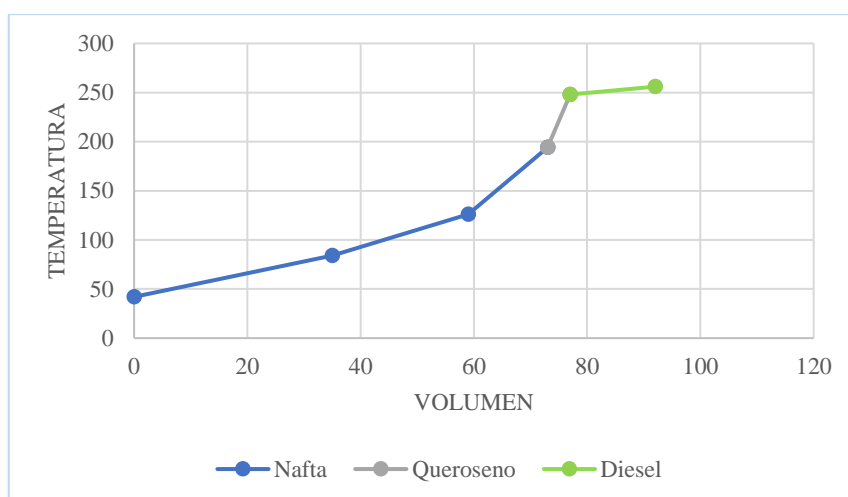


Gráfico 2-3: Curva general de destilación

Realizado por: (Ulpo, K, 2022).

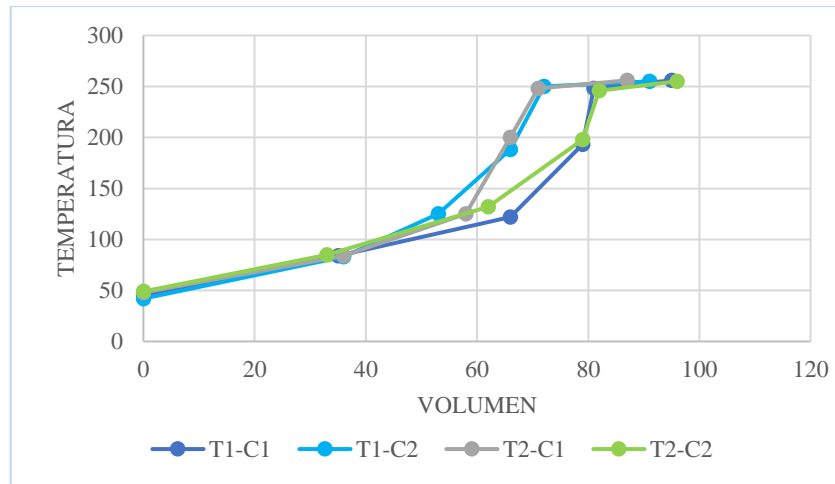


Gráfico 3-3: Curvas de destilación

Realizado por: (Ulpo, K, 2022).

3.1.5. Resultados de densidad, densidad relativa y gravedad API

Para el análisis de los resultados se realizó una mezcla u homogenización de las repeticiones hechas por cada temperatura y composición.

Tabla 11-3: Resultados de densidad, densidad relativa y gravedad API

Biocombustible	Densidad, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	Gravedad Específica, -	Grados API, °API
T1 - C1	874,09	0,875	31,15
T1 - C2	870,08	0,871	31,12
T2 - C1	869,74	0,870	31,06
T2 - C2	886,67	0,887	27,95

Realizado por: (Ulpo, K, 2022).

Según Orejuela Parra (2010, pp.38-40), la gravedad API y la densidad clasifica a los combustibles de la siguiente forma:

Tabla 12-3: Clasificación de los combustibles según su gravedad API y su densidad

Tipo de crudo	Gravedad API	Densidad ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
Liviano	31,1 °API y más	< 870
Mediano	Entre 22,3 y 31,1 °API	920 - 870
Pesado	Entre 10 y 22,3 °API	1000 – 920
Extra pesado	Menor a 10 °API	> 1000

Fuente: (Orejuela Parra, 2010).

Realizado por: (Ulpo, K, 2022).

Basándonos en la Tabla 12-3 se puede determinar que los resultados detallados en la Tabla 11-3 nos indican que los biocombustibles obtenidos a T1-C1 y T1-C2 son hidrocarburos livianos o ligeros que tienen bajo contenido de azufre y resultan más idóneos para la producción de gasolinas para aviación, gasolinas para automóviles, disolventes comerciales, queroseno, etc. además, son hidrocarburos de bajo peso molecular de fácil transporte (Sanchez, 2015, p.22) mientras que el biocombustible obtenido a T2-C1 y T2-C2 es un hidrocarburo de tipo mediano que tienen una concentración media de hidrocarburos de bajo peso molecular y resultan ser idóneos para la producción de combustibles de motores a diésel, combustibles ligeros para industrias, combustibles para industrias metalúrgicas, etc (Standard Oil Company, 2013, p.33).

3.1.6.Resultados de viscosidad

Tabla 13-3: Resultados de viscosidad cinemática

	Viscosidad, cSt
T1-C1	2,19
T1-C2	3,84
T2-C1	3,45
T2-C2	3,82

Realizado por: (Ulpo, K, 2022).

Con los resultados de la Tabla 13-3 podemos observar que la viscosidad de los biocombustibles obtenidos es baja, pero se encuentra dentro de los estándares internacionales de combustibles para transporte como el diésel ya que Recope (2011, p.17), nos explica que se establece en un rango entre 1,9 y 4,1 $\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, además, de que esta característica nos indica un aumento de las fracciones de parafinas.

3.1.7.Resultado de poder calorífico

El poder calorífico obtenido del combustible T2-C2 del cual se obtuvo mayor rendimiento líquido fue de 40152 $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$, el cual resulta ser alto debido a que se acerca al valor del diésel convencional que es alrededor de 43100 $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ determinando que puede ser utilizado como combustible alternativo por su alto rendimiento y eficiencia energética y mecánica (Gómez y Vargas, 2017, p.13).

3.1.8. Punto de inflamación

Tabla 14-3: Resultados punto de inflamación del biocombustible

Biocombustible	Punto de inflamación, °C
T1 - C1	21
T1 - C2	19
T2 - C1	20
T2 - C2	19

Realizado por: (Ulpo, K, 2022).

El punto de inflamación de los productos de biocombustible obtenidos se encuentran en un rango de 19 a 21 °C que son temperaturas cercanas a la del ambiente, esto nos indica según SURA (2010, p.1), basado en la NFPA (National Fire Protection Association) que son productos líquidos inflamables al tener un punto de inflamación por debajo de los 37,8 °C.

3.1.9. Índice de Cetano Calculado

Tabla 15-3: Resultados del índice de cetano calculado

Biocombustibles	ICC
T1-C1	18,7
T1-C2	19,85
T2-C1	20,15
T2-C2	15,38

Realizado por: (Ulpo, K, 2022).

En la Tabla 15-3 se puede observar el resultado del índice de cetano calculado de cada biocombustible siendo valores bajos en cuanto a Recope (2011, p.15) nos indica que el rango de ICC de combustibles para transporte va de 45,5 a 48, y en si el diésel tiene un valor mínimo de 45. Un ICC bajo nos indica que va a haber un tiempo de reacción lento en el momento de autoignición en motores a diésel, además, de que promueve a la emisión de humo negro, HC y CO.

3.1.10. Análisis FT-IR

3.1.10.1. Análisis FT-IR de los productos sólidos

Para el análisis de espectroscopía infrarroja de los productos sólidos se mezclaron las 3 repeticiones hechas según la temperatura y la composición de la mezcla, obteniendo los siguientes resultados:

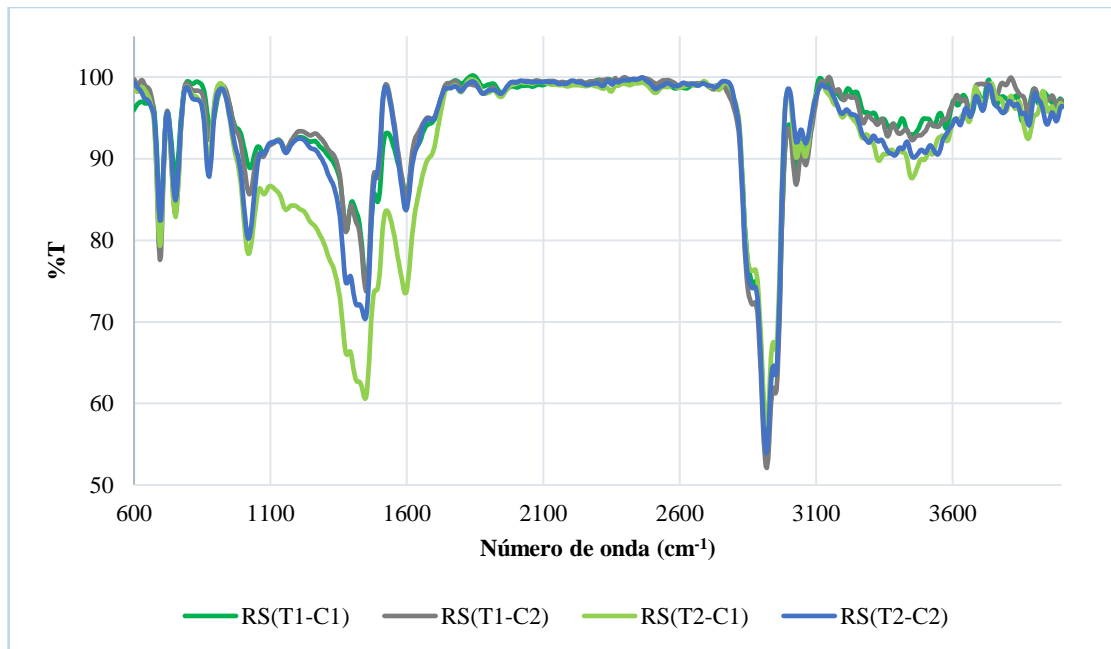


Gráfico 4-3: Análisis comparativo IR de los residuos sólidos obtenidos

Fuente: (Laboratorio de Análisis Instrumental ESPOCH, 2022).

Realizado por: (Ulpo, K, 2022).

En el análisis FT-IR de los residuos sólidos mostrado en la Gráfico 6-3 al realizarse una comparación entre las 4 muestras se observa que tienen picos similares. En el número de onda entre $2950.55 - 2919.15 \text{ cm}^{-1}$ se puede encontrar una vibración de tensión C-H de alcanos y entre el número de onda $1376.93 - 1454.06 \text{ cm}^{-1}$ una vibración de flexión C-H de alcanos. En el número de onda 1596.77 cm^{-1} se encuentra una vibración de tensión C-C de tipo aromático. Esto es razonable ya que el residuo sólido es literalmente carbón.

