



## **TESIS DOCTORAL**

Estudio integral de los residuos agroindustriales producidos en la refinación del cacao, para la generación de energía.

**Cristian Samuel Laverde Albarracín**

**Programa de Doctorado en Modelización y Experimentación en Ciencia y Tecnología.**

Conformidad del director:

**Dr. Juan Félix González González**

Esta tesis cuenta con la autorización del director y de la Comisión Académica del programa, dichas autorizaciones constan en el Servicio de la Escuela Internacional de Doctorado de la Universidad de Extremadura.

**2024**

## **AGRADECIMIENTOS.**

Ahora que estoy terminando el que quizás sea el trabajo más importante en mi vida profesional, quiero agradecer de manera sincera a quienes han hecho posible que esta meta se cumpla.

De manera especial al Cat. Dr. D. Juan Félix González González quien, con su vocación docente, paciencia y experiencia ha sabido llevar este trabajo a su culminación, sus consejos han sido fundamentales para el éxito del mismo.

A los miembros de la Red de Investigación en Modelos de Sistemas de Gestión de Energía Sostenible, del Programa de Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo CYTED en especial a la Dra. Dña. Silvia Román Suero Coordinadora de la Red y a la Dra. Dña. Beatriz Ledesma Cano, quienes han aportado de manera significativa en este trabajo, con sus consejos y experiencia profesional.

Al Dr. Dn. José Luis Gurría Gascón, quien, desde la Universidad de Extremadura, apoyó para que podamos matricularnos en este Programa de Doctorado, pese a todas las adversidades con los convenios institucionales con una Universidad de Ecuador, se puso al frente hasta que podamos caminar solos en este proceso.

A mis estudiantes, quienes día a día exigen mejores profesores y más conocimientos.

A la Universidad de Extremadura, institución que me abrió las puertas para ayudar a formarme en el maravilloso mundo de la investigación.

Cristian

## DEDICATORIA

Hoy que estoy culminando este trabajo importante, quiero dedicar el mismo a las personas que han hecho posible este logro.

A mi esposa Belén, con su paciencia me ha ayudado a mejorar y ordenar ciertos aspectos de mi vida que debían cambiar para ser mejor persona.

A mi hija Luciana, quien con su ternura, cariño y ocurrencias me ha enseñado lo que es el verdadero e infinito amor.

A mi madre Zonnia, por sus consejos a lo largo de mi vida, su temple y ejemplo de superación personal y profesional siempre han sido mi modelo,

A mis hermanos, Emerson, Gabriela, Diego, Pedro, pese a las diferencias siempre hemos estado apoyando en todo momento.

A mis sobrinos, Nicko, Leo, Paula, Tommy y Sebas, quienes tienen un largo camino que avanzar, pero tendrán mi apoyo en lo que se pueda.

A la memoria del Dr. Samuel Laverde Albán, mi padre que en vida me acompañó y aconsejó en todos los aspectos, incluidos el amor a la investigación.

Cristian.

## **RESUMEN.**

En el Ecuador la exportación del grano seco de cacao representa una fuente importante de ingresos para el país, desde la cosecha hasta el producto final de exportación, esta fruta tiene un proceso que genera varios desperdicios con potencial importante para la industria.

La presente investigación se enfocó en clasificar y evaluar estos residuos agroindustriales del proceso de refinación, para su posible uso como fuente de energía renovable. Se identificaron dos principales recursos aprovechables: el mucílago como biomasa líquida y las cáscaras de la vaina como biomasa sólida.

Inicialmente, se examinaron las propiedades físicoquímicas del biocombustible derivado del mucílago y se evaluó su rendimiento en motores de combustión interna, así como su viabilidad ambiental en comparación con los combustibles convencionales en pruebas de ruta reales.

Posteriormente, se caracterizó la biomasa sólida de las cáscaras de cacao y se analizó su potencial en diversos procesos termoquímicos, incluyendo combustión directa, pirólisis y gasificación. Se destacaron los hallazgos obtenidos en la caracterización de las astillas de la biomasa de cáscara de cacao, incluyendo el análisis inmediato que revela los porcentajes de humedad, volátiles, carbono fijo y cenizas presentes en las astillas. Asimismo, los resultados del análisis elemental y de los poderes caloríficos superior e inferior de las astillas, indicaron el importante potencial energético de esta biomasa.

Se abordó el proceso de pirólisis mostrando la importancia de este proceso termoquímico en la transformación de la biomasa. Se describen los análisis realizados para caracterizar los productos obtenidos después del pirólisis, incluyendo la determinación del rendimiento sólido y los análisis elemental, inmediato y de poder calorífico de los subproductos generados.

Los análisis detallados de los subproductos generados por la gasificación proporcionaron información esencial sobre su composición y rendimiento

energético. Se determinó el rendimiento sólido durante la gasificación, y se realizaron análisis elemental, inmediato y de poder calorífico para comprender mejor el potencial de estos subproductos como fuentes de energía renovable.

**PALABRAS CLAVE.**

Residuos agroindustriales, Biomasa, Biocombustibles, Energía Renovable.

## **ABSTRACT**

In Ecuador, the export of dry cocoa beans represents an important source of income for the country, from the harvest to the final export product, this fruit has a process that generates several wastes with important potential for the industry.

The present research focused on classifying and evaluating these agroindustrial waste from the refining process, for its possible use as a source of renewable energy. Two main usable resources were identified: mucilage as liquid biomass and pod shells as solid biomass.

Initially, the physicochemical properties of the mucilage-derived biofuel were examined and its performance in internal combustion engines was evaluated, as well as its environmental feasibility compared to conventional fuels in real road tests.

Subsequently, the solid biomass of cocoa shells was characterized and its potential in various thermochemical processes was analyzed, including direct combustion, pyrolysis and gasification. The findings obtained in the characterization of the cocoa shell biomass chips were highlighted, including the immediate analysis that reveals the percentages of humidity, volatiles, fixed carbon and ash present in the chips. Likewise, the results of the elemental analysis and the upper and lower calorific values of the chips indicated the important energy potential of this biomass.

The pyrolysis process was addressed, showing the importance of this thermochemical process in the transformation of biomass. The analyzes carried out to characterize the products obtained after pyrolysis are described, including the determination of the solid yield and the elemental, immediate and calorific value analyzes of the by-products generated.

Detailed analyzes of the byproducts generated by gasification provided essential information on their composition and energy performance. Solid yield during gasification was determined, and elemental, immediate, and calorific value

analyzes were performed to better understand the potential of these byproducts as renewable energy sources.

**KEYWORDS.**

Agroindustrial waste, Biomass, Biofuels, Renewable Energy.

## **INDICE.**

### **1.INTRODUCCIÓN**

¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.

1.1 ANTECEDENTES, ENERGÍA Y CAMBIO CLIMÁTICO	10
1.2 GEOPOLÍTICA DE LA ENERGÍA Y ECONOMÍA.	14
1.3 CONTEXTO ENERGÉTICO DE ECUADOR.	17
1.4 CONTEXTO ENERGÉTICO DE ECUADOR.	20
1.5 CONTRIBUCIÓN DE LOS BIOCOMBUSTIBLES Y LA BIOMASA A LA SOLUCIÓN DE LA CRISIS ENERGÉTICA DE ECUADOR.	34
1.6 EXPLORACIÓN DEL POTENCIAL DE BIOMASA Y BIOCOMBUSTIBLES A PARTIR DE RESIDUOS GENERADOS EN EL CULTIVO DEL CACAO.	38
1.7 BIOENERGÍA, CONCEPTOS TÉCNICOS.	46
1.8 BIOENERGÍA A PARTIR DEL BIOETANOL: UN ENFOQUE DETALLADO.	47
1.9 DESARROLLO Y APLICACIONES DEL BIOETANOL EN MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA.	54
1.10 BIOENERGÍA A PARTIR DE PROCESOS TERMOQUÍMICOS DE TRANSFORMACIÓN DE BIOMASA	58
1.10.1 COMBUSTIÓN DIRECTA DE BIOMASA.	60
1.10.2 PIRÓLISIS DE BIOMASA.	66
1.10.3 GASIFICACIÓN DE BIOMASA.	70
<b>2. OBJETIVOS</b>	<b>74</b>
<b>3. MATERIALES Y MÉTODOS.</b>	<b>75</b>
3.1 SELECCIÓN DE LA MATERIA PRIMA USADA PARA LA EXPERIMENTACIÓN.	76
3.2 LOCALIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA.	82

3.3	LOCALIZACIÓN DE LOS ENSAYOS.	82
3.4	DISEÑO DE LA EXPERIMENTACIÓN.	86
3.5	PRODUCCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES A PARTIR DEL MUCÍLAGO: EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO ENERGÉTICO Y AMBIENTAL EN OPERACIONES PRÁCTICAS.	86
3.6	EQUIPOS UTILIZADOS.	98
3.7	VEHÍCULOS EN LOS QUE SE REALIZARON LAS PRUEBAS DEL BIOCOMBUSTIBLE.	106
3.8	CARACTERIZACIÓN DE LA BIOMASA, PROCESOS TERMOQUÍMICOS.	107
<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>119</b>
4.1	RESULTADOS EXPERIMENTACIÓN AL PROCESO BIOQUÍMICO DE LA BIOMASA DE LA PULPA MUCILAGINOSA.	119
4.1.1	RESULTADOS DEL PROCESO DE FERMENTACIÓN.	119
4.1.2	RESULTADOS DEL PROCESO DE DESTILACIÓN	120
4.1.3	RESULTADOS DE CARACTERIZACIÓN DEL BIOCOMBUSTIBLE MEZCLA E5 SEGÚN INEN 2102.	122
4.1.4	RESULTADOS DE LA PRUEBA ESTÁTICA DE EMISIONES EN LOS VEHÍCULOS.	122
4.1.4.1	DATOS RECOLECTADOS DE ANÁLISIS DE EMISIONES DEL VEHÍCULO HYUNDAI I10 SEDÁN 2020.	123
4.1.4.2	DATOS RECOLECTADOS DE ANÁLISIS DE EMISIONES DEL VEHÍCULO CHEVROLET OPTRA SEDÁN 2006.	141
4.2	ANÁLISIS ENERGÉTICO EN OPERACIÓN REAL EN PRUEBAS DE RUTA.	159
4.2.1	POTENCIA EFECTIVA DEL MOTOR DURANTE LA EXPERIMENTACIÓN.	162
4.2.2	CONSUMO DE COMBUSTIBLE.	165



4.2.4	BALANCE EXERGÉTICO REAL.	167
4.3	RESULTADOS A LOS PROCESOS TERMOQUÍMICOS APLICADOS A LA CÁSCARA DE LA VAINA DE CACAO.	169
4.3.1	CARACTERIZACIÓN DE LAS ASTILLAS DE LA BIOMASA.	169
<b>5.</b>	<b>DISCUSIÓN DE RESULTADOS.</b>	<b>184</b>
5.1	DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS DE LA EXPERIMENTACIÓN APLICADA A LA PULPA MUCILAGINOSA.	184
5.2	DISCUSIÓN DE RESULTADOS A LOS PROCESOS TERMOQUÍMICOS APLICADOS A LA CÁSCARA DE LA VAINA DEL CACAO.	251
5.2.1	ANÁLISIS DE LOS PROCESOS DE COMBUSTIÓN DIRECTA.	251
5.2.2	ANÁLISIS DE LA PIRÓLISIS CÁSCARA DE LA VAINA DE CACAO.	273
5.2.3	ANÁLISIS DE LA GASIFICACIÓN CON AIRE DE LA CÁSCARA DE LA VAINA DE CACAO.	280
<b>6.</b>	<b>CONCLUSIONES.</b>	<b>291</b>
<b>7.</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA.</b>	<b>295</b>

## INDICE DE TABLAS

TABLA 1	PROYECTOS PLANIFICADOS EN EL PLAN DE MAESTRO DE ELECTRIFICACIÓN 2017-2028, QUE NO HAN INGRESADO AL SIN AL 2024	29
TABLA 2	PRODUCCIÓN EN TONELADAS MÉTRICAS DE CACAO, CÁSCARA Y MUCÍLAGO ESTIMADOS, VINCULADOS A LA PRODUCCIÓN DE ECUADOR EN EL AÑO 2022	45
TABLA 3	MEZCLAS DE BIOETANOL USADAS EN ALGUNOS PAÍSES	55
TABLA 4	COMPOSICIÓN DE LA PULPA MUCILAGINOSA DEL PROCESO DE REFINACIÓN DEL CACAO	79
TABLA 5	CARACTERÍSTICAS DE LA GASOLINA EXTRA DE ECUADOR	81
TABLA 6	CARACTERÍSTICAS DE LA GASOLINA SÚPER DE ECUADOR	81
TABLA 7	DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE FERMENTACIÓN DEL MUCÍLAGO.	88
TABLA 8	DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE DESTILACIÓN DEL MUCÍLAGO FERMENTADO.	88
TABLA 9	EMISIONES SEGÚN NORMA INEN 2204	92
TABLA 10	LÍMITES MÁXIMOS DE EMISIONES PERMITIDOS.	93
TABLA 11	DATOS QUE ENTREGA EL CANEDGE 1 AL CONECTADO AL PUERTO OBD II	102
TABLA 12	PROTOCOLO DE CALENTAMIENTO TG-MS	114
TABLA 13	NIVELES DE AZÚCAR POR DÍA PROCESO DE FERMENTACIÓN DEL MUCÍLAGO.	120
TABLA 14	PORCENTAJE DE ALCOHOL A LA PRIMERA DESTILACIÓN	121
TABLA 15	PORCENTAJE DE ALCOHOL A LA TEMPERATURA DE 78°C PRIMERA Y SEGUNDA DESTILACIÓN	121

TABLA 16	CARACTERIZACIÓN DEL BIOCOMBUSTIBLE DE MEZCLA E5 SEGÚN INEN 2102.	122
TABLA 17	RESULTADOS DE EMISIONES DE LA PRIMERA PRUEBA A 2500 RPM CON EXTRA.	123
TABLA 18	RESULTADOS DE EMISIONES DE LA PRIMERA PRUEBA A 700 RPM CON EXTRA.	124
TABLA 19	RESULTADOS DE EMISIONES DE LA SEGUNDA PRUEBA A 2500 RPM CON EXTRA.	125
TABLA 20	RESULTADOS DE EMISIONES DE LA SEGUNDA PRUEBA A 700 RPM CON EXTRA.	126
TABLA 21	RESULTADOS DE EMISIONES DE LA TERCERA PRUEBA A 2500 RPM CON EXTRA.	127
TABLA 22	RESULTADOS DE EMISIONES DE LA TERCERA PRUEBA A 700 RPM CON EXTRA.	127
TABLA 23	RESULTADOS DE EMISIONES DE LA PRIMERA PRUEBA A 2500 RPM CON SUPER.	129
TABLA 24	RESULTADOS DE EMISIONES DE LA PRIMERA PRUEBA A 700 RPM CON SUPER.	130
TABLA 25	RESULTADOS DE EMISIONES DE LA SEGUNDA PRUEBA A 2500 RPM CON SUPER.	131
TABLA 26	RESULTADOS DE EMISIONES DE LA SEGUNDA PRUEBA A 700 RPM CON SUPER.	132
TABLA 27	RESULTADOS DE EMISIONES DE LA TERCERA PRUEBA A 2500 RPM CON SUPER.	133
TABLA 28	RESULTADOS DE EMISIONES DE LA TERCERA PRUEBA A 700 RPM CON SUPER.	134
TABLA 29	RESULTADOS DE EMISIONES DE LA PRIMERA PRUEBA A 2500 RPM CON BIOCOMBUSTIBLE.	135
TABLA 30	RESULTADOS DE EMISIONES DE LA PRIMERA PRUEBA A 700 RPM CON BIOCOMBUSTIBLE.	136

TABLA 31	RESULTADOS DE EMISIONES DE LA SEGUNDA PRUEBA A 2500 RPM CON BIOCOMBUSTIBLE.	137
TABLA 32	RESULTADOS DE EMISIONES DE LA SEGUNDA PRUEBA A 700 RPM CON BIOCOMBUSTIBLE.	138
TABLA 33	RESULTADOS DE EMISIONES DE LA TERCERA PRUEBA A 2500 RPM CON BIOCOMBUSTIBLE.	139
TABLA 34	RESULTADOS DE EMISIONES DE LA TERCERA PRUEBA A 700 RPM CON BIOCOMBUSTIBLE.	140
TABLA 35	RESULTADOS DE EMISIONES DE LA PRIMERA PRUEBA A 2500 RPM CON EXTRA, CHEVROLET OPTRA.	141
TABLA 36	RESULTADOS DE EMISIONES DE LA PRIMERA PRUEBA A 700 RPM CON EXTRA, CHEVROLET OPTRA.	142
TABLA 37	RESULTADOS DE EMISIONES DE LA SEGUNDA PRUEBA A 2500 RPM CON EXTRA, CHEVROLET OPTRA.	143
TABLA 38	RESULTADOS DE EMISIONES DE LA SEGUNDA PRUEBA A 700 RPM CON EXTRA, CHEVROLET OPTRA.	144
TABLA 39	RESULTADOS DE EMISIONES DE LA TERCERA PRUEBA A 2500 RPM CON EXTRA, CHEVROLET OPTRA.	145
TABLA 40	RESULTADOS DE EMISIONES DE LA TERCERA PRUEBA A 700 RPM CON EXTRA, CHEVROLET OPTRA.	146
TABLA 41	RESULTADOS DE EMISIONES DE LA PRIMERA PRUEBA A 2500 RPM CON SUPER, CHEVROLET OPTRA.	147
TABLA 42	RESULTADOS DE EMISIONES DE LA PRIMERA PRUEBA A 700 RPM CON SUPER, CHEVROLET OPTRA.	148
TABLA 43	RESULTADOS DE EMISIONES DE LA SEGUNDA PRUEBA A 2500 RPM CON SUPER, CHEVROLET OPTRA	149
TABLA 44	RESULTADOS DE EMISIONES DE LA SEGUNDA PRUEBA A 700 RPM CON SUPER, CHEVROLET OPTRA.	150
TABLA 45	RESULTADOS DE EMISIONES DE LA TERCERA PRUEBA A 2500 RPM CON SUPER, CHEVROLET OPTRA.	151

TABLA 46	RESULTADOS DE EMISIONES DE LA TERCERA PRUEBA A 700 RPM CON SUPER, CHEVROLET OPTRA.	152
TABLA 47	RESULTADOS DE EMISIONES DE LA PRIMERA PRUEBA A 2500 RPM CON BIOCOMBUSTIBLE, CHEVROLET OPTRA.	153
TABLA 48	RESULTADOS DE EMISIONES DE LA PRIMERA PRUEBA A 700 RPM CON BIOCOMBUSTIBLE, CHEVROLET OPTRA.	154
TABLA 49	RESULTADOS DE EMISIONES DE LA SEGUNDA PRUEBA A 2500 RPM CON BIOCOMBUSTIBLE, CHEVROLET OPTRA.	155
TABLA 50	RESULTADOS DE EMISIONES DE LA SEGUNDA PRUEBA A 700 RPM CON BIOCOMBUSTIBLE, CHEVROLET OPTRA.	156
TABLA 51	RESULTADOS DE EMISIONES DE LA SEGUNDA PRUEBA A 2500 RPM CON BIOCOMBUSTIBLE, CHEVROLET OPTRA.	157
TABLA 52	RESULTADOS DE EMISIONES DE LA SEGUNDA PRUEBA A 700 RPM CON BIOCOMBUSTIBLE, CHEVROLET OPTRA.	158
TABLA 53	HORARIOS Y FECHAS DE LAS PRUEBAS DE RUTAS REALIZADAS	159
TABLA 54	VALORES MÁXIMOS PARA LAS VARIABLES REVOLUCIÓN, TORQUE Y POTENCIA DE CADA COMBUSTIBLE PROBADO DURANTE LA PRIMERA SERIE DE EXPERIMENTOS (OBTENIDOS CON EL CANEDGE).	164
TABLA 55	VALORES MÁXIMOS PARA LAS VARIABLES REVOLUCIÓN, TORQUE Y POTENCIA DE CADA COMBUSTIBLE PROBADO DURANTE LA SEGUNDA SERIE DE EXPERIMENTOS (OBTENIDOS CON EL CANEDGE).	164
TABLA 56	VALORES MÁXIMOS TABULADOS DE POTENCIA, FLUJO Y CONSUMO ESPECÍFICO PARA CADA COMBUSTIBLE EMPLEADO EN LA PRIMERA EXPERIMENTACIÓN (OBTENIDOS CON EL CANEDGE)..	166
TABLA 57	VALORES MÁXIMOS TABULADOS DE POTENCIA, FLUJO Y CONSUMO ESPECÍFICO PARA CADA COMBUSTIBLE EMPLEADO EN LA SEGUNDA EXPERIMENTACIÓN (OBTENIDOS CON EL CANEDGE).	166
TABLA 58	VALORES PROMEDIOS TABULADOS PARA EL CÁLCULO DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA.	167
TABLA 59	VALORES PROMEDIOS TABULADOS PARA EL CÁLCULO DE LA EFICIENCIA EXERGÉTICA.	168

TABLA 60	VALORES DE FLUJO DE ENERGÍA DE CADA COMBUSTIBLE EXPERIMENTADO	169
TABLA 61	RESULTADOS DEL ANÁLISIS INMEDIATO DE LAS ASTILLAS PROVENIENTES DE LA CÁSCARA DE LA VAINA DE CACAO	169
TABLA 62	RESULTADOS DEL ANÁLISIS ELEMENTAL DE LAS ASTILLAS PROVENIENTES DE LA CÁSCARA DE LA VAINA DE CACAO	169
TABLA 63	PODERES CALORÍFICOS SUPERIOR E INFERIOR AL 0% DE HUMEDAD	169
TABLA 64	PODERES CALORÍFICOS SUPERIOR E INFERIOR HUMEDAD RECIBIDA.	170
TABLA 65	HALÓGENOS DE LAS ASTILLAS DE LA CÁSCARA DE LA VAINA DE CACO.	170
TABLA 66	COMPOSICIÓN DE LAS CENIZAS DE LAS ASTILLAS DE LA CÁSCARA DE LA VAINA DE CACO.	170
TABLA 67	TEMPERATURA DE FUSIÓN DE LAS CENIZAS DE LAS ASTILLA DE LA CÁSCARA DE LA VAINA DE CACAO.	170
TABLA 68	FORMULACIÓN A ÓXIDOS MÁS ESTABLES DE LAS ASTILLAS DE LA CÁSCARA DE LA VAINA DE CACAO.	170
TABLA 69	TABLA DE FORMULACIÓN A ELEMENTOS DE LAS ASTILLAS DE LA CÁSCARA DE LA VAINA DE CACAO.	171
TABLA 70	PORCENTAJE DE LOS SUBPRODUCTOS DE LA PIRÓLISIS A 500°C	172
TABLA 71	MOLES POR LITRO DE LOS SUBPRODUCTOS DE LA PIRÓLISIS A 500°C	172
TABLA 72	MOLES DE LOS SUBPRODUCTOS DE LA PIRÓLISIS A 500°C	172
TABLA 73	MOLES ACUMULADOS DE LOS SUBPRODUCTOS DE LA PIRÓLISIS A 500°C	173
TABLA 74	FRACCIONES MOLARES DE LOS SUBPRODUCTOS DE LA PIRÓLISIS A 500°C	173
TABLA 75	PODER CALORÍFICO DE LOS SUBPRODUCTOS DE LA PIRÓLISIS A 500°C	173

TABLA 76	POTENCIA DE LA PIRÓLISIS A 500°C	173
TABLA 77	PORCENTAJE DE LOS SUBPRODUCTOS DE LA PIRÓLISIS A 600°C	174
TABLA 78	MOLES POR LITRO DE LOS SUBPRODUCTOS DE LA PIRÓLISIS A 600°C	174
TABLA 79	MOLES DE LOS SUBPRODUCTOS DE LA PIRÓLISIS A 600°C	174
TABLA 80	MOLES ACUMULADOS DE LOS SUBPRODUCTOS DE LA PIRÓLISIS A 600°C	175
TABLA 81	FRACCIONES MOLARES DE LOS SUBPRODUCTOS DE LA PIRÓLISIS A 600°C	175
TABLA 82	PODER CALORÍFICO DE LOS SUBPRODUCTOS DE LA PIRÓLISIS A 600°C	175
TABLA 83	POTENCIA DE LA PIRÓLISIS A 600°C	175
TABLA 84	PORCENTAJE DE LOS SUBPRODUCTOS DE LA PIRÓLISIS A 700°C	176
TABLA 85	MOLES POR LITRO DE LOS SUBPRODUCTOS DE LA PIRÓLISIS A 700°C	176
TABLA 86	MOLES DE LOS SUBPRODUCTOS DE LA PIRÓLISIS A 700°	176
TABLA 87	MOLES ACUMULADOS DE LOS SUBPRODUCTOS DE LA PIRÓLISIS A 700°C	177
TABLA 88	FRACCIONES MOLARES DE LOS SUBPRODUCTOS DE LA PIRÓLISIS A 700°C	177
TABLA 89	PODER CALORÍFICO DE LOS SUBPRODUCTOS DE LA PIRÓLISIS A 700°C	177
TABLA 90	POTENCIA DE LA PIRÓLISIS A 700°C	177
TABLA 91	PORCENTAJE DE LOS SUBPRODUCTOS DE LA GASIFICACIÓN A 500°C	178
TABLA 92	MOLES POR LITRO DE LOS SUBPRODUCTOS DE LA GASIFICACIÓN A 500°C	178

TABLA 93	MOLES POR LITRO DE LAS RELACIONES DE LOS SUBPRODUCTOS DE LA GASIFICACIÓN A 500°C	178
TABLA 94	MOLES DE LOS SUBPRODUCTOS DE LA GASIFICACIÓN A 500°C	179
TABLA 95	MOLES ACUMULADOS DE LOS SUBPRODUCTOS DE LA GASIFICACIÓN A 500°C	179
TABLA 96	FRACCIONES MOLARES DE LOS SUBPRODUCTOS DE LA GASIFICACIÓN A 500°C	179
TABLA 97	PODER CALORÍFICO DE LOS SUBPRODUCTOS DE LA GASIFICACIÓN A 500°C	179
TABLA 98	POTENCIA DE LA GASIFICACIÓN A 500°C	179
TABLA 99	PORCENTAJE DE LOS SUBPRODUCTOS DE LA GASIFICACIÓN A 600°C	180
TABLA 100	MOLES POR LITRO DE LOS SUBPRODUCTOS DE LA GASIFICACIÓN A 500°C	180
TABLA 101	MOLES POR LITRO DE LAS RELACIONES DE LOS SUBPRODUCTOS DE LA GASIFICACIÓN A 600°C	180
TABLA 102	MOLES DE LOS SUBPRODUCTOS DE LA GASIFICACIÓN A 600°C	181
TABLA 103	MOLES ACUMULADOS DE LOS SUBPRODUCTOS DE LA GASIFICACIÓN A 600°C	181
TABLA 104	FRACCIONES MOLARES DE LOS SUBPRODUCTOS DE LA GASIFICACIÓN A 600°C	181
TABLA 105	PODER CALORÍFICO DE LOS SUBPRODUCTOS DE LA GASIFICACIÓN A 600°C	181
TABLA 106	POTENCIA DE LA GASIFICACIÓN A 600°C	181
TABLA 107	PORCENTAJE DE LOS SUBPRODUCTOS DE LA GASIFICACIÓN A 700°C	182
TABLA 108	MOLES POR LITRO DE LOS SUBPRODUCTOS DE LA GASIFICACIÓN A 700°C	182

TABLA 109 MOLES POR LITRO DE LAS RELACIONES DE LOS SUBPRODUCTOS DE LA GASIFICACIÓN A 700°C	182
TABLA 110 MOLES DE LOS SUBPRODUCTOS DE LA GASIFICACIÓN A 700°C	183
TABLA 111 MOLES ACUMULADOS DE LOS SUBPRODUCTOS DE LA GASIFICACIÓN A 700°C	183
TABLA 112 FRACCIONES MOLARES DE LOS SUBPRODUCTOS DE LA GASIFICACIÓN A 700°C	183
TABLA 113 PODER CALORÍFICO DE LOS SUBPRODUCTOS DE LA GASIFICACIÓN A 700°C	183
TABLA 114 POTENCIA DE LA GASIFICACIÓN A 500°C	183
TABLA 115 COMPARACIÓN DE HUMEDAD Y % DE AZÚCARES DEL MUCÍLAGO DEL CACAO CON OTRA BIOMASA	185
TABLA 116 COMPARACIÓN DE LOS COMBUSTIBLES COMERCIALES EN ECUADOR CON LA MEZCLA E5 REALIZADA CON BIOETANOL PRODUCTO DEL MUCÍLAGO DEL CACAO.	191
TABLA 117 COMPARACIÓN DE CARACTERÍSTICAS DE MEZCLAS E5	194
TABLA 118 COMPARACIÓN DE TEMPERATURAS DE EVAPORACIÓN DE MEZCLAS E5 Y E6	194
TABLA 119 RESULTADO DE PROMEDIO DE EMISIONES 700 RPM DE CO HYUNDAI I10 2021	196
TABLA 120 RESULTADO DE PROMEDIO DE EMISIONES 700 RPM DE CO CHEVROLET OPTRA 2006	198
TABLA 121 RESULTADO DE PROMEDIO DE EMISIONES 2500 RPM DE CO HYUNDAI I10 2021	200
TABLA 122 RESULTADO DE PROMEDIO DE EMISIONES 2500 RPM DE CO CHEVROLET OPTRA 2006	202
TABLA 123 RESULTADO DE PROMEDIO DE EMISIONES 700 RPM DE HC HYUNDAI I10 2021	205
TABLA 124 RESULTADO DE PROMEDIO DE EMISIONES 700 RPM DE CHEVROLET OPTRA 2006	207

TABLA 125	RESULTADO DE PROMEDIO DE EMISIONES 2500 RPM DE HC HYUNDAI I10 2021	209
TABLA 126	RESULTADO DE PROMEDIO DE EMISIONES 2500 RPM DE CHEVROLET OPTRA 2006	211
TABLA 127	LAMBDA A 700 RPM HYUNDAI I10 2021	214
TABLA 128	LAMBDA A 700 RPM CHEVROLET OPTRA 2006	216
TABLA 129	LAMBDA A 2500 RPM HYUNDAI I 10 2021	218
TABLA 130	LAMBDA A 2500 RPM CHEVROLET OPTRA 2006	220
TABLA 131	EMISIONES DE CO <sub>2</sub> A 700 RPM HYUNDAI I10 2021	223
TABLA 132	EMISIONES CO <sub>2</sub> A 700 RPM CHEVROLET OPTRA 2006	225
TABLA 133	EMISIONES DE CO <sub>2</sub> A 2500 RPM HYUNDAI I10 2021	227
TABLA 134	EMISIONES DE CO <sub>2</sub> A 2500 RPM CHEVROLET OPTRA 2006	229
TABLA 135	O <sub>2</sub> A 700 RPM HYUNDAI I10 2021	232
TABLA 136	O <sub>2</sub> A 700 RPM CHEVROLET OPTRA 2006	234
TABLA 137	O <sub>2</sub> A 2500 RPM HYUNDAI I10 2021	236
TABLA 138	O <sub>2</sub> A 2500 RPM CHEVROLET OPTRA 2006	238
TABLA 139	CONTRASTE DE RESULTADOS DEL ANÁLISIS QUÍMICO DE CENIZAS ENTRE LA OPERACIÓN REAL DE UNA CENTRAL DE BIOMASA Y LA BIOMASA DE LA CÁSCARA DEL CACAO.	260
TABLA 140	CONTRASTE DE RESULTADOS DE LA TEMPERATURA DE FUSIÓN DE LAS CENIZAS COMPARADA CON LA BIOMASA DE LA EXPERIMENTACIÓN	261
TABLA 141	INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA DE PIRÓLISIS SOBRE EL RENDIMIENTO DE LAS FRACCIONES, ANÁLISIS INMEDIATO Y PCS	273
TABLA 142	EFFECTO DE LA TEMPERATURA SOBRE LAS FRACCIONES MOLARES DE LOS GASES GENERADOS, PCS, CAUDAL DE GAS Y POTENCIA.	280

TABLA 143 EFECTO DE LA TEMPERATURA DE GASIFICACIÓN SOBRE EL RENDIMIENTO, ANÁLISIS INMEDIATO Y PCS SECO Y EN BASE HÚMEDA DEL CARBÓN OBTENIDO. 280