3.1.10.2. Análisis FT-IR productos líquidos

- Producto líquido (Biocombustible) a T1-C1 comparado con diésel comercial

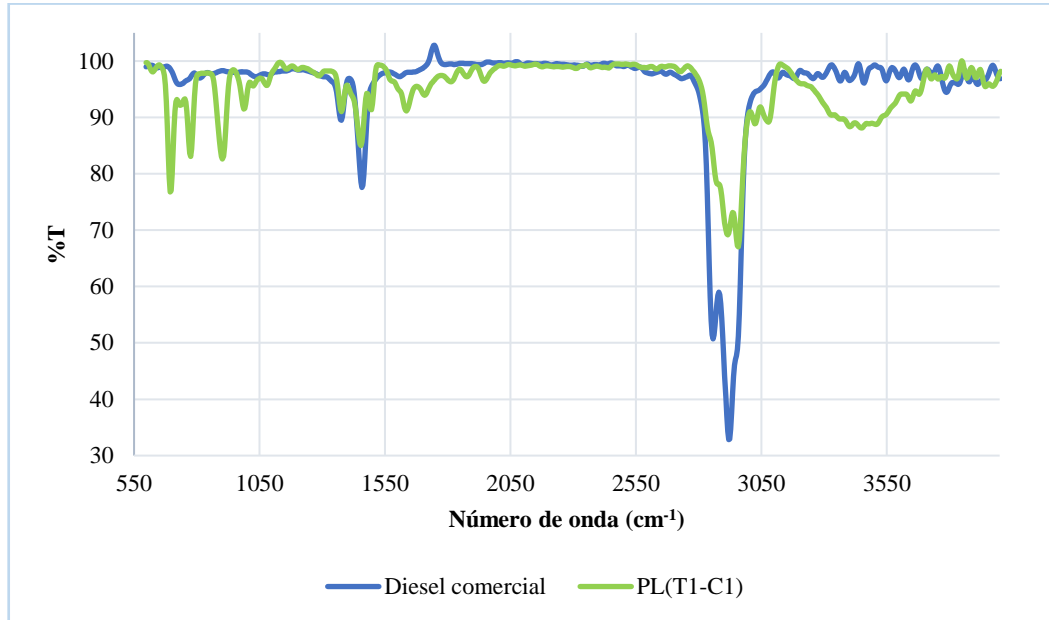


Gráfico 5-3: Análisis comparativo IR del producto líquido a T1-C1 con diésel comercial

Fuente: (Laboratorio de Análisis Instrumental ESPOCH, 2022).

Realizado por: (Ulpo, K, 2022).

- Producto líquido (Biocombustible) a T1-C2 comparado con diésel comercial

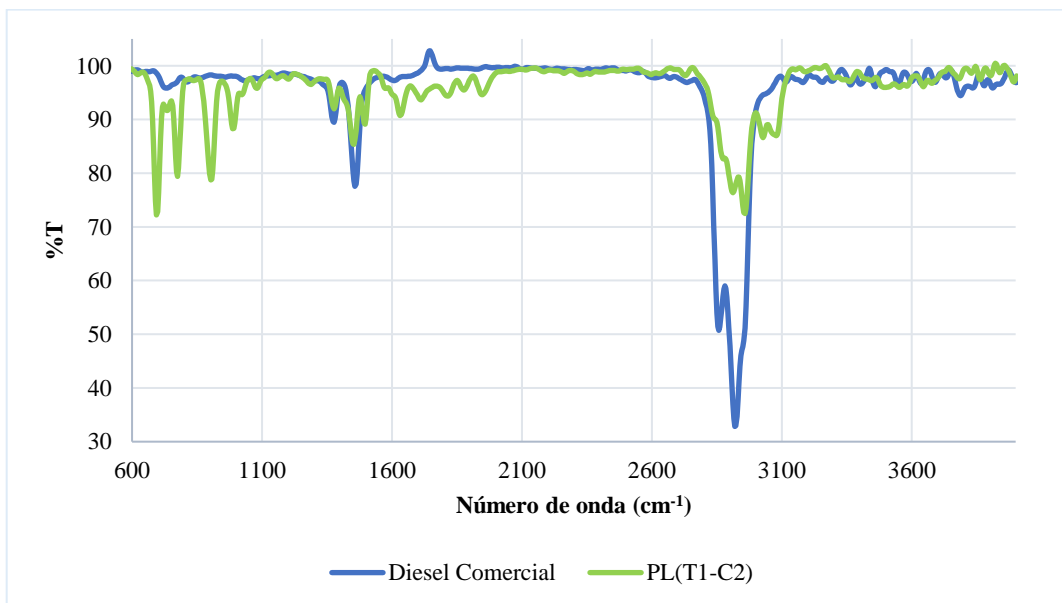


Gráfico 6-3: Análisis comparativo IR del producto líquido a T1-C2 con diésel comercial

Fuente: (Laboratorio de Análisis Instrumental ESPOCH, 2022).

Realizado por: (Ulpo, K, 2022).

➤ **Producto líquido (Biocombustible) a T2-C1 comparado con diésel comercial**

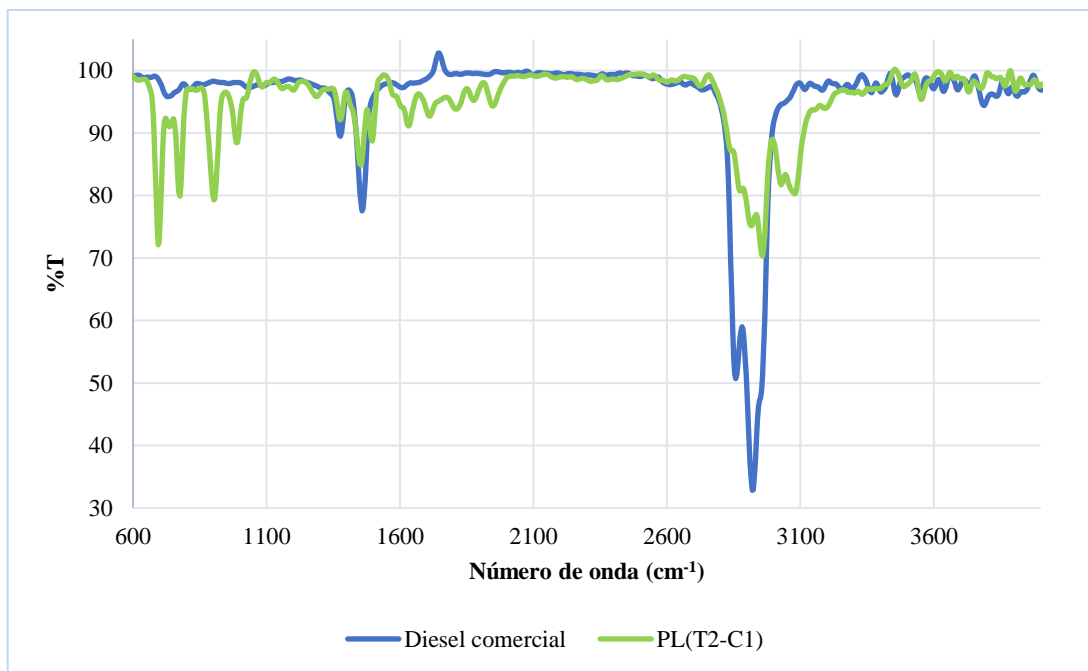


Gráfico 7-3: Análisis comparativo IR del producto líquido a T2-C1 con diésel comercial

Fuente: (Laboratorio de Análisis Instrumental ESPOCH, 2022).

Realizado por: (Ulpo, K, 2022).

➤ **Producto líquido (Biocombustible) a T2-C2 comparado con diésel comercial**

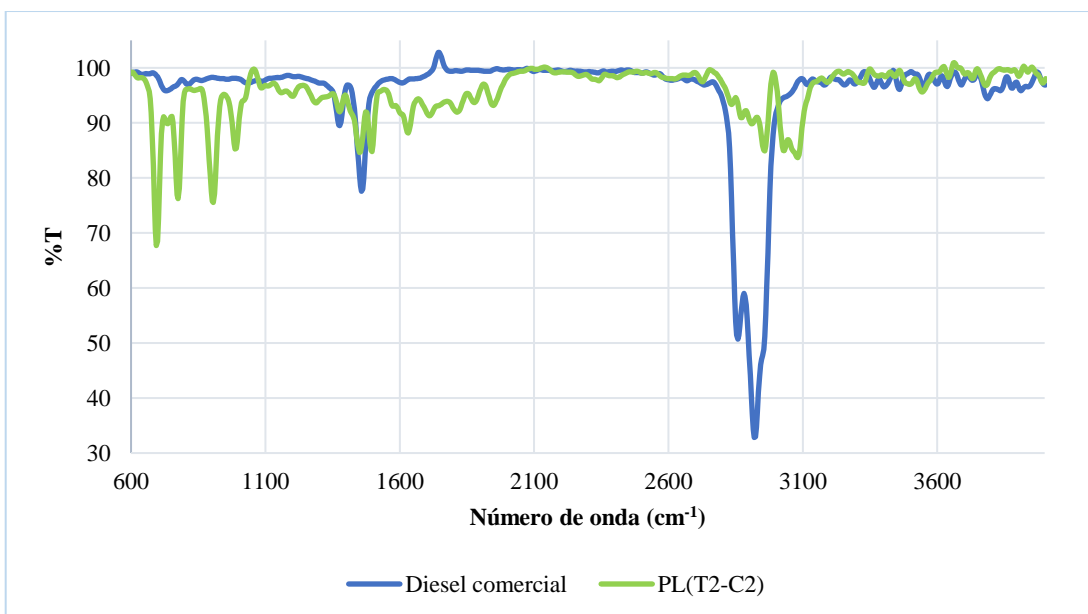


Gráfico 8-3: Análisis comparativo IR del producto líquido a T2-C2 con diésel comercial

Fuente: (Laboratorio de Análisis Instrumental ESPOCH, 2022).

Realizado por: (Ulpo, K, 2022).

En los biocombustibles analizados por espectroscopía FT-IR se observan los picos detallados en la Tabla 16-3, todos esos se presentaron en cada muestra evidenciando la presencia de grupos funcionales semejantes, además, se realizó una comparación de los biocombustibles obtenidos con diésel comercial.

Por rangos de número de onda se observan los siguientes grupos funcionales solo en los biocombustibles: entre 3200-3500 cm^{-1} con una vibración de tensión, amplia y fuerte O-H de alcoholes y fenoles, los picos entre 3250-3400 cm^{-1} con una vibración de tensión media N-H de amidas, aminas primarias y secundarias, entre 3000-3100 cm^{-1} con una vibración de tensión media =C-H de alquenos y una vibración de tensión fuerte C-H de aromáticos, entre 1580-1650 cm^{-1} con una vibración de flexión media N-H de aminas primarias, entre 1475-1550 cm^{-1} con una vibración de tensión asimétrica fuerte N-O de compuestos nitrogenados, entre 1250-1335 cm^{-1} con una vibración de tensión fuerte C-N de aminas aromáticas, entre 1000-1320 cm^{-1} con una vibración de tensión fuerte C-O de ésteres y ácidos carboxílicos, entre 1150-1300 cm^{-1} con una vibración de aleteo – flexión media C-H (-CH₂X) de haluros de alquilo, entre 1020-1250 cm^{-1} con una vibración de tensión media C-N de aminas alifáticas, entre 610-700 cm^{-1} con una vibración de flexión amplia y fuerte -C(triple enlace) de alquinos y entre 550-850 cm^{-1} con una vibración de tensión media C-Cl de haluros del alquilo. Tanto para los biocombustibles como para el diésel comercial aparecieron picos en los rangos de número de onda entre 2850-3000 cm^{-1} con una vibración de tensión media C-H de alcanos, entre 1400-1500 cm^{-1} con una vibración de tensión media C-C de anillos aromáticos, y entre 1450-1470 cm^{-1} con una vibración de flexión media C-H de alcanos.