TABLA 144 EFECTO DE LA TEMPERATURA SOBRE LAS FRACCIONES MOLARES DE LOS GASES GENERADOS, PCS, CAUDAL DE GAS Y POTENCIA 287

## INDICE DE FIGURAS

FIGURA 1	ENERGÍA MUNDIAL CONSUMIDA POR RECURSO PRIMARIO	11
FIGURA 2	EMISIONES ANUALES DE CO2 EMITIDOS POR LOS COMBUSTIBLES FÓSILES Y LA INDUSTRIA 1960-2022	12
FIGURA 3	REGISTRO DE TEMPERATURAS ANORMALES EN EL PLANETA 1960-2023	13
FIGURA 4	PRECIOS DEL PETRÓLEO EN USD POR METRO CÚBICO	14
FIGURA 5	RESERVAS MUNDIALES DE PETRÓLEO VS. AMÉRICA LATINA	15
FIGURA 6	CAPACIDAD INSTALADA PARA GENERACIÓN ELÉCTRICA EN AMÉRICA LATINA 2022	20
FIGURA 7	BALANCE ENERGÉTICO RESUMIDO DE ECUADOR EN 2022	22
FIGURA 8	BALANZA COMERCIAL DE ECUADOR COMPARATIVA ENERO-MAYO DEL 2021 AL 2023	23
FIGURA 9	OFERTA DE DERIVADOS DE PETRÓLEO EN MILLONES DE DÓLARES POR TRIMESTRE DESDE EL 2020 AL 2022	23
FIGURA 10	SUBSIDIOS A LOS COMBUSTIBLES 2023, PRESUPUESTO GENERAL DEL ESTADO 2023	24
FIGURA 11	PROYECCIÓN DE LA DEMANDA DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN BORNES DE GENERACIÓN 2018-2027	27
FIGURA 12	PRIORIDAD DE ENTRADA DE PROYECTOS EN FUNCIÓN DE LA CURVA DE DEMANDA PROYECTADA 2018-2027	28
FIGURA 13	PRODUCCIÓN DE BIOMASA Y BIOCOMBUSTIBLES EN ECUADOR PERIODO 2006-2022	31
FIGURA 14	PRODUCCIÓN MUNDIAL DE BIOCOMBUSTIBLES 2012-2022	35
FIGURA 15	PLANTACIÓN DE CACAO, UBICACIÓN: PAÍS ECUADOR, PROVINCIA: LOS RÍOS, CANTÓN QUEVEDO.	39
FIGURA 16	MAZORCA DE CACAO, INDICANDO LOS COMPONENTES	41

FIGURA 17	AGRICULTORES DE LA ZONA SEPARANDO LA PULPA DE LA CÁSCARA EN LA POSTCOSECHA DE CACAO.	42
FIGURA 18	PULPA DE CACAO LISTA PARA EL TRASLADO A LA FERMENTACIÓN.	42
FIGURA 19	MUCÍLAGO, SUBPRODUCTO OBTENIDO EN LA FERMENTACIÓN DE LA PULPA.	43
FIGURA 20	AGRICULTOR DE LA ZONA EN EL PROCESO DE SECADO SOLAR.	44
FIGURA 21	BIOENERGÍA, A PARTIR DE BIOMASA, DIFERENTES PROCESOS	47
FIGURA 22	FABRICACIÓN DE BIOETANOL DE PRIMERA GENERACIÓN A PARTIR DE MAÍZ	50
FIGURA 23	SECUENCIA DE FASES PARA LA OBTENCIÓN DE BIOETANOL DE PRIMERA Y SEGUNDA GENERACIÓN	50
FIGURA 24	MODELO DE UNA UNIDAD DE DESTILACIÓN SIMPLE, EMPLEADO EN LA SEPARACIÓN DE BIOCOMBUSTIBLE LÍQUIDO DE LA ALIMENTACIÓN LÍQUIDA	53
FIGURA 25	PROCESOS TERMOQUÍMICOS DE TRANSFORMACIÓN DE BIOMASA	59
FIGURA 26	CICLO RANKINE BÁSICO PARA GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD POR MEDIO DE COMBUSTIÓN DIRECTA DE BIOMASA	61
FIGURA 27	CURVA TÍPICA DE ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO (FRACCIÓN DE PESO Y TEMPERATURA) PARA ANÁLISIS PROXIMAL DE UNA MUESTRA SÓLIDA DE BIOMASA	64
FIGURA 28	MUESTRAS DE PELLETS PRODUCIDOS A: PELLETS DE ESPATAS DE MAÍZ, B: PELLETS DE MADERA DE MOVINGUI	65
FIGURA 29	ESQUEMA DEL PROCESO DE PIRÓLISIS	67
FIGURA 30	ESQUEMA DE UN GASIFICADOR DE CORRIENTE ASCENDENTE	72
FIGURA 31	MAZORCAS DE CACAO RECIÉN CULTIVADAS.	76

FIGURA 32	MÉTODO DE PRODUCCIÓN DE GRANOS SECOS DE CACAO	77
FIGURA 33	FERMENTACIÓN AERÓBICA DE LOS GRANOS DE CACAO, PASO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL MUCÍLAGO	78
FIGURA 34	CÁSCARAS DE CACO, DESECHOS GENERADOS POR LA REFINACIÓN DEL CACAO.	80
FIGURA 35	UBICACIÓN DE LA FINCA EXPERIMENTAL “LA MARÍA” QUEVEDO-ECUADOR	83
FIGURA 36	UBICACIÓN “TALLERES UNIDOS”	84
FIGURA 37	RUTA ALEATORIA PARA REALIZAR LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES DEL BIOCOMBUSTIBLE BAJO CONDICIONES REALES DE OPERACIÓN	85
FIGURA 38	UBICACIÓN LABORATORIO DE CARACTERIZACIÓN DE RESIDUOS BIOMÁSICOS, UNIVERSIDAD DE EXTREMADURA, ESPAÑA.	86
FIGURA 39	EJEMPLO DE UN CICLO DE CONDUCCIÓN USADO PARA EXPERIMENTACIÓN	94
FIGURA 40	REACTOR DEL LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS.	99
FIGURA 41	COLUMNA DE DESTILACIÓN LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS.	100
FIGURA 42	ESTACIÓN METEREOLÓGICA SKYWATCH GEOS 11	101
FIGURA 43	PUNTO DE CONEXIÓN DEL CANEDGE 1 EN EL PUERTO OBD II DEL VEHÍCULO PARA LA EXPERIMENTACIÓN	102
FIGURA 44	EQUIPO CANEDGE 1	103
FIGURA 45	EQUIPO CANMOD GPS	104
FIGURA 46	EQUIPO GASBOX, UTILIZADO PARA LAS PRUEBAS ESTÁTICAS EN LOS VEHÍCULOS	105
FIGURA 47	RESUMEN DEL PROCESO DE EXTRACCIÓN DE BIOETANOL Y SU EXPERIMENTACIÓN EN CONDICIONES REALES DE FUNCIONAMIENTO	105

FIGURA 48 BOMBA CALORIMÉTRICA (PARR 1351).	110
FIGURA 49 ESQUEMA DE LA BOMBA CALORIMÉTRICA	111
FIGURA 50 TERMOBALANZA ACOPLADA AL ESPECTRÓMETRO DE MASAS PARA EL ENSAYO TG-MS	115
FIGURA 51 INSTALACIÓN EXPERIMENTAL PARA PIRÓLISIS Y GASIFICACIÓN	116
FIGURA 52 MEDICIÓN DE UNA MUESTRA DE ALCOHOL DE 86 GRADOS CON EL ALCOHOLÍMETRO DE GAY LUSSAC	119
FIGURA 53 PROCESO DE FERMENTADO Y DESTILADO EN EL LABORATORIO	121
FIGURA 54 CICLO DE CONDUCCIÓN TRANSITORIO (SOFTWARE ASAMMDF) EN LA EXPERIMENTACIÓN UTILIZANDO GASOLINA SUPER.	160
FIGURA 55 CICLO DE CONDUCCIÓN TRANSITORIO (SOFTWARE ASAMMDF) EN LA EXPERIMENTACIÓN UTILIZANDO BIOCOMBUSTIBLE.	161
FIGURA 56 CICLO DE CONDUCCIÓN TRANSITORIO (SOFTWARE ASAMMDF) EN LA EXPERIMENTACIÓN UTILIZANDO GASOLINA EXTRA.	162
FIGURA 57 RPM EN FUNCIÓN DEL TIEMPO (SOFTWARE ASAMMDF) OBTENIDA DURANTE LA EXPERIMENTACIÓN CON BIOCOMBUSTIBLE.	163
FIGURA 58 TORQUE EN FUNCIÓN DEL TIEMPO (SOFTWARE ASAMMDF) OBTENIDA DURANTE LA EXPERIMENTACIÓN CON BIOCOMBUSTIBLE.	163
FIGURA 59 CONCENTRACIÓN DE AZÚCARES POR DÍA PROCESO DE FERMENTACIÓN.	186
FIGURA 60 RELACIÓN LINEAL ENTRE GRADOS BRUX MEDIDOS Y DÍAS DE FERMENTACIÓN DEL MUCÍLAGO	187
FIGURA 61 VARIACIÓN DEL PORCENTAJE DE ALCOHOL EN LA SOLUCIÓN FERMENTADA EN FUNCIÓN DE DIFERENTES TEMPERATURAS DE DESTILACIÓN.	188
FIGURA 62 PROMEDIO DE EMISIONES DE CO 700 RPM HYUNDAI I10 2021	197
FIGURA 63 EMISIONES 700 RPM DE CO CHEVROLET OPTRA 2006	199

FIGURA 64	PROMEDIO DE EMISIONES DE CO 2500 RPM HYUNDAI I10 2021	201
FIGURA 65	EMISIONES 2500 RPM DE CO CHEVROLET OPTRA 2006	203
FIGURA 66	EMISIONES 700 RPM DE HC HYUNDAI I10 2021	206
FIGURA 67	EMISIONES 700 RPM DE HC CHEVROLET OPTRA 2006	208
FIGURA 68	EMISIONES 2500 RPM DE HC HYUNDAI I10 2021	210
FIGURA 69	EMISIONES 2500 RPM DE HC CHEVROLET OPTRA 2006	212
FIGURA 70	LAMBDA A 700 RPM HYUNDAI I10 2021	215
FIGURA 71	LAMBDA A 700 RPM CHEVROLET OPTRA 2006	217
FIGURA 72	LAMBDA A 2500 RPM HYUNDAI I 10 2021	219
FIGURA 73	LAMBDA A 2500 RPM CHEVROLET OPTRA 2006	221
FIGURA 74	CO <sub>2</sub> A 700 RPM HYUNDAI I10 2021	224
FIGURA 75	EMISIONES DE CO <sub>2</sub> A 700 RPM CHEVROLET OPTRA 2006	226
FIGURA 76	EMISIONES DE CO <sub>2</sub> A 2500 RPM HYUNDAI I10 2021	228
FIGURA 77	EMISIONES DE CO <sub>2</sub> A 2500 RPM CHEVROLET OPTRA 2006	230
FIGURA 78	O <sub>2</sub> A 700 RPM HYUNDAI I10 2021	233
FIGURA 79	O <sub>2</sub> A 700 RPM CHEVROLET OPTRA 2006	235
FIGURA 80	O <sub>2</sub> A 2500 RPM HYUNDAI I10 2021	237
FIGURA 81	O <sub>2</sub> A 2500 RPM CHEVROLET OPTRA 2006.	239
FIGURA 82	REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LA CURVA DE POTENCIA GENERADA POR LOS DIFERENTES COMBUSTIBLES EVALUADOS DURANTE LA PRIMERA PRUEBA.	242

FIGURA 83 REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LA CURVA DE POTENCIA GENERADA POR LOS DIFERENTES COMBUSTIBLES EVALUADOS DURANTE LA SEGUNDA PRUEBA.	243
FIGURA 84 RELACIÓN ENTRE EL CONSUMO ESPECÍFICO DE COMBUSTIBLE Y LA POTENCIA PARA CADA TIPO DE COMBUSTIBLE DURANTE LA PRIMERA PRUEBA.	244
FIGURA 85 RELACIÓN ENTRE EL CONSUMO ESPECÍFICO DE COMBUSTIBLE Y LA POTENCIA PARA CADA TIPO DE COMBUSTIBLE DURANTE LA SEGUNDA PRUEBA	245
FIGURA 86 DIAGRAMA COMPARATIVO DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA PARA CADA COMBUSTIBLE EMPLEADO EN LA INVESTIGACIÓN.	246
FIGURA 87 DIAGRAMA COMPARATIVO DE LA EFICIENCIA EXERGÉTICA PARA CADA COMBUSTIBLE EMPLEADO EN LA INVESTIGACIÓN.	247
FIGURA 88 DIAGRAMA DE SANKEY PARA LA GASOLINA SUPER	249
FIGURA 89 DIAGRAMA DE SANKEY PARA LA GASOLINA EXTRA.	249
FIGURA 90 DIAGRAMA DE SANKEY PARA EL BICOMBUSTIBLE E5.	249
FIGURA 91 CÁSCARAS DE VAINA DE CACAO, SOMETIDAS A SECADO NATURAL Y ANALIZADAS EN EL LABORATORIO.	255
FIGURA 92 CURVA TG-DTG BIOMASA DE CACAO EN ATMOSFERA INERTE.	265
FIGURA 93 CURVAS DE ESPECTROMETRÍA DE MASAS DEL EXPERIMENTO	265
FIGURA 94 CURVA TG-DTG BIOMASA DE CÁSCARA DE PALMISTE.	268
FIGURA 95 ANÁLISIS DE PRODUCTOS GASEOSOS DERIVADOS DEL ENSAYO EN ATMOSFERA INERTE	270
FIGURA 96 CURVA TG-DTG BIOMASA DE CACAO EN ATMOSFERA OXIDANTE.	270
FIGURA 97 CURVAS DE ESPECTROMETRÍA DE MASAS DEL EXPERIMENTO	271
FIGURA 98 ANÁLISIS DE PRODUCTOS GASEOSOS DERIVADOS DEL ENSAYO EN ATMOSFERA INERTE	272

FIGURA 99 EFECTO DE LA TEMPERATURA SOBRE LA EVOLUCIÓN DE LA [H <sub>2</sub> ] CON EL TIEMPO.	275
FIGURA 100 EFECTO DE LA TEMPERATURA SOBRE LA EVOLUCIÓN DE LA [CO] CON EL TIEMPO.	275
FIGURA 101 EFECTO DE LA TEMPERATURA SOBRE LA EVOLUCIÓN DE LA [CH <sub>4</sub> ] CON EL TIEMPO.	276
FIGURA 102 EFECTO DE LA TEMPERATURA SOBRE LA EVOLUCIÓN DE LA [CO <sub>2</sub> ] CON EL TIEMPO.	277
FIGURA 103 EFECTO DE LA TEMPERATURA SOBRE LA EVOLUCIÓN DE LOS MOLES ACUMULADOS DE H <sub>2</sub> CON EL TIEMPO.	278
FIGURA 104 EFECTO DE LA TEMPERATURA SOBRE LA EVOLUCIÓN DE LOS MOLES ACUMULADOS DE CO CON EL TIEMPO.	278
FIGURA 105 EFECTO DE LA TEMPERATURA SOBRE LA EVOLUCIÓN DE LOS MOLES ACUMULADOS DE CH <sub>4</sub> CON EL TIEMPO.	279
FIGURA 106 EFECTO DE LA TEMPERATURA SOBRE LA EVOLUCIÓN DE LOS MOLES ACUMULADOS DE CO <sub>2</sub> CON EL TIEMPO.	279
FIGURA 107 EFECTO DE LA TEMPERATURA SOBRE LA EVOLUCIÓN DE LA [H <sub>2</sub> ] CON EL TIEMPO.	281
FIGURA 108 EFECTO DE LA TEMPERATURA SOBRE LA EVOLUCIÓN DE LA [CO] CON EL TIEMPO.	282
FIGURA 109 EFECTO DE LA TEMPERATURA SOBRE LA EVOLUCIÓN DE LA [CH <sub>4</sub> ] CON EL TIEMPO.	282
FIGURA 110 EFECTO DE LA TEMPERATURA SOBRE LA EVOLUCIÓN DE LA [CO <sub>2</sub> ] CON EL TIEMPO	283
FIGURA 111 EFECTO DE LA TEMPERATURA SOBRE LA EVOLUCIÓN DE LOS MOLES ACUMULADOS DE H <sub>2</sub> CON EL TIEMPO.	284
FIGURA 112 EFECTO DE LA TEMPERATURA SOBRE LA EVOLUCIÓN DE LOS MOLES ACUMULADOS DE CO CON EL TIEMPO.	284
FIGURA 113 EFECTO DE LA TEMPERATURA SOBRE LA EVOLUCIÓN DE LOS MOLES ACUMULADOS DE CH <sub>4</sub> CON EL TIEMPO.	285