Como se puede evidenciar el diésel comercial presenta grupos alcanos y aromáticos únicamente, a diferencia de los biocombustibles que además de los grupos mencionados presentan alcoholes, fenoles, ácidos carboxílicos, aminas, amidas, haluros de alquilo, ésteres, alquenos y alquinos, esto se debe a la presencia de biomasa lignocelulósica en la composición en la mezcla ya que al ser un material orgánico está compuesto por nitrógeno, oxígeno y otros compuestos que promueven a la aparición de estos grupos funcionales. Los resultados del análisis se pueden constatar con los compuestos orgánicos revelados en el análisis cromatográfico GC-MS en el ANEXO B, ANEXO C y ANEXO E.

Tabla 16-3: Espectros análisis FT-IR

Número de pico	Número de onda, cm^{-1}	Transmitancia, %	Enlace	Grupo funcional	Vibración
1	3486,7	97,435	O-H, H	Alcohol, fenol	Fuerte - amplio; tensión
2	3448,1	88,108	O-H, H	Alcohol, fenol	Fuerte - amplio; tensión
3	3401,82	88,3467	O-H, H	Alcohol, fenol	Fuerte - amplio; tensión

4	3332,38	96,1799	N-H	Aminas primarias, secundarias, amidas	Media; tensión
			O-H, H	Alcohol, fenol	Fuerte - amplio; tensión
5	3081,7	83,690	=C-H	Alquenos	Media; tensión
			C-H	Aromáticos	Fuerte; tensión
6	3077,83	89,1557	=C-H	Alquenos	Media; tensión
			C-H	Aromáticos	Fuerte; tensión
7	3027,69	84,9351	=C-H	Alquenos	Media; tensión
			C-H	Aromáticos	Fuerte; tensión
8	3023,84	88,8836	=C-H	Alquenos	Media; tensión
			C-H	Aromáticos	Fuerte; tensión
9	2958,27	84,8969	C-H	Alcanos	Media; tensión
10	2919,1	32,8297	C-H	Alcanos	Media; tensión
11	2915,84	75,1285	C-H	Alcanos	Media; tensión
12	2911,99	89,8206	C-H	Alcanos	Media; tensión
13	2873,42	80,7187	C-H	Alcanos	Media; tensión
			O-H	Ácidos carboxílicos	
14	2857,99	50,6992	C-H	Alcanos	Media; tensión
			O-H	Ácidos carboxílicos	
15	1635,34	91,1578	N-H	Amina primaria	Media; flexión
16	1631,41	90,7299	N-H	Amina primaria	Media; flexión
17	1496,49	89,1168	C-C	Aromáticos con anillo	Media; tensión
			N-O	Compuestos nitrogenados	Fuerte; tensión-asimétrico
18	1457,92	77,5613	C-H	Alcanos	Media; flexión
			C-C	Aromáticos con anillo	Media; tensión
19	1376,93	89,4737	C-H	Alcanos	Media; flexión-balanceo
20	1288,22	96,5309	C-H(-CH ₂ X)	Haluros de alquilo	Media; flexión-aleteo
			C-O	Alcoholes, ésteres, ácidos carboxílicos	Fuerte; tensión
			C-N	Aminas aromáticas	Fuerte; tensión
21	1199,51	97,5271	C-N	Aminas alifáticas	Media; tensión
			C-H(-CH ₂ X)	Haluros de alquilo	Media; flexión-aleteo
			C-O	Alcoholes, ésteres, ácidos carboxílicos	Fuerte; tensión

22	1083,8	97,3572	C-N	Aminas alifáticas	Media; tensión
			C-O	Alcoholes, ésteres, ácidos carboxílicos	Fuerte; tensión
23	987,375	88,4385	=C-H	Alquenos	Fuerte; flexión
24	902,523	79.2969	N-H	Aminas primarias, secundarias	Amplio-fuerte; flexión-aleteo
25	775,244	79,9116	C-Cl	Haluros de alquilo	Media; tensión
			C-H	Aromáticos	Fuerte; flexión
			N-H	Aminas primarias, secundarias	Fuerte-Amplio; flexión-aleteo
			=C-H	Alquenos	Fuerte; flexión
26	728,961	95,8357	C-Cl	Haluros de alquilo	Media; tensión
			C-H	Aromáticos	Fuerte; flexión
			N-H	Aminas primarias, secundarias	Fuerte-Amplio; flexión-aleteo
27	694,248	67,709	-C(Triple enlace) C-H; C-H	Alquinos	Amplio-Fuerte; flexión

Realizado por: (Ulpo, K, 2022).

3.1.11. Resultados análisis cromatográfico GC-MS

Se realizó el análisis cromatográfico GC-MS de los biocombustibles que obtuvieron mayores rendimientos líquidos, los cuales fueron a T2 – C1 y a T2 – C2 que tenían rendimientos entre el 68% y el 73% en todas sus repeticiones.

Los resultados obtenidos del análisis cromatográfico GC-MS de ambos biocombustibles reflejan los compuestos que se encuentran presentes en su composición como se indican en el ANEXO B, ANEXO C y ANEXO E.

Una vez cuantificado el número de carbonos por compuesto de los biocombustibles se pueden observar los siguientes resultados:

Tabla 17-3: Hidrocarburos presentes en el biocombustible a T2-C1

% de hidrocarburos	
C ₄ - C ₁₂	86,67
C ₁₀ - C ₁₇	33,33
C ₁₂ - C ₂₃	16,67
C ₂₃ - C ₄₀	3,33

Realizado por: (Ulpo, K, 2022).

Tabla 18-3: Hidrocarburos presentes en el biocombustible a T2-C2

% de hidrocarburos	
C ₄ - C ₁₂	78,66
C ₁₀ - C ₁₇	28,29
C ₁₂ - C ₂₃	20,70
C ₂₃ - C ₄₀	4,14

Realizado por: (Ulpo, K, 2022).

De acuerdo con Morocho (2019, p.78) los tipos de hidrocarburos se clasifican por número de carbono de la siguiente forma:

Tabla 19-3: Tipos de hidrocarburos por el número de carbonos

Hidrocarburo	Nº de C
Gasolina	C ₄ – C ₁₂
Queroseno	C ₁₀ – C ₁₇
Diésel	C ₁₂ – C ₂₃
Aceite de motor	C ₂₃ – C ₄₀

Fuente: (Morocho, 2019).

Realizado por: (Ulpo, K, 2022).

Con los resultados expuestos en la Tabla 17-3 y la Tabla 18-3 se puede determinar que ambos biocombustibles al tener una mayor cantidad de número de carbonos de C₄ a C₁₂ están formados principalmente de hidrocarburos de tipo gasolina basádonos en la Tabla 19-3.

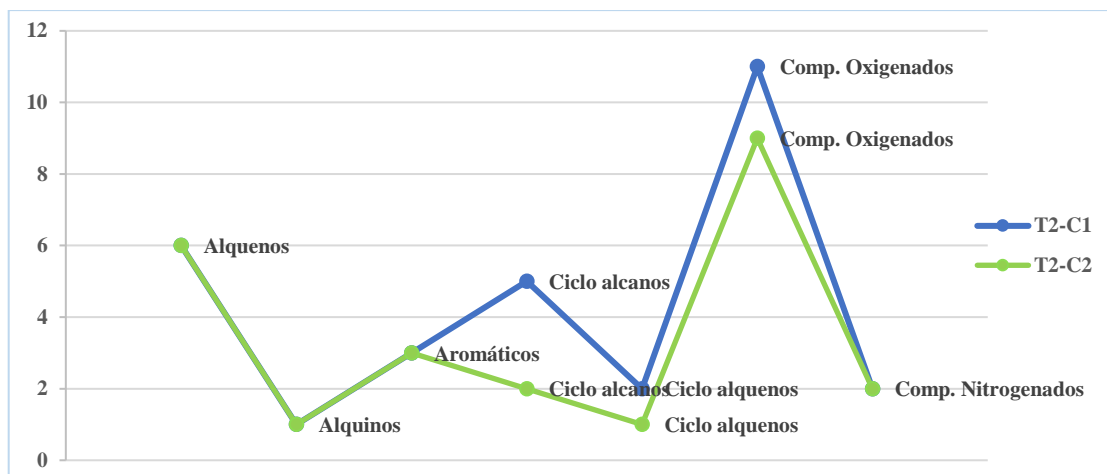


Gráfico 9-3: Familias de hidrocarburos de los biocombustibles a T2-C1 y T2-C2

Realizado por: (Ulpo, K, 2022).

En el Gráfico 11-3 se puede observar que existe un mayor número de compuestos oxigenados en la composición de ambos biocombustibles esto se debe a que la biomasa lignocelulósica al ser un material orgánico está formado principalmente por carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, azufre y en algunos casos cloro, además, este tipo de biomasa suele presentar un contenido de oxígeno de alrededor del 44%, (Herguedas, 2012, p.8), lo que pondría tender a la principal formación de compuestos oxigenados. Por otro lado, se puede determinar que los compuestos nitrogenados se presentan en menor proporción debido a que en los resultados del análisis elemental de nuestra biomasa se obtuvieron porcentajes de nitrógeno alrededor de 1% muy por debajo del estándar de 17% como se puede observar en la Tabla 1-3, el resto de los hidrocarburos contienen valores muy cercanos puesto que tanto la biomasa como los residuos plásticos de PS y PP son polímeros compuestos mayoritariamente por carbono e hidrógeno. Cabe recalcar que en los resultados del análisis FT-IR descritos en la Tabla 16-3 se pueden observar los grupos funcionales que distinguen a estos compuestos.

3.1.12. Análisis estadístico

El análisis estadístico se realizó mediante el uso del software Sthographics Centurion utilizando la relación de variables entre las temperaturas y la composición de las mezclas con el rendimiento líquido, obteniendo los siguientes resultados.

Tabla 20-3: Resumen estadístico descriptivo para el rendimiento

Recuento	12
Promedio	65,65
Mediana	66,9

Desviación Estándar	6,40788
Coefficiente de Variación	9,76%
Mínimo	55,8
Máximo	73
Rango	17,2
Sesgo Estandarizado	-0,852425
Curtosis Estandarizada	-0,708846

Realizado: (Ulpo, K, 2022).

La Tabla 20-3 muestra los estadísticos de resumen para el rendimiento de los biocombustibles. El principal interés aquí son el sesgo y la curtosis estandarizados, los cuales pueden utilizarse para determinar si la muestra tiene una distribución normal como se ha explicado anteriormente. Aquí se puede observar que tanto el valor del sesgo y curtosis estandarizados se encuentran dentro del rango ± 2 que es lo esperado para datos provenientes de una distribución normal, entonces se pueden determinar las medidas de tendencia central y dispersión en una escala cuantitativa. Para las medidas de tendencia central obtuvimos una media o promedio del rendimiento igual a 65,65% (+/-), para la mediana un valor de 66,9% y no podemos resaltar una moda debido a que ningún valor o rendimiento se repitió o fue tendencia. En las medidas de dispersión se utilizó el coeficiente de variación de Pearson el cual mide la dispersión relativa entre el cociente de la desviación estándar y el promedio, teniendo en cuenta que mientras menor sea este valor menor será la dispersión por lo tanto mayor representatividad tendrá el promedio (Rodríguez, 2014, p.2) en este caso tenemos un valor bajo de 9,76%, por lo tanto el promedio es significativo al tener una dispersión corta lo cual podemos observar al comparar el valor máximo y mínimo obtenido del rendimiento 73% y 55,8% respectivamente con el promedio de 65,65%.