FIGURA 114 EFECTO DE LA TEMPERATURA SOBRE LA EVOLUCIÓN DE LOS MOLES ACUMULADOS DE CO<sub>2</sub> CON EL TIEMPO. 285

FIGURA 115 EFECTO DE LA TEMPERATURA SOBRE EL RATIO CO/CO<sub>2</sub> CON EL TIEMPO. 288

FIGURA 116 EFECTO DE LA TEMPERATURA SOBRE EL RATIO H<sub>2</sub>/CO CON EL TIEMPO. 289

FIGURA 117 EFECTO DE LA TEMPERATURA SOBRE EL RATIO H<sub>2</sub>CO<sub>2</sub> CON EL TIEMPO. 289

FIGURA 118 EFECTO DE LA TEMPERATURA SOBRE LA EVOLUCIÓN DE LOS MOLES ACUMULADOS DE H<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> CON EL TIEMPO. 290

## **1. INTRODUCCION**

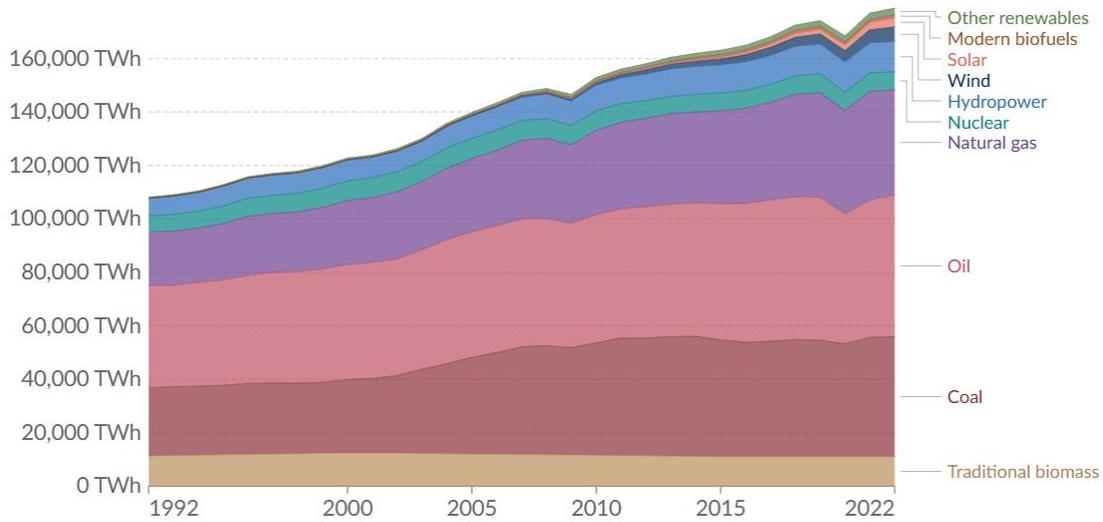
### **1.1 Antecedentes, energía y cambio climático.**

El progreso tecnológico de la humanidad ha estado estrechamente vinculado a un incremento sustancial en el consumo de energía en sus diversas modalidades, destacando particularmente en dos vectores fundamentales: la conversión de energía en electricidad y la utilización de energía en el sector del transporte. Este ascenso en la demanda energética ha suscitado una mayor exploración de diversas fuentes de energía primaria. A través de diversas tecnologías de conversión energética, se logra la transformación de estas fuentes en energía utilizable, con especial énfasis en la producción y el transporte, pilares esenciales para sustentar el crecimiento económico.

La interrelación entre el crecimiento demográfico, el incremento del Producto Interno Bruto (PIB) y la expansión de la demanda de energía constituye un fenómeno intrínseco. Un aumento constante en la población genera una mayor exigencia de bienes y servicios, impulsando así el crecimiento económico medido a través del PIB. Este aumento en la actividad económica conlleva una creciente demanda de energía para respaldar procesos industriales, transporte y usos domésticos. De este modo, el incremento en el PIB y el crecimiento poblacional emergen como factores propulsores de la demanda energética, planteando un desafío significativo para satisfacer tal necesidad en constante expansión. Esta interconexión entre Energía y Desarrollo subraya la necesidad de adoptar enfoques sostenibles. Las decisiones políticas y estratégicas destinadas a equilibrar el progreso económico con la eficiencia y la conservación de recursos adquieren una importancia crucial. La gestión equilibrada de estos dos factores se torna esencial para abordar los desafíos medioambientales y asegurar un desarrollo económico que armonice con la eficiencia energética y la preservación de recursos.

La promoción de tecnologías ambientalmente más sostenibles, la optimización de la eficiencia energética y la expansión de fuentes de energía renovable constituyen elementos esenciales para afrontar este desafío de manera integral. Estas iniciativas no solo permiten abordar las demandas actuales de energía, sino que también garantizan un crecimiento económico equitativo y sostenible a largo plazo, respetando los límites del entorno natural.

Figura 1 Energía Mundial Consumida por Recurso Primario [1]



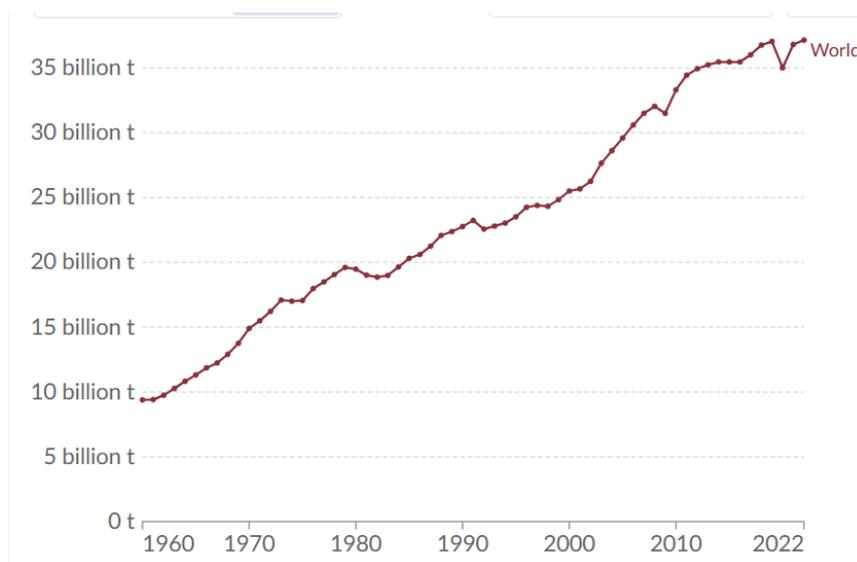
Los procedimientos de conversión de energía para su aplicación final conllevan una serie de repercusiones y aspectos ambientales que, sin importar su origen (renovable o no renovable), inciden en los ecosistemas naturales de diversas maneras. Estas van desde el impacto visual que generan hasta la alteración del entorno que afecta a las especies de flora y fauna presentes. Asimismo, se incluye la emisión de gases contaminantes como el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), reconocido como un gas de efecto invernadero. Este último, en particular, emerge como un catalizador del Cambio Climático, una realidad palpable que trasciende la categoría de mito para impactar de manera concreta a nivel global.

Según el Sexto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático, la temperatura promedio global ha aumentado aproximadamente  $1,1^\circ \text{C}$  en comparación con la de finales del siglo XIX [2], la producción de  $\text{CO}_2$  como gas invernadero, viene de la mano el uso de la principal fuente de energía que son los combustibles fósiles, los mismos que son usados tanto en la generación de la energía eléctrica como en el transporte, siendo este último su uso principal, implicando otras situaciones como la concentración de gases contaminantes en las ciudades produciendo daños colaterales ya no solo ambientales, sino en la salud teniendo una relación directa las muertes por

enfermedades respiratorias relacionadas con las emisiones de CO<sub>2</sub>, en especial en el Sur Global[3],

Esto ha encendido las alarmas de las autoridades de varias localidades a tomar acciones en el incentivo de cambios en el uso de transporte, como por ejemplo la construcción de ciclovías, el aumento considerable de autos eléctricos, soluciones de movilidad colectiva sostenible como implementación de líneas de Metro, entre otras acciones para reducir los impactos producidos por el uso de combustibles fósiles, sin embargo si no se cambia la matriz energética en miras de Energías Sostenibles, el colapso es inminente.

Figura 2 Emisiones anuales de CO<sub>2</sub> emitidos por los combustibles fósiles y la industria 1960-2022 [1]



En la actualidad e 31% de la energía mundial, está basada en el uso de petróleo, el 26,9% carbón y el 24,4% gas natural, lo que supone 84,3% de dependencia mundial energética de combustibles fósiles, [4] esta situación pone al planeta en una situación compleja, por los problemas arriba mencionados.

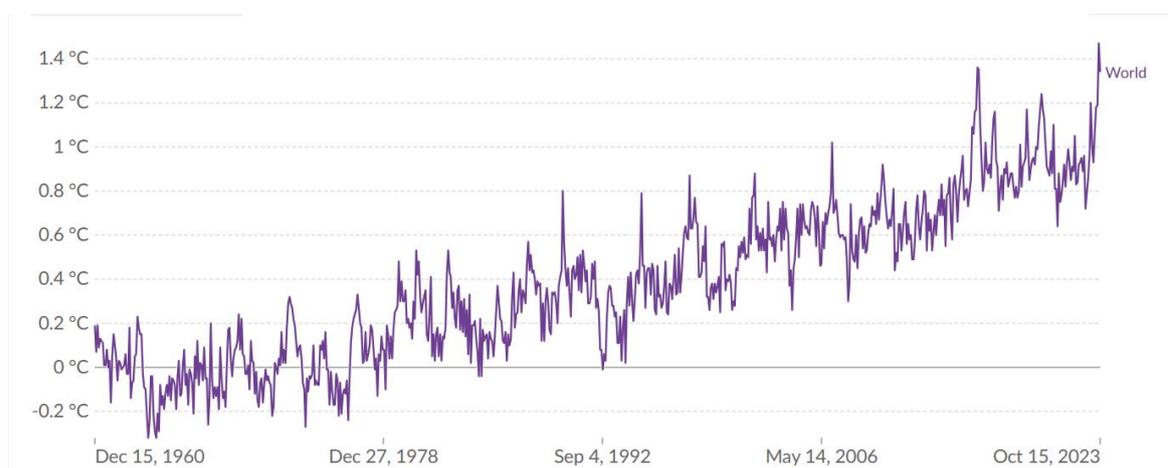
El consumo de petróleo presenta un problema ambiental adicional relacionado con la movilidad, ya que genera una considerable emisión de gases contribuyentes al efecto invernadero. Además de estos factores, los frecuentes cambios de aceite en los motores de combustión interna de los vehículos añaden preocupación. Los altos

costos y la incertidumbre sobre su disponibilidad futura han impulsado el desarrollo de vehículos que funcionan con energía eléctrica o utilizan combustibles alternativos como metanol o etanol, buscando así contribuir a la preservación del medio ambiente[5].

Con la ratificación del Acuerdo de París en 2015, numerosas naciones han adaptado sus objetivos institucionales hacia el combate del cambio climático. En consecuencia, una parte sustancial de estos esfuerzos institucionales está orientada a reducir la dependencia de los recursos fósiles en favor de fuentes de energía renovables. Este proceso, ha llevado a muchos países a comprometerse a reducir sus emisiones de carbono y alcanzar emisiones netas de carbono cero, también conocida como neutralidad de carbono. Las emisiones netas de carbono cero, denotan el logro de un equilibrio entre la cantidad de gases de efecto invernadero emitidos a la atmósfera y la cantidad eliminada o compensada. Representa un estado en el que las emisiones totales de gases de efecto invernadero, principalmente dióxido de carbono, se reducen efectivamente a cero[6].

La relación entre el uso de combustibles fósiles, como fuente primaria de energía, las emisiones de CO<sub>2</sub> y el aumento de temperatura en el ambiente, han provocado varios problemas relacionados como el cambio climático, y es como el 15 de septiembre de 2023, se ha tenido un hito negativo histórico, llegando hasta 1,47 °C [7]el aumento de la temperatura del planeta, por lo que el proceso de Transición Energética se vuelve ya una necesidad de supervivencia como especie.

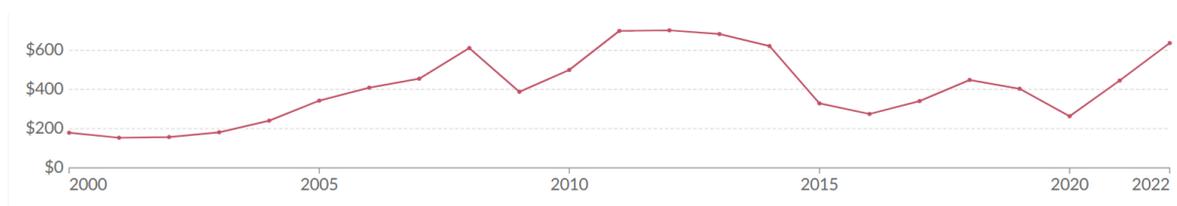
*Figura 3 Registro de temperaturas anormales en el planeta 1960-2023 [7]*



## 1.2 Geopolítica de la energía y economía.

La variabilidad del precio del petróleo desde el año 2000 hasta la actualidad ha sido notable y ha estado influenciada por una serie de factores económicos, geopolíticos y tecnológicos. En la primera década del siglo XXI, asistimos a importantes oscilaciones, desde el auge alcanzado en 2008, donde el precio del barril alcanzó niveles históricos, hasta la brusca caída durante la crisis financiera global. A partir de mediados de la década, factores como la producción de petróleo de esquisto en los Estados Unidos, la oferta de la OPEP y eventos geopolíticos generaron una mayor volatilidad en los precios. Más recientemente, la transición hacia fuentes de energía renovable y los esfuerzos por reducir las emisiones de carbono han influido en la percepción del petróleo como una inversión, generando fluctuaciones adicionales. Esta variabilidad continua subraya la complejidad del mercado petrolero y su susceptibilidad a múltiples fuerzas que afectan su equilibrio.[8]

Figura 4 Precios del Petróleo en USD por metro cúbico [8]



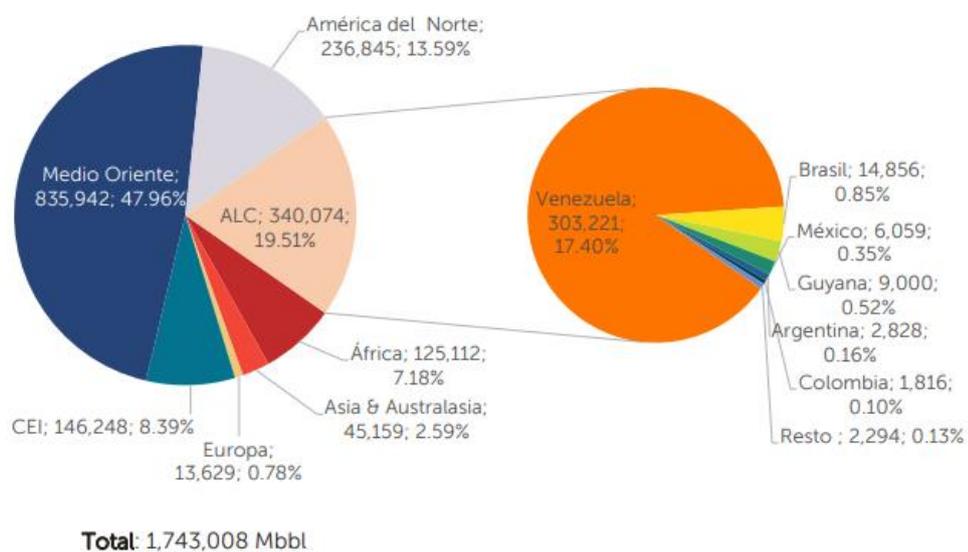
Los países han emprendido iniciativas para permitir la transición a cero emisiones netas lo antes posible. Los esfuerzos de la UE para lograr la ambiciosa transición hacia las emisiones netas cero están plasmados en el Pacto Verde Europeo[9] en donde una de las principales metas es reducir las emisiones al menos un 55% hasta el año 2030, en comparación de las del año 1990, y alcanzar una neutralidad climática a 2050, entre tanto estas iniciativas han hecho que los costos de la energía tengan fluctuaciones importantes.