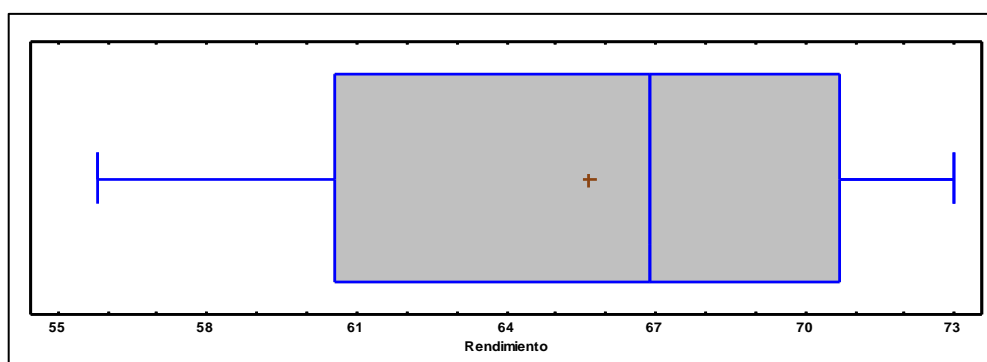


Gráfico 10-3: Gráfico de Caja y Bigotes

Realizado por: (Ulpo, K, 2022).

En el Gráfico 12-3 podemos observar que el bigote de la izquierda representa el valor mínimo del rendimiento que es 55,8% y el bigote de la izquierda representa en valor máximo del rendimiento

que es de 73%, fuera de estos límites no se observa algún valor. En cuanto a la caja la parte izquierda es la mayor lo cual determina que los valores comprendidos entre el 61% y el 67% de rendimiento presentan una dispersión mayor que los valores de la parte derecha.

Tabla 21-3: Prueba de hipótesis T-student

Hipótesis nula	media = 0
Alternativa	≠ 0
Estadístico t	35,4904
Valor-P	1,07E-12
A	0,05

Realizado: (Ulpo, K, 2022).

En la Tabla 21-3 se muestran los resultados de las pruebas de hipótesis con t-student a la población de la cual procede la muestra de rendimiento. La prueba-t evalúa la hipótesis de que la media del rendimiento es igual a 0,0 versus la hipótesis alterna de que la media del rendimiento es no igual a 0,0. Dentro de la prueba, ya una vez obtenido el valor-P el cual determina que no haya una diferencia real en la población de la muestra, es decir, que si el valor-P es mayor a 0,05 se podría aceptar la hipótesis nula (Arias y Molina, 2017, p.378); sin embargo, en nuestro resultado obtenemos un valor menor a 0,05 rechazando la hipótesis nula con un 95,0% de confianza, por lo tanto, se determina que la temperatura y la composición de la mezcla afectan al rendimiento líquido del proceso de co-pirólisis de biomasa lignocelulósica con mezclas de residuos plásticos de PS y PP.

3.2. Discusión

La generación de residuos orgánicos como la biomasa lignocelulósica y los residuos plásticos cada vez se ha vuelto un tema de gran interés debido a los problemas ambientales que conlleva su producción y disposición final. La acumulación de ambos residuos se ha vuelto realmente un problema a pesar de que son materiales reciclables, esto se debe a la que muchas veces la gestión de residuos sólidos no tiene un enfoque que se oriente a la recuperación de estos materiales con el fin de que sean reintegrados como materias primas una vez hayan cumplido su vida útil o su ciclo de vida (MAE-PNGIDS, 2021, p.3).

La humedad de la biomasa lignocelulósica se realizó mediante un proceso de secado en una estufa a 105 °C durante 24 horas hasta obtener una humedad de 1.53% lo que sería favorable para nuestros productos finales y consumo energético, luego, se procedió a triturar el material seco en un equipo de molienda y tamizado para obtener un tamaño de partícula inferior a 3mm, tal como lo expuesto en el pre tratamiento planteado por Uzojinwa et al. (2018, p.6), donde explica que para que el proceso de co-pirólisis la biomasa debe tener una humedad máxima del 10% para que

los productos líquidos no tengan un alto contenido de agua, y el tamaño de partícula debe ser de 2-3 mm para lograr mayores velocidades de calentamiento haciendo que el proceso de conversión sea más eficiente y estable. Una vez obtenido este resultado, se realizó el análisis elemental de la biomasa en un equipo FLASH 2000 con configuración CHN el cual nos reportó que en nuestra materia prima tenemos un promedio de 1.2% de nitrógeno, 46.4% de carbono y 5.8% de hidrógeno, lo cual es muy importante ya que algunos de los compuestos orgánicos descritos en el Gráfico 11-3 se deben a esto su formación.

Una vez obtenida la biomasa pre-tratada y los residuos plásticos caracterizados se realizó el proceso de co-pirólisis dándonos un rendimiento líquido máximo del 73% a 450 °C con la composición de mezcla 2 (25% biomasa + 75 % plástico (25% PP + 75%PS)). Este valor es semejante al obtenido por Husada (2019, p.2), el cual en su investigación realizada con mezclas de residuos de mango y plástico a 450 °C alcanzó un rendimiento líquido del 70%, expresando que a mayor temperatura la fase gaseosa tiende a triplicar su rendimiento mientras que la fase líquida disminuye. Otro punto según Uzoejinwa et al. (2018, p.476), nos menciona que los rendimientos líquidos se dan en mayor fracción debido a que el PP y el PS tienen un contenido de material volátil del 95 al 99% y que el PS al estar presente en mayor proporción en nuestra mezcla y ser un polímero de cadena lineal es más fácil su despolimerización por adición de calor, por tales motivos se logra obtener un buen rendimiento de los productos líquidos.

Una vez caracterizados los productos líquidos en la destilación realizada se obtuvieron rendimientos de gasolinas con un máximo del 79% y de diésel hasta 17%, los productos como el queroseno e hidrocarburos pesados tuvieron rendimientos menores al 10% que fueron casi insignificantes, en si esto nos permite saber que principalmente hay presencia de parafinas como iso parafinas y ciclo parafinas, y también de compuestos aromáticos (Boluda, 2019, p.60). En cuanto a la densidad de los biocombustibles se obtuvieron valores entre 0.870 y 0.887, estos valores no se asemejan a los descritos por Wang et al. (2021, p.38), donde expresa que la densidad de los líquidos obtenidos de la mezcla de PP con bagazo y PS con bagazo fueron de 0.937 y 0.951 respectivamente, sin embargo, son valores que se encuentran dentro del rango del diésel comercial que esta entre 0.820 y 0.900 (National, 2009, p.3). En la viscosidad podemos notar que T1-C2 y T2-C2 tienen valores de $3.84 \text{ mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ y $3.82 \text{ mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ y a T1-C1 y T2-C1 se obtiene una viscosidad de $2.19 \text{ mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ y $3.45 \text{ mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, respectivamente. Estos valores son inferiores a los obtenidos de la investigación de Uzoejinwa et al. (2018, p.487), que al mezclar 25% de biomasa y 75% de HDPE a 500 °C obtuvo una viscosidad entre 6.23 y $12.19 \text{ mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ya que la pirólisis de poliolefinas como el PE generan compuestos lineales aumentando la viscosidad del producto obtenido, sin embargo, nuestros valores coinciden con los del diésel con valores entre 2 y $4.5 \text{ mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ descritos en su investigación. El poder calorífico en promedio fue de $40152 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ un resultado bastante cercano al del diésel que es de $43100 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ (Gómez y Vargas, 2017, p.13)

esto puede deberse a la co-alimentación utilizada ya que el plástico aumenta el número de átomos de hidrógeno y de esta forma el poder calorífico mejora al producirse una desoxigenación por el aumento de la relación H:C. Para el punto de inflamación los valores obtenidos no variaron mucho estuvieron entre 19 y 21 °C consideradas temperaturas cercanas a la del ambiente, al tener valores por debajo de los del diésel que tiene un mínimo de 52 °C donde Recope (2011, p.15), nos indica que esto se debe a la presencia de productos livianos como la gasolina. El ICC obtenido fue realmente bajo a T2-C2 se obtuvo 15.38 que fue el mínimo y a T2-C1 se obtuvo 20.15 que fue el máximo. Según el Instituto Ecuatoriano de Normalización (2013, p.2), esto puede ocurrir debido a que los productos tuvieron un punto final de destilación menor a 260 °C, por otro lado Aguilar (2003, p.14), nos señala que el contenido de compuestos aromáticos y alcoholes tienden a un índice de cetano bajo, esto se debe a la presencia de biomasa en la mezcla que hace que estos compuestos aumenten su porcentaje, de tal forma (Singh, 2020, p.4) al obtener aceite pirolítico únicamente de mezclas plásticas obtiene un índice de cetano de 49. En el análisis FT-IR se encontraron picos similares en los cuatro biocombustibles pudiéndose observar grupos funcionales correspondientes a alcoholes, fenoles, aminas, amidas, aminas primarias, aminas secundarias, aminas alifáticas, aminas aromáticas, alquenos, aromáticos, compuestos nitrogenados, ésteres, ácidos carboxílicos, haluros de alquilo, etc. Al hacer una comparativa de los biocombustibles con diésel comercial se encontraron picos similares en número de onda entre 2850 – 3000 cm^{-1} , 1400 – 1500 cm^{-1} que corresponden a grupos alcanos o parafinas y picos entre 1450 – 1470 cm^{-1} correspondiente a anillos aromáticos. Según Singh (2020, pp.4-5) en su investigación comparó aceite pirolítico con diésel comercial teniendo picos alrededor de 725 cm^{-1} que representan la presencia de hidrocarburos alcanos y picos entre 2800 – 3000 cm^{-1} que de igual manera representan mayor presencia de alcanos y alquinos, ambos picos se encuentran presentes en los distintos combustibles, pero el aceite pirolítico tuvo la presencia de otros grupos funcionales como aromáticos, alquenos, compuestos oxigenados, por otro lado Lafont (2011, p.39), en su investigación al comparar biodiesel con diésel se observaron grupos funcionales característicos del biodiesel que no se observaron en el diésel como los ésteres metílicos en los picos entre 1300-1200 cm^{-1} , también se encontraron semejanzas en los grupos funcionales en los picos entre 3000-2950 cm^{-1} que corresponden a grupos alcanos que de igual forma se observan en la presente investigación. En cuanto al análisis cromatográfico GC-MS se obtuvieron varios compuestos donde predominaron los compuestos oxigenados, de igual manera podemos determinar que este resultado se debe a la composición elemental de la biomasa utilizada, aún sin tener el valor del oxígeno basándonos en Arteaga (2012, p.147), nos indica que al obtener biocombustible a partir de residuos de palma africana en el análisis elemental realizado a la biomasa el contenido de oxígeno fue de 53.49% siendo el elemento presente en mayor porcentaje lo que promovía a la formación de compuestos oxigenados como los alcoholes.

CONCLUSIONES

- El proceso de co-pirólisis de biomasa lignocelulósica y residuos plásticos en un reactor tipo batch con un sistema de refrigeración acoplado a una bomba de enfriamiento que alimenta agua a 10 °C para condensar los gases, se estudiaron los puntos de ajuste en base al rendimiento líquido, determinando que la temperatura óptima es de 450 °C como máximo para obtener mayor cantidad de biocombustible, ya que al sobrepasar esta temperatura las cadenas de los polímeros comienzan a romperse con mayor facilidad dando paso a la formación hidrocarburos más livianos o fracción gaseosa no condensable.
- El uso de plásticos como co-alimentación en el proceso de co-pirólisis de biomasa lignocelulósica demostró que el rendimiento líquido incrementa a medida que el porcentaje de PS aumenta en la composición de la mezcla, aunque el PP tiene valores cercanos, sin embargo, se determina que el PS al ser un polímero de cadena lineal y al adicionarle calor su despolimerización es más fácil, se da una mayor producción de biocombustible. A pesar de esto el consumo del PP es más grande en comparación al PS debido a sus usos múltiples, es por ello por lo que el PP no pierde importancia frente al PS.
- En base a la caracterización de los productos líquidos obtenidos se obtuvo una densidad relativa de 0.875 a T1-C1, 0.871 a T1-C2, 0.870 a T2-C1 y 0.887 a T2-C2, con viscosidades de 2.19, 3.84, 3.45 y 3.82 mm²·s⁻¹ respectivamente, indicándonos que se encuentran dentro de las características del diésel, además, dentro de la composición se encontró un mayor contenido de compuestos de C₄ a C₁₂ lo que es equiparable a las gasolinas, esto también se puede evidenciar en la destilación donde se obtuvo una mayor fracción de este combustible y en el punto de inflamación donde se obtuvieron temperaturas cercanas a las del ambiente muy por debajo a las del diésel de 52 °C indicándonos la presencia de gasolinas. Asimismo, el Índice de Cetano que determina el poder de autoignición de los combustibles diésel fue muy por debajo del rango normal de estos combustibles que tiene un valor mínimo de 45, esto resulta debido a que los biocombustibles tienen en su composición presencia de alcoholes y compuestos aromáticos que se pueden apreciar en los análisis de FT-IR y cromatografía GC-MS.
- Debido a las características de los biocombustibles obtenidos se puede determinar que al tener un Índice de Cetano bajo no es recomendable utilizarlo como un combustible convencional directamente, esto debido a que el tiempo de autoignición en los motores diésel sería muy lento provocando problemas en el sistema del motor, ya que al momento de inyectar el combustible a la cámara de combustión las explosiones y en si la potencia serían discontinuas por el largo tiempo de reacción , además, esto aumentaría las emisiones de humo negro, HC y CO. Por lo tanto, este tipo de combustibles podrían ser utilizados como aditivos para

mezclas con combustibles convencionales como el diésel al tener características similares de esta manera aumentando su rendimiento debido a su poder calórico.

RECOMENDACIONES

- Utilizar tamaños de partícula adecuados para que aumente la velocidad de calentamiento y el proceso de conversión sea más eficiente y estable.
- Al hacer el arrastre de oxígeno con nitrógeno para obtener una atmósfera inerte verificar que no existan fugas o entradas de aire, debido a que esto puede hacer que en el proceso se dé una combustión y se formen compuestos indeseables en el biocombustible.
- Verificar que la bomba de enfriamiento funcione correctamente en todo el proceso, ya que podría haber pérdidas de productos líquidos al no condensarse correctamente los gases.
- Utilizar EPP considerando que se trabaja en un equipo a elevadas temperaturas y presión, además que se emiten gases durante el proceso.
- Una vez obtenidos los productos líquidos disponerlos en un recipiente bien sellado y en un ambiente fresco para evitar su volatilización.
- Realizar el mantenimiento del equipo pirolítico cada cierto tiempo para que no exista taponamiento por el material particulado emitido por las materias primas utilizadas.

BIBLIOGRAFÍA

ABÁNDES, J.C. y FUENTES LEAL, C.. Estadística descriptiva. *Atencion Primaria* [en línea], 2016, vol. 6, no. 4, pp. 249-253. ISSN 02126567. DOI 10.2307/j.ctvvnkgk.5. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/4867/486755026009.pdf>.

AFANASJEVA, NATALIA, et. al. Lignocellulosic biomass. Part I: Biomass transformation. *Journal of Science with Technological Applications*, 2017, vol. 3, no. 2017, pp. 27-43. DOI 10.34294/j.jsta.17.3.22.

AGUILAR, C.. COMPARACIÓN DE LA CALIDAD DEL DIESEL 2D, ENTRE LAS CUATRO COMPAÑÍAS DE MAYOR COMERCIALIZACIÓN EN GUATEMALA, SEGÚN LAS NORMAS VIGENTES DEL PAÍS. *Records Management Journal* [en línea], 2003, vol. 1, no. 2, pp. 1-15. ISSN 09565698. Disponible en: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.88.5042&rep=rep1&type=pdf> <https://www.ideals.illinois.edu/handle/2142/73673> <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-33646678859&partnerID=40&md5=3ee39b50a5df02627b70c1bdac4a60ba>.

ÁLVAREZ, C.. Biocombustibles: desarrollo histórico-tecnológico, mercados actuales y comercio internacional. *Economía Informa*, 2009, no. 359, pp. 63-89.

ANDA, C. de. *Síntesis de oligómeros de PS funcionalizados con grupos peroxídicos a partir de un iniciador cíclico multifuncional: Potencial aplicación en la síntesis de IPNs parcialmente termodisociables.* [en línea]. 2005, S.l.: Centro de Investigación en Química Aplicada. Disponible en: https://ciqa.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1025/71/1/Tesis_maestria_Carlos_de_Anda.pdf.

ARAUZO, J., BIMBELA SERRANO, F., ÁBREGO, J., SÁNCHEZ, J. y GONZALO, A.. *Introducción a las tecnologías de aprovechamiento de biomasa.* 2014. Zaragoza: s.n.

ARFAMAINI, R.. *Categorización y clasificación de los tipos de plásticos en las estaciones de transferencia del Distrito Metropolitano de Quito en el año 2015* [en línea]. 2016, S.l.: Universidad Internacional SEK. Disponible en: [file:///c:/users/usuario/appdata/local/temp/rar\\$dia74476.20483/categorización y clasificación de los tipos de plásticos en las estaciones de transferencia del distrito metropolitano de quito en el año 2015.pdf](file:///c:/users/usuario/appdata/local/temp/rar$dia74476.20483/categorización_y_clasificación_de_los_tipos_de_plásticos_en_las_estaciones_de_transferencia_del_distrito_metropolitano_de_quito_en_el_año_2015.pdf).

ARIAS, M.M. y MOLINA, M. Lectura crítica en pequeñas dosis ¿Qué significa realmente el valor de p? *Rev Pediatr Aten Primaria* [en línea], 2017, vol. 19, pp. 377-81. ISSN 1139-7632. Disponible en: <https://scielo.isciii.es/pdf/pap/v19n76/1139-7632-pap-21-76-00377.pdf>.

ARTEAGA, J. et al. Obtención de biocombustibles producto de la pirólisis rápida de residuos de Palma Africana (*Elaeis guineensis* Jacq). *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial* [en línea], 2012, vol. 10, no. 2, pp. 144-151. Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S1692-35612012000200017&script=sci_abstract&tlng=es.

ASTM. Standard Test Method for Heat of Combustion of Liquid Hydrocarbon Fuels by Bomb Calorimeter. *ASTM D 240-92 (reapproved 1997)*, 1997, vol. 1, pp. 1-14. DOI 10.1520/D0240-19.2.

SALINAS, N. Alternativas de tratamientos y disposición final de los productos vegetales originados por la tala, poda, jardinería y rocería en el municipio de Itagüí. *Computers and Industrial Engineering* [en línea], 2018, vol. 2, no. January, pp. 6. ISSN 20782489. Disponible en: <http://ieeauthorcenter.ieee.org/wp-content/uploads/IEEE-Reference-Guide.pdf> <http://wwwlib.murdoch.edu.au/find/citation/ieee.html> <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.07.022> <https://github.com/ethereum/wiki/wiki/White-Paper> <https://tore.tuhh.de/hand>.

BARAY-GUERRERO, M. del R., PORRAS-FLORES, D.A., HOFFMANN-ESTEVEZ, H.E. y MANJARREZ-DOMINGUEZ, C.B. Tratamiento de la biomasa lignocelulósica mediante la pirólisis lenta y a baja temperatura para la producción de biocombustibles. *Revista de Energías Renovables*, 2019, vol. 3, no. 9, pp. 1-9. DOI 10.35429/jre.2019.9.3.1.9.

BOLUDA, C.J. et al. La complejidad química de las gasolinas de automoción. *Ciencia, Ingenierías y Aplicaciones*, 2019, vol. 2, no. 2, pp. 51-79. ISSN 2636-218X. DOI 10.22206/cyap.2019.v2i2.pp51-79.

BONELLI, P.R, et al. Caracterización cinética de la pirólisis y copirólisis de combustibles alternativos P.R. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 2019, vol. 1, pp. 105-112.

BROOKS, C. ¿Qué es el análisis estadístico? [en línea], 2020, pp. 1-2. Disponible en: <https://www.businessnewsdaily.com/6000-statistical-analysis.html>.

CASTRO, D.. *Evaluación del proceso de pirólisis aplicado al material lignocelulósico residual proveniente del Pino Patula en atmósfera de dióxido de carbono.* 2018, S.l.: s.n.

CENTRO DE INFORMACIÓN TÉCNICA (CIT). Plásticos características y ventajas al medio ambiente. *Revista Ecoplas* [en línea], 2011, vol. 38, pp. 1-16. Disponible en: <http://ecoplas.org.ar/pdf/38.pdf>.

CORTOLIMA. *Guía Para la Selección de. Tecnologías de Manejo Integral de Residuos Sólidos Parte 2.* 2012, S.l.: s.n.

CRESCO, S. *Evaluación de la pirólisis térmica de residuos de polietileno proveniente de la producción de banano en un reactor batch* [en línea]. 2013, S.l.: Universidad Politécnica Nacional. Disponible en: <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/6661/4/CD-5053.pdf>.

CRISTAN, A., IZE, I. y GAVILAN, A. La situación de los envases de plástico en México. *Gazeta Ecológica* [en línea], 2003, vol. 69, pp. 67-82. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/539/53906905.pdf>.

DREWS, A.. Standard Test Method for Distillation of Petroleum Products. *Manual on Hydrocarbon Analysis, 6th Edition*, 2008, vol. 1, pp. 1-29. DOI 10.1520/mnl10832m.

DREWS, A.. Standard Practice for Density, Relative Density (Specific Gravity), or API Gravity of Crude Petroleum and Liquid Petroleum Products by Hydrometer Method. *Manual on Hydrocarbon Analysis, 6th Edition*, 2017, vol. i, no. Reapproved, pp. 1-8. DOI 10.1520/mnl10866m.

ESPINOZA, E. a. Modelo de gestión de residuos plásticos. *II Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos* [en línea]. 2009, Mendoza. Disponible en: [http://www.redisa.uji.es/artSim2009/GestionYPoliticaAmbiental/Modelo de gestión de residuos plásticos.pdf](http://www.redisa.uji.es/artSim2009/GestionYPoliticaAmbiental/Modelo%20de%20gesti3n%20de%20residuos%20pl3sticos.pdf).

FERRER, J.A.C. *Estudio de la pirólisis de plásticos de polietileno y neumáticos usados* [en línea]. 1996, S.l.: s.n. Disponible en: <http://rua.ua.es/dspace/handle/10045/17030>.

GARCÍA, A. Parámetros para determinar las normas de almacenamiento y consumo del combustible diesel. *Revista avanzada científica* [en línea], 2009, vol. 12, no. 1, pp. 1-6. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5074414>.

GIOVANNI, W. y ORTIZ, C. Materiales Lignocelulosicos Como Fuente De Biocombustibles Y Productos Químicos Lignocellulosic Materials As Source of Biofuels and Chemical Products. *Ciencia y tecnología aeronáutica* [en línea], 2011, vol. 16, pp. 41-46. Disponible en: <file:///C:/Users/USUARIO/Downloads/486.pdf>.