Varias economías clave a nivel mundial, como la Unión Europea, China y Japón, han anunciado su compromiso con la neutralidad de carbono para mediados de siglo. Aunque un número creciente de políticas y fabricantes de otras economías están explorando estas metas, aún no han adoptado oficialmente este ambicioso objetivo

de estabilización climática. Es crucial destacar que el sector del transporte desempeña un papel fundamental en la transición hacia una economía global neutra en carbono, dado que actualmente representa casi una quinta parte de las emisiones globales de gases de efecto invernadero (GEI). Este sector ha experimentado un crecimiento notable, especialmente debido a la urbanización y el surgimiento de la clase media en los países industrializados[10].

Con los objetivos de descarbonización impulsados en los últimos años, los mercados energéticos se enfrentan a nuevos objetivos, que requieren la intervención de nuevas tecnologías, modelos de negocio y participantes del mercado. Los consumidores industriales han sido identificados como participantes del mercado particularmente prometedores por diversas razones, por ejemplo, gran consumo, potencial de flexibilidad, mayor atención a las señales de precios del mercado, y una mayor motivación para la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> [11]

Figura 5 Reservas Mundiales de Petróleo Vs. América Latina [12]



Sin embargo, la respuesta no solo es técnica, hay varios factores geopolíticos que influyen sobre los costos de la energía, por ejemplo, con la guerra entre Rusia y Ucrania y las sanciones impuestas, las condiciones económicas globales cambiaron abruptamente en febrero de 2022. La industria manufacturera entró bajo presión en todo el mundo, particularmente como resultado del aumento de los precios de la energía, dejó a Europa particularmente expuesta debido a sus relaciones de suministro de energía con Rusia [13],

Debido a las preocupaciones de la sociedad alemana sobre accidentes y desastres nucleares anteriores, como Three Mile Island en 1979, Chernóbil en 1986 y Fukushima en 2011, Alemania planeó eliminar por completo la generación de energía nuclear para finales de 2022 y reemplazarla con energías renovables (Energía Limpia).[14] Sin embargo, después de que Rusia dejó de suministrar gas al país, el gobierno alemán tuvo que posponer temporalmente la eliminación nuclear para garantizar la seguridad energética, pese a esos esfuerzos los precios de la energía en este país se dispararon a niveles nunca antes vistos, pero así mismo su capacidad de respuesta ante este aumento fue de pasar de la participación del 46% de Energías Renovables en el mix energético del 2022 al 55% en el 2023, logrando así estabilizar los precios.

Las grandes economías están tratando de pasar de la dependencia de los combustibles fósiles a fuentes renovables en búsqueda de soberanía energética y así como en 2022, los mercados mundiales de productos básicos experimentaron rápidos aumentos de precios debido a la guerra y las posteriores barreras económicas a las exportaciones rusas de productos básicos. Países desarrollados como Australia no fueron inmunes a estos aumentos de precios de las materias primas. A lo largo de la última década, este país ha estado cada vez más expuesto a la volatilidad de los precios mundiales de la energía a través de sus exportaciones de productos básicos como GNL y carbón. Durante esta misma década, Australia también experimentó una discontinuidad en las políticas energéticas y climáticas.[15] Estos factores, combinados con una de las centrales térmicas, dieron como resultado una tormenta perfecta de acontecimientos que hicieron que los precios de la electricidad y el gas australianos alcanzaran máximos históricos, esto obligó a la rápida intervención estatal, con apoyo gubernamental para disminuir la crisis.

Los países desarrollados se han preocupado por internalizar las externalidades negativas de la expansión económica desde los años 80, dejando de lado el componente ambiental, actualmente una de las tareas para conciliar el progreso económico y la calidad de vida de la población es la transformación estructural de la economía global garantizando la sostenibilidad ecológica del mundo.

En este sentido, la responsabilidad de quienes formulan políticas públicas, de la academia, en especial de los investigadores debe centrarse en disminuir los GEI, pero sin descuidar la volatilidad de los costos de la energía. En ese sentido el incremento de los niveles de producción de energías renovables es una necesidad, esto a su vez permitirá a cada país y región depender de la Energía Primaria que está en su localidad dando como resultado la menor dependencia de recursos energéticos de otros países (en especial de combustibles fósiles) estabilizando los precios y democratizando el acceso a la energía.

El 2022, el sector eléctrico mundial experimentó un ahorro significativo de 520 000 millones de USD en costos de combustible gracias a la adopción de fuentes de energía renovable, este fenómeno se atribuye a la aceleración de la competitividad de la electricidad generada a partir de fuentes renovables, impulsada, en gran medida, por la crisis de precios en los combustibles fósiles, además aproximadamente el 86% de la nueva capacidad renovable instalada, equivalente a 187 gigavatios, demostró costos de producción de electricidad inferiores a los asociados con la generación a partir de combustibles fósiles[16], lo que es una muestra importante de que el mundo está avanzando a paso firme a las Renovables, sin embargo esta Transición, es desigual por los factores característicos de cada región.

### **1.3 Contexto Energético de Ecuador.**

América Latina es una región dependiente de los recursos naturales; por lo tanto, plantea graves desafíos para lograr el progreso económico, pese a ser una región biodiversa que aún no ha encontrado un modelo de desarrollo que sea compatible con la abundancia de recaudación rentista de los recursos naturales y los altos niveles de desigualdad. Debido a la influencia que ejercen las preferencias de consumo de la población, el modelo de exportador primario, y la especialización en servicios pueden exacerbar el deterioro ambiental. La extracción de minerales y petróleo tienen una influencia directa en el medio ambiente, incluida la degradación de los nutrientes del suelo y la contaminación de los recursos hídricos subterráneos[17].

La región ha estado sujeta a episodios significativos de malestar social y político a causa de la incertidumbre en materia económica. Los estallidos de tensión social a finales de 2019 en Chile, Colombia y Ecuador, los acontecimientos que llevaron al programa del Fondo Monetario Internacional de Argentina y la situación más duradera de Venezuela son ejemplos históricos recientes[18]. Estos acontecimientos, sin embargo, no son excepcionales en la historia de la región, y varios estudios señalan la debilidad de las instituciones políticas y económicas como un factor subyacente fundamental, esto hace que la región esté experimentando un cambio significativo desde los combustibles fósiles hacia las energías renovables en un proceso heterogéneo, en el que algunos países se han convertido plenamente en proveedores de energía renovable, mientras que otros están cambiando y demandando energía renovable para el transporte masivo[19]. Algunos parecen estancados en los combustibles fósiles porque tienen abundantes recursos de combustibles fósiles. Aun así, otros en la región andina han aprovechado históricamente las cascadas para generar energía hidroeléctrica y más aún en la última década. Otros han hecho de la necesidad virtud y la han convertido en energías renovables porque carecen de ambas.

Latinoamérica contribuye apenas con el 8,3% de las emisiones globales[20], por lo que el progreso hacia matrices energéticas más limpias no se limita únicamente a cambiar fuentes de energía con alto contenido de carbono, como los combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas natural), por aquellas de bajo uso de carbono, como las energías renovables (solar, eólica, geotérmica, hidrógeno verde). Como se ha señalado, las emisiones de la región no son representativas a nivel mundial, pero este cambio implica una transformación estructural profunda y fundamental en las dimensiones social, económica, ambiental y de gobernabilidad, dando lugar a un cambio radical en la forma en que las personas producen y consumen energía[2].

En este contexto, surgen desafíos significativos relacionados con el consumo de combustibles fósiles. En primer lugar, la dependencia histórica de estos recursos subraya la imperativa necesidad de migrar hacia fuentes de energía más sostenibles, con el objetivo de reducir la huella ambiental y mitigar los riesgos asociados al cambio climático.

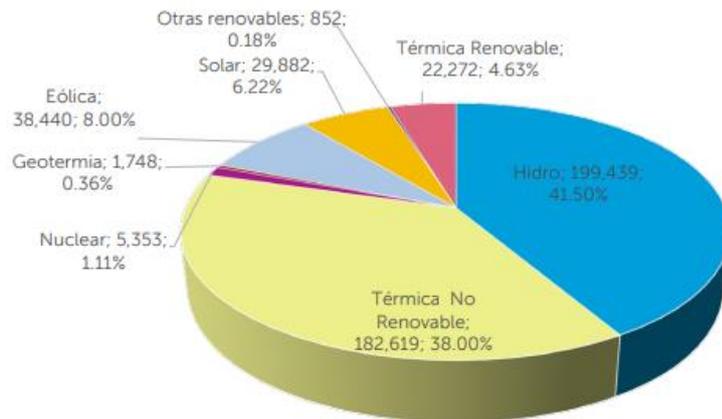
En segundo lugar, la disparidad en los enfoques adoptados por los países de la región en cuanto a la descarbonización y transición hacia energías renovables genera divergencias en los niveles de progreso y compromiso. A pesar de que algunos países han implementado políticas ambiciosas para reducir emisiones y fomentar el uso de energías limpias, otros se enfrentan a obstáculos para adoptar medidas concretas. Ante esta realidad, la necesidad de una transición energética justa y equitativa se vuelve imperante, considerando tanto la vulnerabilidad de ciertas economías como la urgencia global de abordar los desafíos climáticos.

El empleo de combustibles fósiles constituye un elemento esencial para el funcionamiento de las economías contemporáneas; no obstante, está intrínsecamente vinculado a la generación de diversas externalidades negativas. Entre estas, destacan el tráfico vehicular, la contaminación atmosférica y el cambio climático. Proyecciones basadas en escenarios inerciales indican un pronóstico de sustancial aumento en el consumo de gasolina y diésel en los próximos años, amplificando así estas externalidades negativas. Este fenómeno adquiere una relevancia particular en el contexto de América Latina, donde las externalidades negativas ya son especialmente intensas, derivadas, por ejemplo, del transporte urbano, y se vislumbra una probable intensificación en un entorno de acelerado crecimiento económico[21], eso sumado a que estos combustibles en varios países son importados y tienen subsidios para la venta final, hacen que las economías sean aún más frágiles, por lo que urge encontrar una alternativa importante para suplir los mismos en el transporte.

En la región, se destacan dos desafíos interrelacionados en el ámbito energético desde la perspectiva eléctrica. En primer lugar, resulta imperativo optimizar los sistemas energéticos para asegurar el acceso universal al servicio eléctrico, al mismo tiempo que se busca una gestión sostenible de los recursos disponibles. En segundo lugar, emerge un nuevo paradigma en la generación y consumo de energía a través de la generación distribuida. Las trayectorias nacionales hacia la eficiencia energética y la generación distribuida son relativamente recientes, presentando distintos niveles de desarrollo en cada caso. La mayoría de los países de la región están implementando programas y regulaciones que requieren la instalación de equipos de bajo consumo y fomentan prácticas eficientes. En lo que

respecta a la generación distribuida, varios países sudamericanos aún se encuentran en fases iniciales; algunos ya han experimentado resultados prometedores, mientras que otros carecen de experiencias prácticas y de un marco legal consolidado[22].

Figura 6 Capacidad Instalada para Generación Eléctrica en América Latina 2022[12]



En la Figura 6, se evidencia que el 62% de la capacidad instalada en América Latina destinada a la generación eléctrica proviene de fuentes renovables. Destaca que el 41% de dicha capacidad se deriva de recursos hidráulicos, planteando así un desafío significativo para la seguridad y la soberanía energética en la región. Este fenómeno se ve exacerbado por los efectos del cambio climático, que inciden en la variabilidad de los caudales fluviales. La presencia de sequías significativas en algunos países de la zona compromete de manera sustancial la viabilidad de la generación eléctrica a partir de recursos hidroeléctricos, una forma tradicional de energía renovable.

#### 1.4 Contexto Energético de Ecuador.

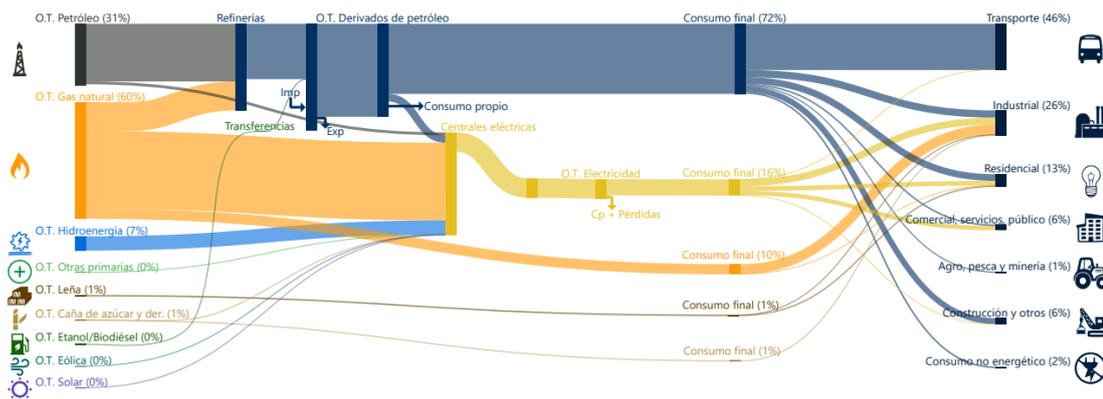
La energía emerge como un pilar crucial en el contexto contemporáneo, catalizando el desarrollo económico de las naciones, modelando sus condiciones medioambientales y ejerciendo una influencia directa en el bienestar de la población. En el caso específico de Ecuador, la garantía de un suministro energético accesible y seguro se erige como un requisito fundamental para sustentar un país próspero. Este imperativo no solo busca beneficiar a sus ciudadanos, sino también respaldar los diversos sectores productivos que conforman el entramado económico

ecuatoriano. La intersección entre la viabilidad energética y el progreso sostenible se convierte, así, en un elemento cardinal en la configuración del futuro socioeconómico del país.

Entre 2012 y 2022, la demografía ecuatoriana experimentó un incremento del 15.9%, elevando la población de 15.5 millones a 18 millones de habitantes. Paralelamente, el Producto Interno Bruto (PIB) del país exhibió un crecimiento del 10.5%, ascendiendo de 64,362 millones de dólares constantes en 2012 a 71,125 millones en 2022. Destaca la recuperación económica del 7.3% en el PIB en 2022 con respecto al año 2020, marcado por una significativa contracción en todos los sectores productivos debido a la pandemia de Covid-19.[23]

Según se presenta en la Figura 7, para satisfacer la demanda energética de la población en el año 2022, se observa una distribución significativa en las fuentes de suministro. En este contexto, el 31% de la demanda se cubrió mediante el uso de petróleo, mientras que el gas natural desempeñó un papel preponderante, contribuyendo con un 60% del suministro total, destacándose ambos como combustibles fósiles predominantes. Por otro lado, un 9% restante provino de fuentes renovables. En este segmento, la energía hidráulica representó un 7%, siendo la biomasa de caña de azúcar y leña responsables del 2% restante. Este análisis subraya la importancia de considerar la diversificación de la matriz energética para garantizar un suministro sostenible y resiliente.