GÓMEZ, C. y VARGAS, L.. *Medición Y Evaluación De Las Emisiones De Material Particulado Y Opacidad En Una Flota De Vehículos Con Motor Ciclo Diésel, Utilizando Una Mezcla De Diésel Con 20% De Queroseno* [en línea]. 2017, S.l.: s.n. Disponible en: <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/17596>.

GUTIÉRREZ, M.C. y DROGUET, M.. La cromatografía de gases y la espectrometría de masas: Identificación de compuestos causantes de mal olor. *Boletín Intexter del Instituto de Investigación Textil y de Cooperación Industrial*, 2002, no. 122, pp. 35-41. ISSN 11316756.

HERGUEDAS, A. et al. Biomasa, Biocombustibles Y Sostenibilidad. *Transbioma* [en línea], 2012, vol. 13, no. 2, pp. 105-109. ISSN 0924977X. Disponible en: [http://sostenible.palencia.uva.es/system/files/publicaciones/Biomasa%2C Biocombustibles y Sostenibilidad.pdf](http://sostenible.palencia.uva.es/system/files/publicaciones/Biomasa%2C%20Biocombustibles%20y%20Sostenibilidad.pdf).

HIDALGO, D.E. *Química orgánica* [en línea]. 2017. Michoacán: s.n. Disponible en: [http://bios.biologia.umich.mx/obligatorias/quimica/manual_quimorg_2017 .pdf](http://bios.biologia.umich.mx/obligatorias/quimica/manual_quimorg_2017.pdf).

HUSADA, F.R.K. Producción de hidrocarburos a partir de la pirólisis de nuez de mango con catalizadores y mezcla de plástico. *Ayañ*, 2019, vol. 8, no. 5, pp. 1-82.

IBÁÑEZ, S. *Sistemas de control “on-line” de reactores químicos Batch* [en línea]. S.l.: Universidad Politécnica de Catalunya. 2019, Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/185196/Memoria.pdf?sequence=7&isAllowed=y>.

INEN, 2013. Norma Técnica Ecuatoria NTE INEN 1493 Determinación del punto de Inflamacion de copa cerrada Pwinsky Martens.

INSTITUTO ECUATORIANO DE NORMALIZACIÓN. Productos De Petróleo. Determinación Del Índice De Cetano Calculado. *Inen* [en línea], 2013, vol. First Edit, pp. 1-7. Disponible en: <https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/1495-1.pdf>.

IPIALES, R.P. *Desarrollo de una ingeniería conceptual para el proceso de pirólisis catalítica de residuos plásticos de polipropileno y poliestireno* [en línea]. 2018, S.l.: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Disponible en: <http://dspace.espoch.edu.ec/bitstream/123456789/8649/1/96T00451.pdf>.

JANOSIK, S.M. Polipropileno. *NASPA Journal*, 2016, vol. 42, no. 4, pp. n.p. ISSN 1098-6596.

KLUG, M.. Pirólisis, un proceso para derretir la biomasa. *Revista de Química PUCP*, 2012, vol. 26, pp. 37-40.

LAFONT, J.J. et al. Análisis químico de mezclas biodiesel de aceite de cocina usado y diesel por espectroscopia infrarroja. *Informacion Tecnologica*, 2011, vol. 22, no. 4, pp. 35-42. ISSN 07168756. DOI 10.4067/S0718-07642011000400005.

LOJANO, F. *Obtención de combustibles a partir de Tereftalato de Polietileno (PET) a escala de laboratorio mediante procesos de pirólisis y gasificación* [en línea]. S.l.: 2020, s.n. Disponible en: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/18901>.

MAE-PNGIDS. Diagnóstico de la Cadena de Gestión Integral de Desechos Sólidos-Reciclaje. *Ministerio del Ambiente-Programa Nacional para la Gestión Integral de Desechos Sólidos PNGIDS*, no. Senplades, 2013, pp. 14.

MAE-PNGIDS. Proyecto: Programa Nacional para la Gestión Integral de Desechos Sólidos (PNGIDS). , 2021, vol. 3, no. 2, pp. 6.

MARÍA, O. *Universidad Andina Simón Bolívar Las industrias del sector poliestireno en el marco del Código Orgánico de la Producción* [en línea]. 2017, S.l.: Universidad Andina Simón Bolívar. Disponible en: [http://repositorio.uasb.edu.ec/bitstream/10644/6032/1/T2524-MT-Ocles-Las industrias.pdf](http://repositorio.uasb.edu.ec/bitstream/10644/6032/1/T2524-MT-Ocles-Las%20industrias.pdf).

MONZÓ, R.. *Investigación de la influencia del tipo de gas utilizado en el plasma atmosférico, en la modificación superficial del polipropileno* [en línea]. 2015, S.l.: Universidad Politécnica de Valencia. Disponible en: [https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/58776/Monzó - Investigación de la influencia del tipo de gas utilizado en el plasma atmosférico%2C en lapdf?sequence=1](https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/58776/Monzó%20Investigaci3n%20de%20la%20influencia%20del%20tipo%20de%20gas%20utilizado%20en%20el%20plasma%20atmosf3rico%2C%20en%20la%20modificaci3n%20superficial%20del%20polipropileno%20.pdf?sequence=1).

MOROCHO, S. *Obtención de combustible mediante pirólisis térmica a partir de polipropileno reciclado* [en línea]. 2019, S.l.: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Disponible en: <http://dspace.espoch.edu.ec/bitstream/123456789/13804/1/96T00569.pdf>.

OREJUELA PARRA, P.A. *Caracterización de la Gravedad API en el Campo Lisama (Cuenca Valle Medio Del Magdalena) a partir de la Pirolisis Rcok-Eval Vi* [en línea]. 2010,S.l.: Universidad Industrial de Santander. Disponible en: <http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2010/134067.pdf>.

PALMAY, P. et al. Determination of the Thermodynamic Parameters of the Pyrolysis Process of Post-Consumption Thermoplastics by Non-Isothermal Thermogravimetric Analysis. *Polymers*, 2021a, vol. 13, no. 24, pp. 4379. DOI 10.3390/polym13244379.

PALMAY, P. et al. Influence of Temperature and Reaction Time on the Performance of Thermal Pyrolysis of Compact Polystyrene Waste. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* [en línea], 2021b, vol. 728, no. 1, pp. 1-8. ISSN 17551315. DOI 10.1088/1755-1315/728/1/012005. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/351030750_Influence_of_Temperature_and_Reaction_Time_on_the_Performance_of_Thermal_Pyrolysis_of_Compact_Polystyrene_Waste.

PINEDO, A.U. *Obtención de biocarbones y biocombustibles mediante pirólisis de biomasa residual* [en línea]. 2013, S.l.: Universidad Nacional de Educación a Distancia. Disponible en: http://digital.csic.es/bitstream/10261/80225/1/BIOCARBONES_CENIM_CSIC.pdf.

PIQUÉ, T.M. y VÁZQUEZ, A. Concreto y cemento: Investigación y desarrollo. *Concreto y cemento. Investigación y desarrollo* [en línea], 2012, vol. 3, no. 2, pp. 62-71. ISSN 2007-3011. Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-30112012000100004&lng=es&nrm=iso&tlng=es.

RECOPE. Manual de productos 2011. *Journal of Visual Languages & Computing* [en línea], 2011, vol. 11, no. 3, pp. 55. Disponible en: https://www.recope.go.cr/wp-content/uploads/2013/07/Manual_Productos.pdf.

RODRÍGUEZ, A. Coeficiente de variación. [en línea], 2014, pp. 1-5. Disponible en: <http://www.uaeh.edu.mx/virtual1>.

ROSARIO FLORES, R.R. *Manejo De Residuos Solidos Urbanos Para a Prevencion De Daños a La Salud En El Municipio De Cuernavaca Morelos*. 2016, S.l.: Instituto Nacional de Salud Pública.

SAJDAK, M. Impact of plastic blends on the product yield from co-pyrolysis of lignin-rich materials. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* [en línea], 2017, vol. 124, pp. 415-425. ISSN 01652370. DOI 10.1016/j.jaap.2017.03.002. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jaap.2017.03.002>.

SANCHEZ, D.I.H. *Analisis de los modelos matematicos del flujo nucleo anular en el transporte de crudos Instituto Politecnico Nacional* [en línea]. S.l.: Instituto Politécnico Nacional. 2015, Disponible en: [https://tesis.ipn.mx/jspui/bitstream/123456789/20649/1/Análisis de los modelos matemáticos del flujo nucleo anular en transporte de crudos.pdf](https://tesis.ipn.mx/jspui/bitstream/123456789/20649/1/Análisis%20de%20los%20modelos%20matemáticos%20del%20flujo%20nucleo%20anular%20en%20transporte%20de%20crudos.pdf).

SINGH, R.K. et al. Waste plastic to pyrolytic oil and its utilization in CI engine: Performance analysis and combustion characteristics. *Fuel*, 2020, vol. 262, no. October, pp. 1-10. ISSN 00162361. DOI 10.1016/j.fuel.2019.116539.

STANDARD OIL COMPANY. *El petróleo: Breve reseña de su historia e industrialización*. 2013, S.l.: s.n.

SURA, C.-A. Manipulación y almacenamiento de materiales inflamables y combustibles. *ARP sura* [en línea], 2010, pp. 1-13. Disponible en: http://www.arlsura.com/files/materiales_inflamables.pdf.

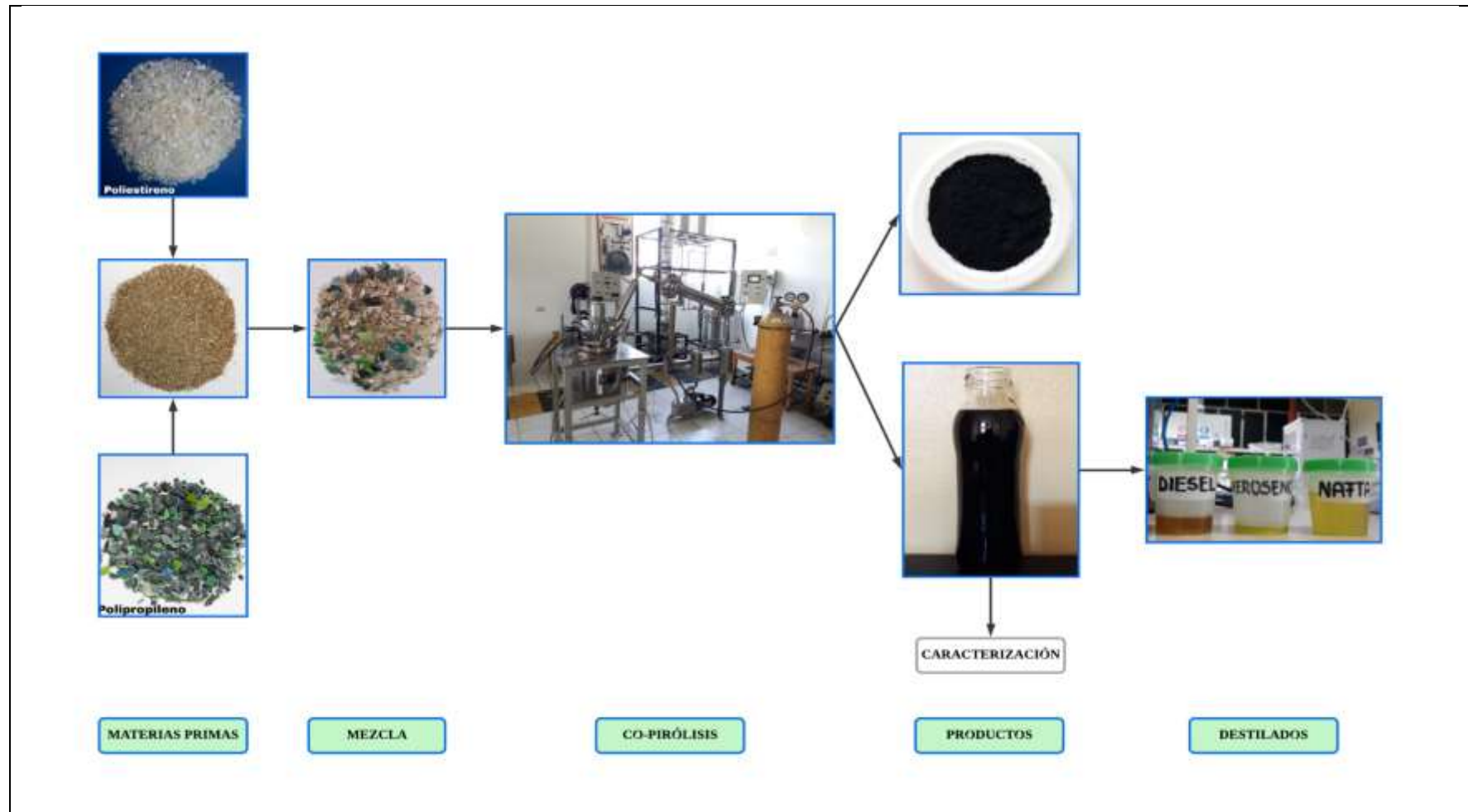
UZOEJINWA, B.B., HE, X., WANG, S., EL-FATAH ABOMOHRRA, A., HU, Y. y WANG, Q. Co-pyrolysis of biomass and waste plastics as a thermochemical conversion technology for high-grade biofuel production: Recent progress and future directions elsewhere worldwide. *Energy Conversion and Management* [en línea], 2018, vol. 163, no. December, pp. 468-492. ISSN 01968904. DOI 10.1016/j.enconman.2018.02.004. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.02.004>.

WANG, Z., BURRA, K.G., LEI, T. y GUPTA, A.K. Co-pyrolysis of waste plastic and solid biomass for synergistic production of biofuels and chemicals-A review. *Progress in Energy and Combustion Science* [en línea], 2021, vol. 84, pp. 51. ISSN 03601285. DOI 10.1016/j.pecs.2020.100899. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2020.100899>.

WU, F., BEN, H., YANG, Y., JIA, H., WANG, R. y HAN, G. Effects of different conditions on co-pyrolysis behavior of corn stover and polypropylene. *Polymers*, 2020, vol. 12, no. 4. ISSN 20734360. DOI 10.3390/POLYM12040973.

ANEXOS

ANEXO A: PROCESO COMPLETO PARA LA OBTENCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLE MEDIANTE CO-PIRÓLISIS



ANEXO B: ANÁLISIS CROMATOGRÁFICO DEL COMBUSTIBLE T2-C1, N#1



UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
DEPARTAMENTO DE PETRÓLEOS, ENERGÍA Y CONTAMINACIÓN



INFORME DE RESULTADOS
ÁREA DE PETRÓLEOS

Informe N°: 21-316.1
Fecha de emisión: 2021-12-22

Cliente*: KATHERINE LISSETTE ULPO CARRERA
Contacto*: Srta. Katherine Ulpo
Dirección*: Robamba
Teléfono*: 0983772612 **Correo-e*:** katherine.ulpo@esPOCH.edu.ec
Tipo de muestra*: MEZCLAS DE HIDROCARBUROS
Descripción de la muestra*: MUESRA 1
Condiciones de la Muestra: Sin descripción específica
Fecha de ingreso de muestra: 2021-12-17
Código de la muestra: 21-316.1
Fecha de realización de ensayos: 2021-12-17
Lugar donde se realizaron los ensayos: Laboratorio DPEC – Área de Investigación
Método de ensayo: Cromatografía GC-MS

ANÁLISIS CROMATOGRÁFICO*				
Número de componente*	Nombre del componente*	Tiempo de retención (minutos)*	Composición, %	Probabilidad, %
1	3-metil, Bicyclo [4.2.0] octa-1,3,5-trieno	5,121	14,418	78
2	3,3'-oxibis, 1-propeno	6,018	2,007	50
3	éster 2-etilhexílico, ácido ciclopropano carboxílico	6,054	1,678	53
4	2-Pentinol	6,625	0,910	45
5	3-metil-, 1-octeno	7,793	4,144	64
6	3-metil-, 1-buteno	7,853	1,553	50
7	3-metil-, 3-Buten-2-ol	7,915	3,824	47
8	3,7-dimetil-, 1-octeno	8,104	0,554	64
9	éster 1-metilpropílico, ácido 2-propenoico	8,283	1,669	9
10	1-Octin-3-ol	9,231	1,008	59
11	Bibencilo	9,289	0,983	86
12	4-octeno, (E)	9,397	0,629	46
13	3-metil-, 1-hexeno	9,672	0,722	50
14	P-etil-, bis (fenilmetilo), éster de ácido fosfónico	10,063	11,827	50
15	1- (fenilsulfonil) -2-metilciclopropano	10,204	1,103	58
16	5-metil-, 1,6-heptadien-3-ino	10,234	2,695	47
17	3-metilbencil, Cianuro	10,450	15,840	38
18	N-hidroxi-, Benzamida	10,509	4,593	27
19	alil hexadecil éster, ácido oxálico	10,640	1,630	43
20	2- (5-nitro-2-piridinil) hidrazida, ácido benzenosulfónico	10,750	1,307	50
21	metil-, Ciclooctano	10,816	0,690	30
22	(Z) -Deca-8-en-4,6-din-1-ilo acetato	10,880	2,583	37
23	1-Undecanol	11,609	0,515	47

* Información proporcionada por el cliente, el Laboratorio DPEC no se responsabiliza por esta información

Analistas: FTL
Elaborado por: VRT

Revisado por:

X Ing. Richard Herrera V.
RESPONSABLE TÉCNICO



Aprobado por:

Ing. Fernanda Toasa L.
RESPONSABLE DE CALIDAD

ADVERTENCIA: EL USUARIO DEBE EXIGIR EL ORIGINAL DEL INFORME COMPLETO O SOLICITAR UNA COPIA CONTROLADA DEL MISMO. EL DPEC NO SE RESPONSABILIZA POR LA REPRODUCCIÓN PARCIAL DE ESTE INFORME

Dirección: Enrique Rither s/n y Bolivia

Teléfono: 2904794 / 2544631 ext. 26
QUITO - ECUADOR

E-mail: fig.secretaria.dpec@ucs.edu.ec

MC2201-P05-3

Hoja 1 de 6

ANEXO C: ANÁLISIS CROMATOGRÁFICO DEL COMBUSTIBLE T2-C1, N#2



UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
DEPARTAMENTO DE PETRÓLEOS, ENERGÍA Y CONTAMINACIÓN



INFORME DE RESULTADOS
ÁREA DE PETRÓLEOS

ANÁLISIS CROMATOGRÁFICO*				
Número de componente*	Nombre del componente*	Tiempo de retención (minutos)*	Composición, %	Probabilidad, %
24	5-metil-, 4-Nonene	11,976	0,771	50
25	1,1,3-trimetil, Ciclopentano	12,626	0,645	50
26	1,1,2-trimetil, Ciclopentano	12,965	0,896	50
27	3-metil-4- (1,2-propadienil) ,Ciclohexeno	13,899	18,088	38
28	1,3-dimetanol, 3,5,7-ciclo heptatrieno	14,316	0,850	32
29	pentil, ciclopentano	14,700	0,631	56
30	1,1': 4', 1": 4", 1" '- Cuaterfenil	15,689	1,237	89

Nota: Los ensayos marcados con (*) no están incluidos en el alcance de acreditación del SAE.

Nota: Los resultados que constan en el presente informe solo están relacionados con la muestra entregada por el cliente al DPEC.

Nota: Los resultados se aplican a la muestra, tal y como se recibió

Observaciones*: En caso de encontrar la misma molécula en distintos tiempos de retención, esto puede deberse a isómeros que el equipo no es capaz de diferenciar.

Condiciones Ambientales.- Presión: 544,7 %, **Temperatura:** 17,5 °C

* La observación corresponde a adiciones, desviaciones, exclusiones del método.

Analista: FTL
Elaborado por: VRT

Revisado por:

X Ing. Richard Herrera V.
RESPONSABLE TÉCNICA



ADVERTENCIA: EL USUARIO DEBE EXIGIR EL ORIGINAL DEL INFORME COMPLETO O SOLICITAR UNA COPIA CONTROLADA DEL MISMO.
EL DPEC NO SE RESPONSABILIZA POR LA REPRODUCCIÓN PARCIAL O TOTAL DE ESTE INFORME

Dirección: Enrique Ritter s/n y Bolívar

Teléfono: 2904794 / 2544631 ext. 26
QUITO - ECUADOR

E-mail: fig.secretaria.dpec@uce.edu.ec

MC2201-P05-3

Hoja 2 de 6

ANEXO D: ANÁLISIS CROMATOGRÁFICO DEL COMBUSTIBLE T2-C1, N#3

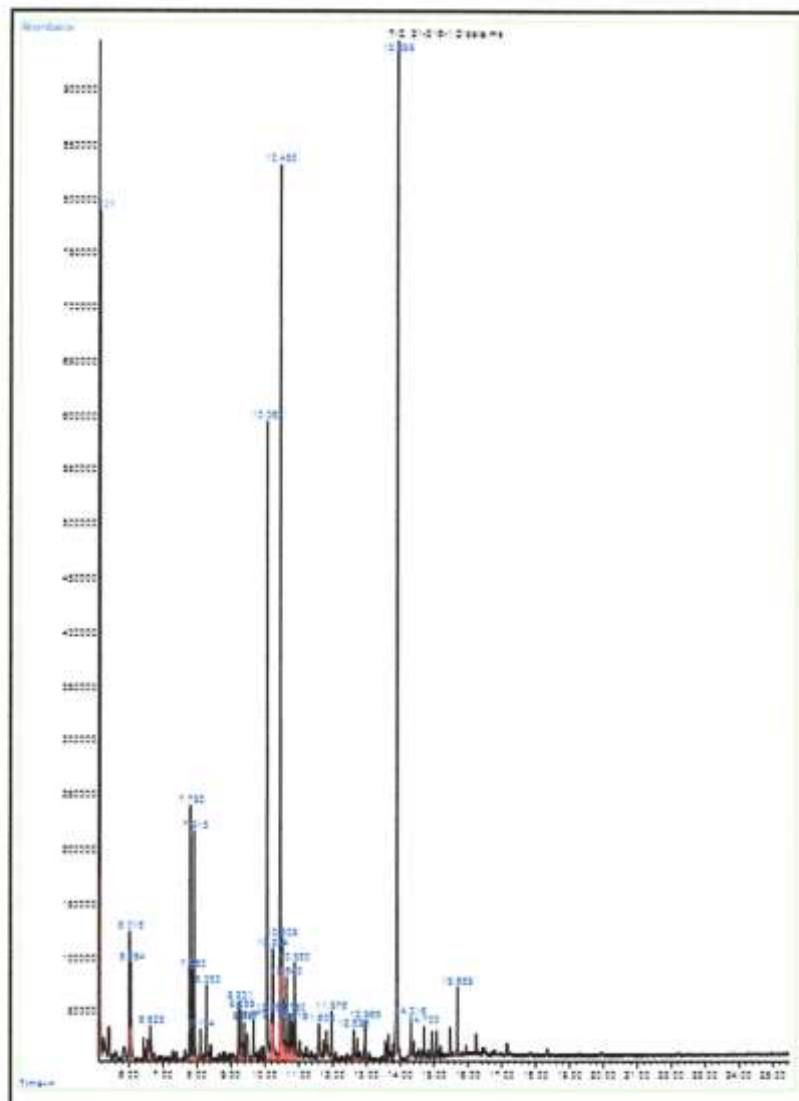


UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
DEPARTAMENTO DE PETRÓLEOS, ENERGÍA Y CONTAMINACIÓN



INFORME DE RESULTADOS ÁREA DE PETRÓLEOS

ANEXO CROMATOGRAMA 21-316.1



ADVERTENCIA: EL USUARIO DEBE EXIGIR EL ORIGINAL DEL INFORME COMPLETO O SOLICITAR UNA COPIA CONTROLADA DEL MISMO.
EL DPEC NO SE RESPONSABILIZA POR LA REPRODUCCIÓN PARCIAL O TOTAL DE ESTE INFORME