Figura 7 Balance Energético Resumido de Ecuador en 2022[12]

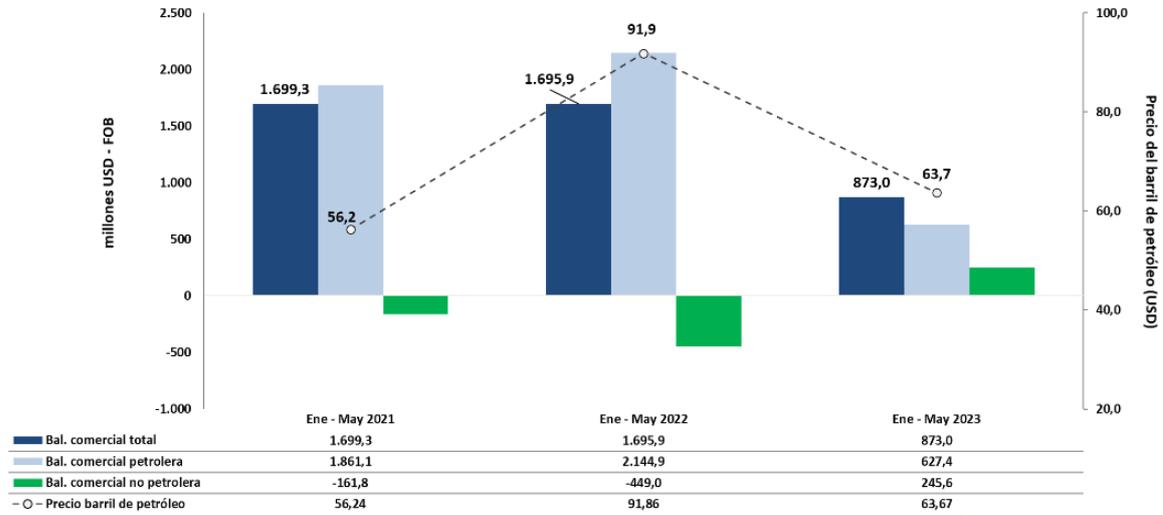


El uso final de la energía indica que el sector del transporte asumió la mayor carga con un 46%, consolidándose como el principal receptor de portadores energéticos. En contraste, el sector industrial ocupó una significativa proporción del 26%, superando el consumo residencial que se situó en un 13%. Estos datos señalan de manera concluyente las áreas prioritarias para la implementación de políticas de eficiencia y gestión del consumo energético.

Para llevar a cabo un análisis energético preciso, se requiere desglosarlo en dos categorías fundamentales: el consumo de combustibles fósiles destinados al transporte y la demanda de energía eléctrica. Esto se debe a la presencia de una crisis en estos dos sectores clave para el desarrollo en Ecuador en los últimos años. En esta investigación, se abordarán de manera individualizada los factores que han contribuido a dicha crisis en cada uno de estos ámbitos, con el objetivo de proporcionar una comprensión detallada y específica de los desafíos energéticos actuales en el país.

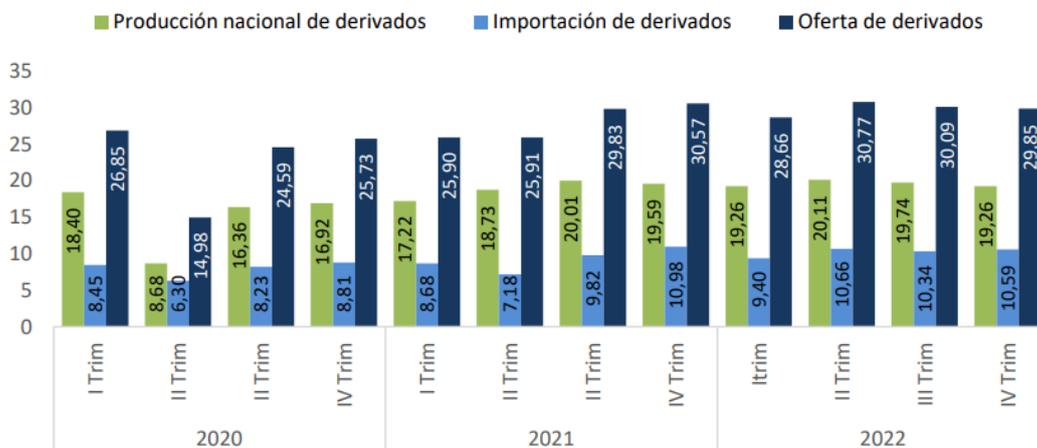
Ecuador, en virtud de sus recursos naturales, se posiciona como un país con reservas petroleras. Sin embargo, su balanza comercial exhibe fragilidad y dependencia sustancial de las exportaciones de petróleo. Paralelamente, enfrenta un desafío importante: a pesar de su papel como exportador de crudo, carece de la infraestructura necesaria para llevar a cabo el proceso de refinación a nivel interno. Este déficit obliga a una considerable importación de derivados petroleros para satisfacer la demanda nacional, acentuando la vulnerabilidad del país en términos de seguridad energética y dependencia externa.

Figura 8 Balanza comercial de Ecuador Comparativa Enero-Mayo del 2021 al 2023[24]



La Figura 8 ilustra los periodos de enero a mayo tanto de 2020 a 2021, evidenciando un marcado déficit en la balanza comercial no petrolera. El año 2022 presenta un déficit acentuado, superando en 449 millones de dólares estadounidenses al periodo anterior. No obstante, en 2023, se observa un cambio significativo con la aparición de un superávit de 245.6 millones de dólares estadounidenses. Este fenómeno subraya la notable volatilidad de la balanza comercial ecuatoriana, tal como se destacó en el apartado anterior.

Figura 9 Oferta de Derivados de Petróleo en millones de dólares por trimestre desde el 2020 al 2022[25]



La Figura 9 presenta la oferta trimestral de derivados de petróleo, destacando una significativa variación anual en el incremento de divisas necesarias para la importación de combustibles en Ecuador. En 2020, la cifra ascendió a 31.79 millones, experimentando un aumento al alcanzar los 36.66 millones en 2021. Al cerrar el año 2022, se evidenció un incremento adicional, llegando a 40.99 millones de dólares. Esto representa un aumento porcentual del 15.4% respecto a 2021 y un incremento acumulado del 28.7% desde 2020. Este análisis subraya la tendencia al alza en las necesidades financieras asociadas a la importación de derivados de petróleo, reflejando la dinámica cambiante en el mercado energético del país.[25]

Figura 10 Subsidios a los combustibles 2023, Presupuesto General del Estado 2023 [26]



La problemática central no radica únicamente en el aumento del 28.7% en las importaciones de derivados, destinados a cubrir la demanda de combustibles fósiles en el país. Más bien, la inquietud principal se centra en combustibles específicos, como el diésel, la nafta de 85 octanos y el gas licuado de petróleo (GLP) de uso doméstico, que se comercializan con un costo fijo para el consumidor final. Esto implica que la diferencia entre el precio de mercado y el precio de venta al público es cubierta mediante subvenciones estatales, es decir, subsidios. Según el Ministerio de Economía y Finanzas del Ecuador, en el año 2023, estas subvenciones ascendieron a aproximadamente 2,727.17 millones de dólares. Es importante destacar que los subsidios al diésel representaron 1,429.42 millones de dólares, mientras que los de las gasolinás fueron de 456.07 millones (ambos utilizados en transporte), y los del GLP de uso doméstico totalizaron 716.94 millones de dólares.[26] Estos montos conjuntos representan aproximadamente el 18% del Presupuesto General del Estado

y alrededor del 3% del Producto Interno Bruto (PIB). Este escenario resalta la magnitud de la carga económica asociada a los subsidios estatales en el sector de combustibles y su relevancia en las finanzas públicas del país. Los subsidios a la energía le cuestan a Ecuador el 7% de su presupuesto público, o dos tercios del déficit fiscal[27].

El 3 de octubre de 2019, el gobierno ecuatoriano promulgó el Decreto 883, que inicialmente permitió la eliminación del subsidio a los combustibles. Sin embargo, la presión social derivó en la pronta derogación de esta medida en los días subsiguientes, debido a la intensidad de las protestas sociales, que paralizaron completamente el país. La disminución de subsidios a los combustibles se revela como una temática delicada, dada su potencial repercusión en la esfera alimentaria. La interconexión entre el costo de los alimentos, la energía y otros factores plantea un desafío de naturaleza compleja. En el contexto latinoamericano, el crecimiento demográfico y la creciente demanda de la clase media anticipan una rápida expansión en las próximas décadas en sectores como alimentos y transporte, generando un escenario propenso a tensiones sociales y protestas [28].

El 20 de agosto de 2023, se llevó a cabo en Ecuador un proceso electoral de gran trascendencia, marcando no solo la primera vuelta de las elecciones anticipadas para los cargos de Presidente, Vicepresidente y miembros del Poder Legislativo, sino también la participación en una Consulta Popular. En dicha consulta, se planteó una interrogante determinante respecto a la explotación de un Campo Petrolero situado en el Parque Nacional Yasuní. Según las cifras del Consejo Nacional Electoral (CNE), la opción vinculada con la preservación del petróleo en este ecosistema natural obtuvo un respaldo del 59%, estableciendo un hito sin precedentes a nivel mundial al detener la producción de un campo petrolero, especialmente después de 7 años de operación.

El Bloque 43, comprende los campos Ishpingo-Tambococha-Tiputini (ITT) y se localiza en el Parque Nacional Yasuní (PNY). Desde el inicio de sus operaciones en 2016, posterior a la declaración de interés nacional en la explotación de este

bloque, la producción de estos campos ha representado aproximadamente el 12.3% del total producido por EP Petroecuador. Durante el período 2016-2022, los ingresos petroleros generados por el Bloque 43-ITT ascendieron a USD 6.733 millones, con un rendimiento de USD 4.123 millones. En 2022, este rubro alcanzó los USD 1.108 millones, equivalente al 1.0% del Producto Interno Bruto (PIB) [29] .

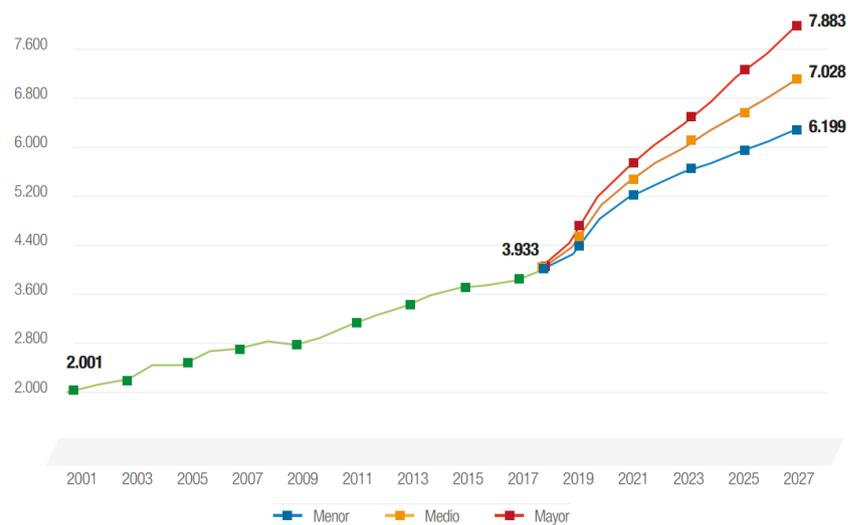
El cese de operaciones en el Bloque 43-ITT producto del resultado de la consulta popular implica significativo costo en el volumen de extracción de petróleo, estimado en 281.8 millones de barriles entre los años 2023 y 2043. Esta disminución en la producción petrolera conlleva la pérdida de ingresos brutos por un total de USD 17,634.5 millones. Al considerar los montos esperados por inversiones, costos, deducciones según la Ley Amazónica y Ley 40, se estima que el Estado dejaría de percibir recursos por rendimiento petrolero por un monto neto de USD 12,039.0 millones. Adicionalmente, al sumar los costos asociados al abandono de los campos, las compensaciones sociales y las pérdidas vinculadas a las inversiones realizadas, el costo total de oportunidad asciende a USD 14,709.0 millones. Este análisis económico ilustra la magnitud de las implicaciones financieras derivadas de la decisión de poner fin a las operaciones en el Bloque 43-ITT, abordando tanto los aspectos de ingresos como los costos y considerando las diferentes variables legales.[29]

Desde la perspectiva energética petrolera, la interrelación entre los subsidios a los derivados, la importación de los mismos y la eventual clausura del campo petrolero arriba mencionado debido al respaldo del SI en el plebiscito plantea un panorama desafiante que compromete significativamente las finanzas públicas y la seguridad energética del país. Este conjunto de circunstancias coloca al Ecuador en un punto crítico que exige respuestas inmediatas y soluciones energético-económicas urgentes para salvaguardar la sostenibilidad del sector. La interdependencia entre estos factores resalta la necesidad imperativa de abordar integralmente la complejidad de los retos energéticos y económicos que se avecinan.

La demanda de energía eléctrica en Ecuador tiene una tendencia de crecimiento importante, esto ha cobrado un papel protagónico en la configuración del panorama energético nacional. Este notable aumento, impulsado por diversos factores como el

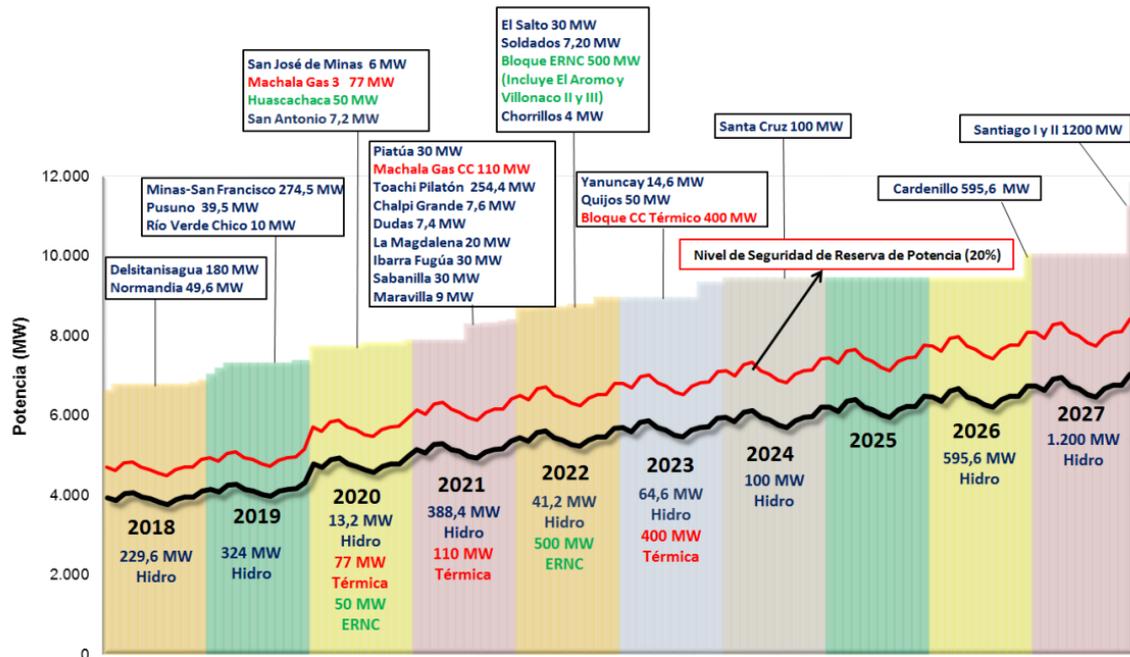
crecimiento industrial, la expansión demográfica entre otros componentes presenta un desafío importante para la seguridad energética del país.

Figura 11 Proyección de la demanda de energía eléctrica en botes de generación 2018-2027[30]



Como se evidencia en la Figura 11, la tasa de crecimiento anual promedio de la demanda eléctrica, considerando todos los requisitos del sistema, se sitúa en torno al 6.6%. Este cálculo contempla tanto las proyecciones demográficas como el crecimiento económico del país. Este incremento sostenido destaca la importancia de buscar nuevas fuentes de generación de energía. La urgencia radica en evitar compromisos en la estabilidad y capacidad operativa del sistema nacional interconectado. Este escenario exige estrategias de planificación energética altamente eficientes y adaptativas que no solo se anticipen a la demanda proyectada, sino que también garanticen la seguridad y confiabilidad del suministro eléctrico en el país, situaciones que el mismo Plan Maestro de Electrificación de la fecha tenía contemplado como muestra la Figura 12.

Figura 12 Prioridad de entrada de proyectos en función de la Curva de Demanda Proyectada 2018-2027[30]



La planificación energética que abarca desde 2017 hasta la fecha presenta una fase inicial exitosa, donde todos los proyectos programados para 2018 y 2019 se integraron en su totalidad al Sistema Nacional Interconectado. Sin embargo, a partir de 2020, se evidencian desafíos notables, como se detalla en la Tabla 1. Proyectos significativos, como Machala Gas 3, con una capacidad de 7,2 MW, no solo no lograron ingresar, sino que también se excluyeron iniciativas de energías renovables, como San Antonio, con una capacidad de 7,1 MW.

Desde ese punto hasta la actualidad, la entrada de proyectos planificados ha experimentado una detención total, a pesar de las proyecciones calculadas para el crecimiento de la demanda. Esta interrupción ha generado riesgo para la seguridad del sistema, acercándolo peligrosamente al colapso. Un análisis detallado de esta situación es crucial para entender las complejidades y proponer soluciones que restauren la seguridad energética del Sistema Nacional Interconectado del país.

Tabla 1 Proyectos planificados en el Plan de Maestro de Electrificación 2017-2028, que no han ingresado al SIN al 2024 (Fuente, elaboración propia)

AÑO DE CONEXIÓN	PROYECTOS	POTENCIA INSTALADA MW.			TOTAL MW
		HIDRAULICA	TERMICA DE CC	ERNC	
2020	San Antonio	7.2			
	Machala Gas 3		77		
2021	Piatua	30			
	Machala Gas CC		110		
	Toachi Pilatón	205.4			
	Dudas	7.4			
	La Magdalena	20			
	Ibarra Fugua	30			
	Sabanilla	30			
	Maravilla	9			
2022	El Salto	30			
	Soldados	7.2			
	Villonaco II y III Bloque de ERNC			500	
	Chorrillos	4			
2023	Yanuncay	14.6			
	Quijos	50			
	Bloque Térmico CC		400		
2024	Santa Cruz	100			
	<b>TOTAL</b>	<b>544.8</b>	<b>587</b>	<b>500</b>	<b>1631.8</b>

La evolución del incumplimiento de la expansión de la generación en Ecuador, evidenciada en la Tabla 1 hasta 2024, revela un preocupante estancamiento en la integración de capacidades energéticas planificadas. Con un total de 1631 MW sin ingresar, distribuidos entre Centrales Hidráulicas (544,8 MW), Centrales Térmicas de Ciclo Combinado (587 MW) y un Bloque de Energías Renovables no convencionales (500 MW), los motivos de esta disrupción abarcan una variedad de retos que contradicen la planificación delineada en el Plan Maestro de Electrificación 2017-2028.

Este incumplimiento tuvo consecuencias significativas, manifestándose el 27 de octubre de 2023 con el inicio de racionamientos de energía eléctrica en el país. Esta situación, inédita desde 2009, ha impactado no solo en la estabilidad del suministro interno sino también en las relaciones de Ecuador con Colombia. Las importaciones de energía a través de la interconexión con Colombia han alcanzado el límite de 450 MW, llevando a costos elevados de hasta 0,58 USD por unidad de

energía importada. Este escenario, desde una perspectiva económica, se torna insostenible para Ecuador, planteando un urgente llamamiento a una revisión técnica y estratégica que aborde estos desafíos y garantice la seguridad y sostenibilidad del suministro eléctrico en el país.

Frente a los problemas presentados en el sector petrolero, sus derivados y el déficit de energía eléctrica, junto con las dificultades económicas que afectan al país, se hace imperativo implementar decisiones inmediatas. Estas medidas estratégicas no solo apuntan a la resolución de crisis inmediatas, sino que están diseñadas para sentar las bases de una recuperación sostenible a mediano y largo plazo. A continuación, se delinearán las propuestas cruciales para abordar esta compleja coyuntura.

- Focalización de los subsidios de los combustibles.

La premisa fundamental detrás de la implementación de subsidios energéticos es resguardar a los hogares vulnerables de las fluctuaciones en los precios de la energía. Sin embargo, el análisis de la realidad en América Latina y el Caribe señala una notoria ineficacia de estos subsidios en la reducción de la pobreza. El costo de transferir un dólar al 20% más pobre de la población se estima en alrededor de 12 dólares[27]. A pesar de su baja eficiencia, los subsidios desempeñan un papel crucial al transferir ingresos a los hogares más necesitados, lo que complica su eliminación desde un punto de vista político. Por lo tanto, es imperativo desarrollar estrategias de focalización, especialmente en los subsidios vinculados a la cocción de alimentos (GLP) y el transporte (Diésel), con el objetivo de optimizar su impacto y eficiencia.

- Aumento de la Capacidad de Refinación de Petróleo.

Ecuador, siendo un país exportador de petróleo, enfrenta desafíos en su capacidad de refinación, que no satisface la demanda interna. En el último trimestre de 2022, se importaron cantidades significativas de combustibles, incluyendo 5,20 millones de barriles de nafta, 3,40 millones de barriles de GLP y 8,26 millones de barriles de diésel. Estas importaciones representaron el 35,48% del total de derivados de petróleo requeridos en el mercado nacional durante ese período[25]. La proximidad

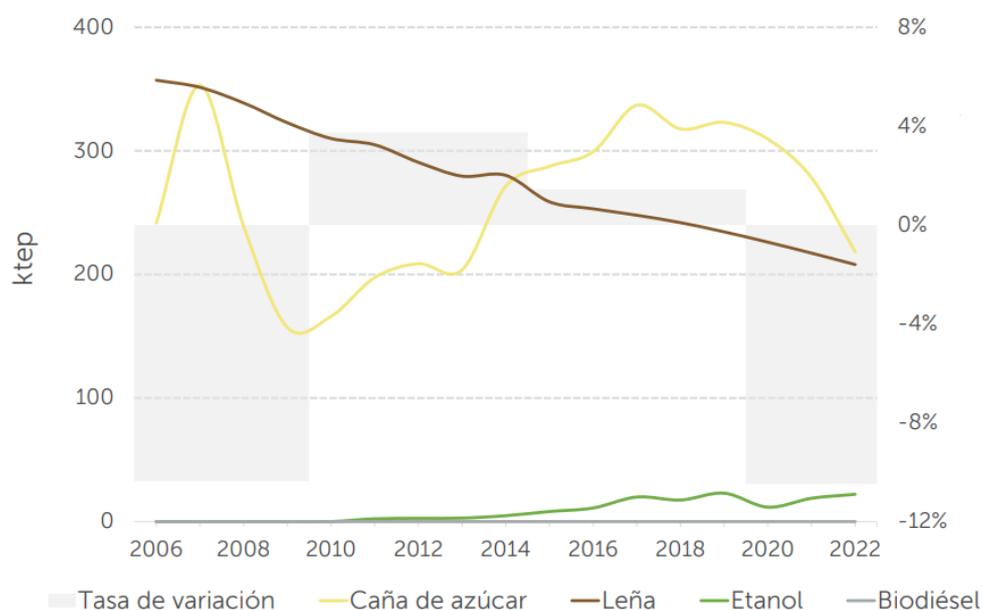
del cierre de los campos petroleros del Bloque ITT, debido a la consulta popular, plantea un riesgo inminente para la balanza comercial petrolera del país.

En este contexto, resulta una necesidad aumentar la capacidad de refinación en las refinerías existentes y considerar la posibilidad de construir un nuevo complejo petroquímico, estas acciones serían cruciales para asegurar que la totalidad de los derivados para el consumo interno sean de producción nacional, fortaleciendo así la autosuficiencia del país en materia de energía.

- Fomento en el desarrollo y producción de biocombustibles.

La producción de biocombustibles en Ecuador emerge como una oportunidad estratégica para mitigar la crisis energética y transitar hacia un modelo más sostenible. Este enfoque no solo disminuiría la dependencia de combustibles fósiles, los cuales actualmente se importan, sino que también amortiguaría significativamente los impactos de la volatilidad de los precios del petróleo en los mercados internacionales, El biodiesel y bioteanol están adquiriendo creciente relevancia en virtud de las preocupaciones medioambientales. En este contexto, la búsqueda de cultivos alternativos y sostenibles como nuevas fuentes de biocombustibles está experimentando una creciente demanda[31]

Figura 13 Producción de biomasa y biocombustibles en Ecuador periodo 2006-2022 [12]



La Figura 13 revela que, entre 2006 y 2022, la producción nacional de etanol ha sido modesta, no alcanzando las 3 ktep. Esta producción, mayormente derivada de cultivos energéticos de caña de azúcar, destaca la necesidad imperante de aumentar considerablemente la producción de etanol, mediante la diversificación de las materias primas utilizadas en su fabricación.

Además de otras alternativas como los biolubricantes (principalmente derivados de aceites vegetales) están ganando importancia, ya que pueden usarse en muchas aplicaciones, siendo amigables con el medio ambiente (es decir, biodegradables, con baja ecotoxicidad y no contribuyendo a los productos químicos orgánicos volátiles)[32]

- Optimización de la demanda de electricidad.

La tasa de crecimiento anual de la demanda eléctrica del país, cifrada en un 6.6%, plantea un escenario insostenible a largo plazo. Para contrarrestar esta tendencia, es imperativo implementar estrategias que incluyan programas de eficiencia energética, la adopción de tarifas dinámicas para usuarios residenciales, la certificación de Sistemas de Gestión Energética en sectores comerciales e industriales, y la integración de redes inteligentes, entre otras iniciativas destinadas a optimizar la demanda eléctrica.

La implementación de programas de eficiencia energética y la adopción de tecnologías de sistemas de gestión fortalecerán la transformación de la red eléctrica ecuatoriana, mejorando la calidad del suministro eléctrico.

- Implementación Rigurosa de la Expansión de Generación según el Plan Maestro de Electrificación.

Como se evidenció en la Tabla 1, los 1631 MW planeados para el periodo 2018-2024 no fueron incorporados al Sistema Nacional Interconectado, generando racionamientos de energía en el país. Urge la implementación de incentivos, ya sea en el ámbito legal, tributario, financiero, u otros, para fomentar inversiones, tanto públicas como privadas, que cumplan con el mencionado plan, asegurando así un suministro continuo y seguro de energía eléctrica, la necesidad de financiamiento

externo para impulsar nuevos proyectos energéticos. La aplicación exitosa de estas iniciativas será crucial para el futuro sostenible del sector eléctrico en Ecuador.

- Desarrollo y Fomento de Tecnologías de Generación Eléctrica mediante Energías Renovables.

El sector eléctrico ecuatoriano ha experimentado transformaciones significativas en su estructura, operación y modelo de gestión, influidas en gran medida por las fluctuaciones en los precios del petróleo a nivel mundial. En décadas pasadas, las centrales térmicas desempeñaron un papel crucial en la generación eléctrica, respaldadas por generosos subsidios a los combustibles fósiles. No obstante, se proyecta que, en los próximos años, la hidroelectricidad representará más del 90% del suministro eléctrico[23]. Este cambio hacia las energías renovables no solo implica una reducción de la dependencia de los combustibles fósiles, lo que estabilizará el gasto público, sino que también plantea desafíos y oportunidades. La gestión eficiente del sector eléctrico se verá amenazada si se introduce una burocracia excesiva en las empresas eléctricas estatales. La diversificación de la matriz energética se presenta como una necesidad, especialmente para evitar restricciones severas causadas por eventos climáticos, como sequías. La integración de fuentes como la energía solar, geotérmica y eólica se vislumbra como un componente clave de esta diversificación. En este contexto, se sugiere mejorar el concepto de Generación Distribuida en la legislación ecuatoriana, incentivando a los clientes a generar su propia energía y contribuir a la red en momentos de alta demanda, debido a que actualmente solo considera hasta 2 MW como máximo de potencia instalada.

La estrategia no debe limitarse solo a la implementación; también es esencial enfocarse en la investigación de energías renovables. En este sentido, el Ministerio del sector, en colaboración con instituciones académicas e institutos de investigación del país, debe establecer una colaboración integral para trazar una hoja de ruta que fomente el desarrollo de nuevas tecnologías y la identificación de oportunidades. Es crucial aprovechar la abundancia de recursos naturales y agrícolas en Ecuador para impulsar la innovación en el ámbito de las energías renovables, en casos como Brasil en donde la investigación en temas como

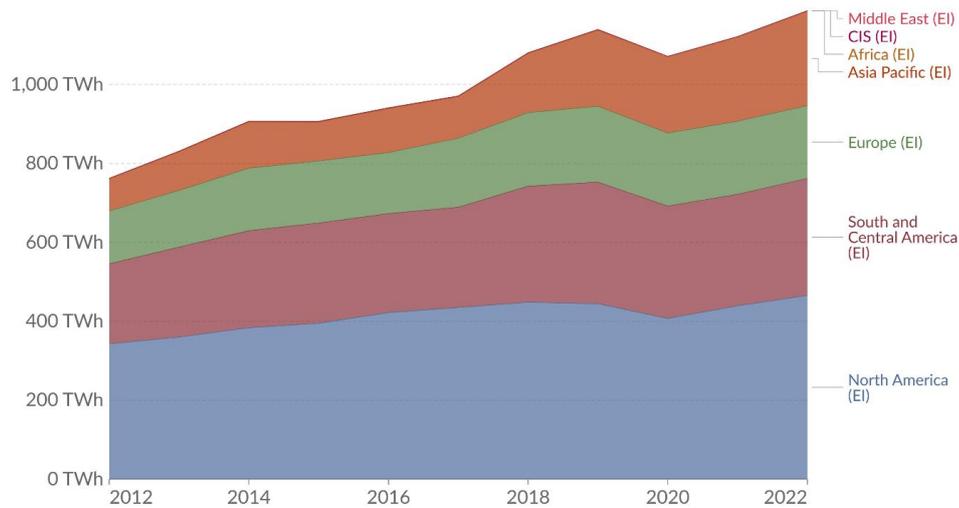
bioetanol es avanzada, la relación con institutos de investigación y universidades es frecuente, esto no se traduce en productos y resultados económicos[33], por lo que es importante en este sentido reforzar temas como el nivel de protección de los derechos de propiedad intelectual y el esfuerzo por conseguir fuentes de financiación externas para la innovación.

### **1.5 Contribución de los Biocombustibles y la Biomasa a la solución de la crisis energética de Ecuador.**

Se reconoce que la incorporación de residuos agrícolas y agroindustriales en la producción de bioenergía desempeña un papel crucial en la transición hacia la reducción de la dependencia de combustibles fósiles[34]. En los últimos años, se ha observado una notable transición en la matriz energética, especialmente en el ámbito del transporte, hacia el empleo de biocombustibles como una alternativa viable a los combustibles fósiles, cuya disponibilidad decreciente ha generado una preocupación latente en cuanto a la seguridad energética global.

Este cambio de preferencia hacia los biocombustibles se fundamenta en la búsqueda de fuentes energéticas renovables que puedan ser regeneradas de manera sostenible, considerando aspectos primordiales como la gestión responsable de recursos, la optimización de la cadena de producción y la mitigación del impacto ambiental.. Este cambio se produce en medio de desafíos evidentes relacionados con la seguridad energética, la oferta constante y las condiciones climáticas adversas que amenazan con socavar los esfuerzos destinados a forjar un futuro sostenible. Dada su naturaleza renovable, los biocombustibles emergen como una opción que puede proporcionar la seguridad energética necesaria a nivel global[35]. El empleo de aceites vegetales para la producción de biodiesel se destaca como una solución prometedora, ya que este se presenta como un sustituto ideal para el diésel. El biodiesel ofrece ventajas significativas, como biodegradabilidad, mayor eficiencia de lubricación y rendimiento mejorado en motores de combustión. Cumpliendo con las normas de calidad establecidas, el biodiesel puede utilizarse directamente, proporcionando así una alternativa más sostenible y amigable con el entorno[5]

Figura 14 Producción Mundial de Biocombustibles 2012-2022 [1]



El Estado ecuatoriano busca activamente alternativas para reducir las importaciones de petróleo y sus derivados, con el fin de satisfacer la demanda local. Estos esfuerzos se intensifican desde el 2019 donde el Ministerio de Agricultura anunció el Plan de Agrocombustibles. Este plan implicó la sustitución de 30.000 hectáreas de arroz por caña de azúcar para la producción de bioetanol. Además, el programa tuvo como objetivo incorporar 140 millones de litros de aceite de palma africana anualmente para iniciar la producción de un 15% v/v de biodiesel. La reducción de las importaciones tendría un impacto significativo en la economía de Ecuador, ya que, desde la década de 1970, el país ha mantenido subsidios a la gasolina, el diésel y el gas licuado de petróleo[36].