Dirección: Enrique Ritter s/n y Bolivia

Teléfono: 2904794 / 2544631 ext. 26
QUITO - ECUADOR

E-mail: fo.secretaria@dpecibuc.edu.ec

MC2201-P05-3

Hoja 3 de 6

ANEXO E: ANÁLISIS CROMATOGRÁFICO DEL BIOCOMBUSTIBLE A T2-C2, N#1



UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
 FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
 DEPARTAMENTO DE PETRÓLEOS, ENERGÍA Y CONTAMINACIÓN



INFORME DE RESULTADOS
 ÁREA DE PETRÓLEOS

Informe N°: 21-316.2
 Fecha de emisión: 2021-12-22

Cliente: KATHERINE LISSETTE ULPO CARRERA
Contacto: Srta. Katherine Ulpo
Dirección: Riobamba
Teléfono: 0983772612 **Correo-e:** katherine.ulpo@esoch.edu.ec
Tipo de muestra: MEZCLAS DE HIDROCARBUROS
Descripción de la muestra: MUESRA 2
Condiciones de la Muestra: Sin descripción específica
Fecha de Ingreso de muestra: 2021-12-17
Código de la muestra: 21-316.2
Fecha de realización de ensayos: 2021-12-17
Lugar donde se realizaron los ensayos: Laboratorio DPEC – Área de Investigación
Método de ensayo: Cromatografía GC-MS

ANÁLISIS CROMATOGRÁFICO*				
Número de componente*	Nombre del componente*	Tiempo de retención (minutos)*	Composición, %	Probabilidad, %
1	3-metil, Blicido [4.2.0] octa-1,3,5-trieno	5,120	16,501	83
2	1-ol, 2-hexin	6,018	1,396	64
3	éster 2-etil hexílico, Ácido ciclopropano carbonílico	6,055	1,439	50
4	trans-3-deceno	7,791	3,192	53
5	2,4,6-trimetil, 1-noneno	7,851	1,419	72
6	3-metil, 1-hepteno	7,912	3,083	49
7	2,4-dimetil, hepteno	8,105	0,503	47
8	1-óxido, Thiepano	8,285	1,257	16
9	ciclobutil octil éster, ácido oxálico	9,231	0,772	53
10	4-octeno, (E) (isómero)	9,398	0,516	43
11	1-etil-3-metil, ciclopentano	9,672	0,503	45
12	1,5-octadilino	10,061	13,292	52
13	1- (fenilsulfonil), 2-metilen ciclopropano	10,205	1,071	43
14	1- (bromometil), 4-metil, Benceno	10,235	3,251	59
15	(Benzo [1,3] dioxol-5-imetil) (3-bencil-3H-[1,2,3] triazoló [4,5-d] pirimidin-2-il) amina	10,447	18,637	35
16	gamma.-oxo, ácido benceno butanoico	10,508	4,903	27
17	4-octeno, (E) (isómero)	10,639	1,371	27
18	1-metiletil éster, Ácido benzenosulfónico	10,754	1,234	53
19	1,3,5,7-ciclo octatetraeno	10,882	2,457	43
20	ciclobutil tridecil éster, ácido oxálico	11,608	0,541	35
21	(5) - (+) - 3-Metil-1-pentanol	11,976	0,457	53
22	N-cloro-2-fenilaziridina	13,895	19,595	47
23	trans, (2,3-difenilciclopropil) metilfenil sulfóxido	14,315	0,935	27
24	1,1': 5', 1''-terfenil, 5'-fenil	15,687	1,036	80

* Información proporcionada por el cliente, el Laboratorio DPEC no se responsabiliza por esta información

Analistas: FTL
 Elaborado por: VRT

Revisado por:

x Ing. Richard Herrera V.
 RESPONSABLE TÉCNICO



Aprobado por:

Ing. Fernanda Toasa L.
 RESPONSABLE DE CALIDAD

ADVERTENCIA: EL USUARIO DEBE EXIGIR EL ORIGINAL DEL INFORME COMPLETO O SOLICITAR UNA COPIA CONTROLADA DEL MISMO. EL DPEC NO SE RESPONSABILIZA POR LA REPRODUCCIÓN PARCIAL DE ESTE INFORME

Dirección: Enrique Róder s/n y Bolivia

Teléfono: 2904794 / 2544631 ext. 26
 QUITO - ECUADOR

E-mail: finsecretaria.dpec@uce.edu.ec

MC2201-P05-3

Hoja 4 de 6

ANEXO F: ANÁLISIS CROMATOGRÁFICO DEL BIOCOMBUSTIBLE A T2-C2, N#2



UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
DEPARTAMENTO DE PETRÓLEOS, ENERGÍA Y CONTAMINACIÓN



INFORME DE RESULTADOS ÁREA DE PETRÓLEOS

Nota: Los ensayos marcados con (*) no están incluidos en el alcance de acreditación del SAE.

Nota: Los resultados que constan en el presente informe solo están relacionados con la muestra entregada por el cliente al DPEC.

Nota: Los resultados se aplican a la muestra, tal y como se recibió

Observaciones¹: En caso de encontrar la misma molécula en distintos tiempos de retención, esto puede deberse a isómeros que el equipo no es capaz de diferenciar.

Condiciones Ambientales.- Presión: 544,7 %, Temperatura: 17,5 °C

¹ La observación corresponde a adiciones, desviaciones, exclusiones del método.

Analistas: FTL
Elaborado por: VRT

Revisado por:

Ing. Richard Herrera V.
RESPONSABLE TÉCNICO



ADVERTENCIA: EL USUARIO DEBE EXIGIR EL ORIGINAL DEL INFORME COMPLETO O SOLICITAR UNA COPIA CONTROLADA DEL MISMO.
EL DPEC NO SE RESPONSABILIZA POR LA REPRODUCCIÓN PARCIAL DE ESTE INFORME

Dirección: Enrique Ríber s/n y Bolivia

Teléfono: 2904794 / 2544631 ext. 26
QUITO - ECUADOR

E-mail: fiq.secretaria.dpec@uce.edu.ec

MC2201-P05-3

Hoja 5 de 6

ANEXO G: ANÁLISIS CROMATOGRÁFICO DEL BIOCOMBUSTIBLE A T2-C2, N#3

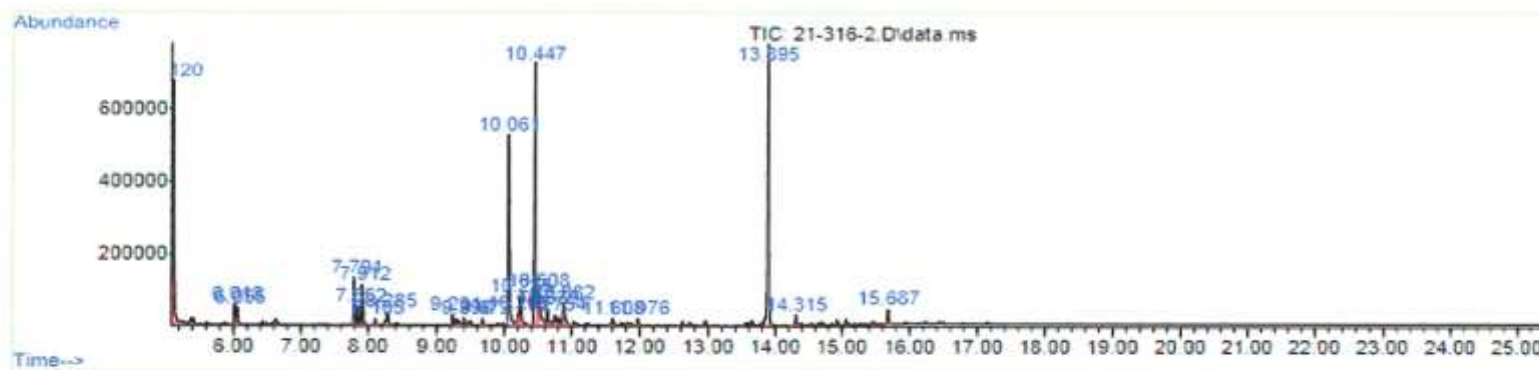


UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
DEPARTAMENTO DE PETRÓLEOS, ENERGÍA Y CONTAMINACIÓN



INFORME DE RESULTADOS
ÁREA DE PETRÓLEOS

ANEXO
CROMATOGRAMA 21-316.1



ADVERTENCIA: EL USUARIO DEBE EXIGIR EL ORIGINAL DEL INFORME COMPLETO O SOLICITAR UNA COPIA CONTROLADA DEL MISMO.
EL DFEC NO SE RESPONSABILIZA POR LA REPRODUCCIÓN PARCIAL O TOTAL DE ESTE INFORME

Dirección: Enrique Ritter s/n y Bolívar

Teléfono: 2904794 / 2544631 ext. 26
QUITO - ECUADOR

E-mail: la.secretaria.dpec@uce.edu.ec

MC2201-P05-3

Hoja 6 de 6



epoch

Dirección de Bibliotecas y
Recursos del Aprendizaje

*UNIDAD DE PROCESOS TÉCNICOS Y ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO Y
DOCUMENTAL*

REVISIÓN DE NORMAS TÉCNICAS, RESUMEN Y BIBLIOGRAFÍA

Fecha de entrega: 25 / 04 / 2022

INFORMACIÓN DEL AUTOR/A (S)

Nombres – Apellidos: *Katherine Lissette Ulpo Carrera*

INFORMACIÓN INSTITUCIONAL

Facultad: *Ciencias*

Carrera: *Ingeniería Ambiental*

Título a optar: *Ingeniera Ambiental*

f. Analista de Biblioteca responsable: *Ing. Leonardo Medina Ñuste MSc.*

LEONARDO
FABIO MEDINA
NUSTE

Firmado digitalmente por LEONARDO
FABIO MEDINA NUSTE
Nombre de reconocimiento (DN): c=EC,
o=BANCO CENTRAL DEL ECUADOR,
ou=ENTIDAD DE CERTIFICACION DE
INFORMACION-ECIBCE, l=QUITO,
serialNumber=0000621485,
cn=LEONARDO FABIO MEDINA NUSTE
Fecha: 2022.04.25 11:13:41 -05'00'



0775-DBRA-UTP-2022