El sector del transporte público desempeña un papel crucial en la sociedad, especialmente ante el constante crecimiento de las demandas de movilidad. Aunque se están implementando nuevas tecnologías energéticas en el ámbito de la movilidad urbana, como se evidencia en el aumento del uso de vehículos eléctricos[37] la transición del parque automotor hacia estos vehículos requiere un sistema eléctrico confiable, respaldado por un Mix Energético que pueda satisfacer de manera amplia la demanda. Sin embargo, en el caso de Ecuador, la infraestructura eléctrica actual no cumple completamente con estos requisitos, retrasando el salto tecnológico hacia la electromovilidad. Es imperativo que el país priorice la mejora y expansión de su infraestructura eléctrica para cubrir la demanda actual antes de considerar la incorporación de cargas adicionales al sistema.

En este contexto, los biocombustibles surgen como una alternativa crucial para promover la movilidad sostenible. Su implementación podría actuar como un puente tecnológico viable mientras se avanza hacia la electromovilidad. El uso de biocombustibles ofrece una solución más inmediata y adaptable, permitiendo a Ecuador satisfacer las necesidades actuales de movilidad de manera sostenible, al tiempo que se trabaja en fortalecer la infraestructura para la adopción futura de vehículos eléctricos.

El crecimiento acelerado de la demanda de electricidad, junto con la proyectada expansión de las fuentes de energía renovable variable, resalta la necesidad de analizar las tendencias de la curva demanda a largo plazo. Además, factores como la creciente adopción de vehículos eléctricos pueden influir en la configuración de las curvas de carga futuras[38]. Sin embargo, en la Planificación de Sistemas Eléctricos, aún persiste la suposición estadística del crecimiento de la demanda, especialmente en países como Ecuador, donde la incorporación de energía solar y eólica de despacho centralizado sigue siendo limitada, como se ha detallado previamente.

Los sistemas de energía eléctrica están experimentando un cambio de paradigma histórico en términos de generación, transmisión y suministro de electricidad a los consumidores. Tradicionalmente diseñados para transmitir electricidad de manera unidireccional en alto voltaje desde grandes centrales eléctricas hasta los consumidores[39], este modelo implica que las centrales se ubiquen lejos de los centros de carga. Como consecuencia, se requieren líneas de transmisión de alto voltaje para transportar la energía hacia las redes de distribución, que luego la entregan a los consumidores a voltajes menores. En este contexto, los consumidores adoptan un papel pasivo, mientras que las empresas de distribución y comercialización, en el caso ecuatoriano, monopolios estatales, se limitan a pronosticar la carga y realizar inversiones en función del crecimiento de la demanda, adoptando un enfoque de "ajuste y olvido". La producción de energía permanece centralizada, y las barreras regulatorias, políticas y económicas representan desafíos significativos que obstaculizan la transición hacia los nuevos paradigmas de las energías intermitentes, tanto a nivel de generación a gran escala como en el ámbito de la generación distribuida.

A diferencia de la generación mediante combustibles fósiles o renovables como la hidráulica, en la que el recurso primario puede almacenarse y procesarse casi al instante, promoviendo una capacidad firme, las plantas de energía renovable intermitente (solar y eólica) presentan incertidumbres que implican la predicción de la producción de energía y crean grandes desafíos en la gestión de la red y la programación de la generación para el operador del sistema eléctrico. Esto se debe principalmente a la variabilidad inherente de estas fuentes primarias que no pueden coincidir, en general, con las variaciones en la carga de energía[40].

En este escenario, la integración de fuentes de energía intermitentes, como la solar y la eólica, en sistemas interconectados de despacho centralizado y a gran escala, requiere la implementación de tecnologías complementarias, como sistemas de almacenamiento de energía (centrales de bombeo, bancos de baterías, entre otros), para abordar los desafíos de elasticidad de la curva de demanda. Sin embargo, la adopción de estas tecnologías implica inversiones adicionales, siendo obstáculos significativos, especialmente en países con dificultades económicas. Esto limita el interés genuino en la implementación de este tipo de energías. En el caso de Ecuador, se plantea la explotación de este recurso a pequeña escala mediante Generación Distribuida, contribuyendo de manera puntual a la mitigación de la crisis energética desde el usuario.

Con las barreras de inversiones adicionales y la necesidad de una planificación específica para la integración de tecnologías intermitentes (solar, eólica a gran escala) en el despacho centralizado de unidades de generación, es esencial explorar alternativas en energías renovables que, en su aprovechamiento, se integren directamente al despacho sin requerir tecnología adicional. En este contexto, es importante que Ecuador avance hacia la explotación de Energías Renovables no Convencionales como la geotérmica, que utiliza turbinas de vapor para la generación, o la biomasa, que basa su generación de energía en el Ciclo Termodinámico Rankine. Ambas tecnologías tienen la capacidad de responder rápidamente al despacho, adaptándose a los requisitos dinámicos de potencia y energía del sistema, y satisfacer la Curva de Demanda.

En Ecuador, los residuos generados por las actividades de cosecha y procesamiento de cultivos como banano, palma aceitera, caña de azúcar, cacao, arroz y maíz representan los principales recursos de biomasa con potencial aprovechable para la producción de energía[41], la generación de electricidad con este recurso primario se centra principalmente en el bagazo de caña de azúcar, residuos de la palma aceitera y desechos de la industria maderera, siendo la capacidad instalada alrededor de 143 MW. La mayor parte de esta capacidad (136,4 MW) está vinculada a la industria de la caña de azúcar, que produce más de 400 GWh/año. Otras fuentes incluyen la industria de la palma aceitera (2,2 MW), la industria de compuestos de madera (1 MW), la industria del etanol (0,3 MW) y vertederos cercanos a Cuenca (1 MW). Aunque gran parte de la energía generada se destina al autoconsumo, el biogás de vertedero se vende al sistema eléctrico nacional. Para expandir este enfoque a nivel nacional, se han incorporado nuevas plantaciones de caña de azúcar, y proyectos como el uso de aceite de piñón en las Islas Galápagos demuestran la diversificación de las fuentes de energía renovable[42].

### **1.6 Exploración del potencial de biomasa y biocombustibles a partir de residuos generados en el cultivo del cacao.**

La industria alimentaria genera constantemente subproductos, compuestos principalmente por partes no comestibles. En la actualidad, se producen grandes cantidades de estos subproductos, los cuales son descartados, generando preocupaciones medioambientales. Simultáneamente, el crecimiento de la población mundial y la disminución de las materias primas indican una amenaza real de agotamiento de las fuentes alimenticias. Ante estos desafíos, surge la necesidad de concienciar sobre la importancia del reciclaje de subproductos, que tradicionalmente eran considerados desechos, el cacao no es la excepción[43].

El cacao se destaca como una fruta tropical crucial a nivel global, siendo esencial en la industria alimentaria para la producción de chocolate y derivados. Sus subproductos, como la manteca de cacao y el polvo de cacao, tienen aplicaciones en confitería, bebidas y panadería. En la industria cosmética, la manteca de cacao se utiliza en productos para el cuidado de la piel, gracias a sus propiedades hidratantes. Además, en el ámbito farmacéutico, compuestos bioactivos del cacao se investigan

por sus propiedades antioxidantes y antiinflamatorias, con potencial para el desarrollo de medicamentos y suplementos. La versatilidad del cacao resalta su importancia económica y su papel integral en diversas industrias[44] .

Figura 15 Plantación de Cacao, ubicación: País Ecuador, Provincia: Los Ríos, Cantón Quevedo.



El cacao, integrante de la familia *Malvaceae*, es un árbol que puede alcanzar hasta 20 metros en su entorno silvestre. No obstante, para fines de producción, se prefiere que su altura se limite a un rango más manejable, en general, de 6 a 8 metros[45] ,es una especie *cauliflora*, lo que significa que los frutos y flores emergen directamente del tronco. Sus frutos, alargados y con surcos en la superficie, presentan una amplia variedad de colores, dependiendo de la especie de cacao[46], sus flores son de naturaleza hermafrodita y con una forma estrellada, requieren la polinización a través de insectos, en última instancia, las hojas, de tono verdoso, adoptan una forma elíptica-ovalada y pueden alcanzar hasta 30 cm de longitud[47].

El cultivo del cacao se clasifica comúnmente en dos modalidades. La primera implica un sistema de monocultivo expuesto directamente al sol, con el uso de tratamientos químicos para el control de plagas y enfermedades. Por otro lado, la segunda modalidad se caracteriza por un sistema más complejo, que incorpora técnicas ecológicas, promoviendo la biodiversidad vegetal y aplicando prácticas culturales sostenibles. Este enfoque más holístico no solo beneficia al medio ambiente, sino que también ofrece la posibilidad de establecer una economía más sólida para el agricultor[48].

Antes de la cosecha, diversos factores influyen en el cultivo del cacao, los cuales se categorizan en aspectos ambientales y prácticas de cultivo[49]. Los factores ambientales ideales para el cultivo del cacao son una temperatura entre 22 y 28 °C, una humedad del 70% al 90% [50], una cantidad de lluvia de 1200 a 3000 mm por año [14], una calidad del suelo rico en nitrógeno ( N), fósforo (P) y potasio (K) con presencia de otros elementos[50], radiación solar con exposición aproximada del 50% diario y relieve preferencial en llanuras o laderas con sistema de drenaje[51].

La generación de energía mediante biomasa se encuentra en una etapa incipiente en comparación con el considerable volumen de producción y diversificación agrícola de cultivos que caracteriza al Ecuador. En particular, el sector del cacao destaca como un pilar fundamental de la economía, siendo el tercer país productor mundial de este cultivo. Según datos de la Corporación Financiera Nacional correspondientes al año 2022, la producción de cacao alcanzó la notable cifra de 337,15 toneladas métricas, este elevado rendimiento no solo contribuye al posicionamiento de Ecuador como actor destacado en la escena cacaotera mundial, sino que también genera empleo directo para aproximadamente 941 personas en el país[52]. Ecuador se distingue por la calidad de su cacao fino de aroma, consolidándose como uno de los principales exportadores en términos de volumen.

Este perfil distintivo no solo impulsa la industria chocolatera ecuatoriana, sino que también, debido a la magnitud significativa de la producción de cacao, conlleva un notable volumen de desperdicios, ya que hasta ahora solo se ha aprovechado la almendra de la fruta. Lamentablemente, la mayor parte de estos subproductos, como la cáscara de vaina y la placenta (la misma que luego del proceso destila el mucílago),

son descartados en la mayoría de las plantaciones, sin recibir ningún tipo de aprovechamiento[53]. Este hecho subraya la urgente necesidad de explorar y desarrollar estrategias para utilizar eficientemente estos residuos, ofreciendo oportunidades sumamente prometedoras para la investigación y aplicación de la biomasa y biocombustible derivados del cacao en la generación de energía.

*Figura 16 Mazorca de cacao, indicando los componentes*



La refinación para la obtención de productos finales constituye un proceso crucial en la transformación del cacao crudo en polvo, esencial para la fabricación de diversos productos de chocolate. Este proceso implica el uso de cacao fresco como materia prima primordial. Los granos, extraídos de las mazorcas de cacao, pasan por una fermentación natural en la finca antes de someterse al proceso de secado, siendo estos pasos cruciales en la transformación tecnológica de los granos de cacao en el deseado cacao crudo en polvo, proporcionando el sabor característico necesario para productos de alta calidad como el chocolate[54].

*Figura 17 Agricultores de la zona separando la pulpa de la cáscara en la postcosecha de cacao.*



La pulpa, posteriormente, se transporta en recipientes a las ubicaciones designadas para la fermentación, el desarrollo natural ocurre a través de la acción de levaduras, ácido láctico, bacterias acéticas y hongos durante un periodo de tres a siete días, lo cual resulta en un proceso de fermentación que contribuye significativamente a la transformación deseada. Este proceso se ve intensificado mediante la adición de la enzima pectinasa comercial[55]. Este proceso produce una alta proporción de granos fermentados, contribuyendo a obtener altas puntuaciones en la prueba en taza y, por ende, en las evaluaciones finales del producto.

*Figura 18 Pulpa de cacao lista para el traslado a la fermentación.*



El mucílago, un líquido azucarado fundamental en el proceso de fermentación de la pulpa, se genera como desecho cuando esta pulpa se somete a las levaduras y bacterias presentes. Estos microorganismos descomponen los azúcares en la pulpa, generando calor y descomponiendo las células de manera efectiva. Posteriormente, el mucílago se elimina mediante un proceso de lavado y extracción mecánica de los granos, preparándolos así para las fases subsiguientes del procesamiento[56].

*Figura 19 Mucilago, subproducto obtenido en la fermentación de la pulpa.*



Posteriormente, el secado se realiza inmediatamente después de la fermentación para reducir la humedad de los granos, prevenir el crecimiento de moho y facilitar reacciones bioquímicas cruciales para el óptimo desarrollo del sabor y color necesario en la producción de productos de alta calidad. Aunque el secado rápido enlatado previene eficazmente el crecimiento de moho, existe la preocupación de que esto pueda inhibir el desarrollo del sabor óptimo del cacao. Actualmente, se aplican ampliamente métodos de secado al sol y al horno, alternándolos según las condiciones climáticas[57]

*Figura 20 Agricultor de la zona en el proceso de secado solar.*



Es esencial destacar que, por cada tonelada métrica de granos de cacao secos, se generan aproximadamente 10 toneladas métricas de cáscaras de vainas frescas de cacao y 150 litros de mucílago [58]. Ecuador, durante el año 2021, se registró la producción de 302,01 toneladas métricas de estas cáscaras, cifra que aumentó a 337,1 toneladas métricas en 2022[52], las estimaciones indican que, solo en estos dos años, se acumularon un total de 12,782.2 toneladas métricas de cáscaras como residuo, además de 95,958 litros de mucílago; ambos desechos carecen de cualquier tratamiento. Estos datos subrayan la magnitud de la biomasa y los biocombustibles potenciales disponibles para la generación de energía. Para un análisis más detallado, se puede desglosar esta cantidad por provincia en el año 2022 de la siguiente manera:

Tabla 2 Producción en Toneladas Métricas de Cacao, Cáscara y Mucílago Estimados, Vinculados a la Producción de Ecuador en el Año 2022 [52]

PROVINCIA	PRODUCCIÓN Tm	CASCARA ESTIMADA Tm	MUCÍLAGO ESTIMADO L
Los Ríos	104.270	2085.4	15640.5
Manabí	49.973	999.46	7495.95
Guayas	68.960	1379.2	10344
Esmeraldas	37.939	758.78	5690.85
Santo Domingo	14.295	285.9	2144.25
Otras provincias	61.713	1234.26	9256.95
<b>TOTAL</b>	<b>337.150</b>	<b>6743</b>	<b>50572.5</b>

La Tabla 2 revela la destacada centralización del cultivo de cacao en la zona central de la costa ecuatoriana, específicamente en las provincias de Los Ríos, Manabí y Guayas. Esta concentración encuentra su explicación en las condiciones climáticas tropicales particulares de la región, que ofrecen un entorno óptimo para el desarrollo exitoso del cacao, caracterizado por temperaturas y niveles de humedad específicos. Además de estas condiciones climáticas favorables, la presencia de suelos adecuados y otras condiciones agroecológicas en la región contribuye de manera significativa a la idoneidad de estas provincias para el cultivo de cacao.

No obstante, es crucial destacar que esta concentración no solo tiene implicaciones agronómicas, sino que también presenta desafíos asociados al manejo de subproductos. Los datos indican que se generan considerables cantidades de residuos, como la cáscara, que ascienden a aproximadamente 6,743 toneladas métricas, con un potencial significativo para su aprovechamiento como biomasa. Además, se estima que se desperdician alrededor de 50,572.05 litros de mucílago. Esta realidad no solo conlleva un impacto económico para los productores, sino que también plantea un problema ambiental relevante que requiere atención y soluciones sostenibles en el manejo de estos subproductos, Incluso el mucílago representa un problema ya que la incorrecta disposición de

este material conlleva a la contaminación del suelo y los cursos de agua, representando una amenaza para los cultivos de cacao debido al elevado riesgo de infestación por plagas[58].

### **1.7 Bioenergía, Conceptos Técnicos.**

El panorama energético mundial se ha convertido en un componente crucial para el desarrollo económico sostenible de regiones y naciones. Las transformaciones actuales en la producción de energía, impulsadas principalmente por la escasez y factores geopolíticos, han evidenciado la imperiosa necesidad de transitar hacia una distribución energética menos dependiente. Además, en numerosas regiones, la generación significativa de residuos de biomasa, derivados de las actividades agroindustriales, presenta una oportunidad estratégica para su gestión, contribuyendo así a la producción de energía de manera sostenible[59].

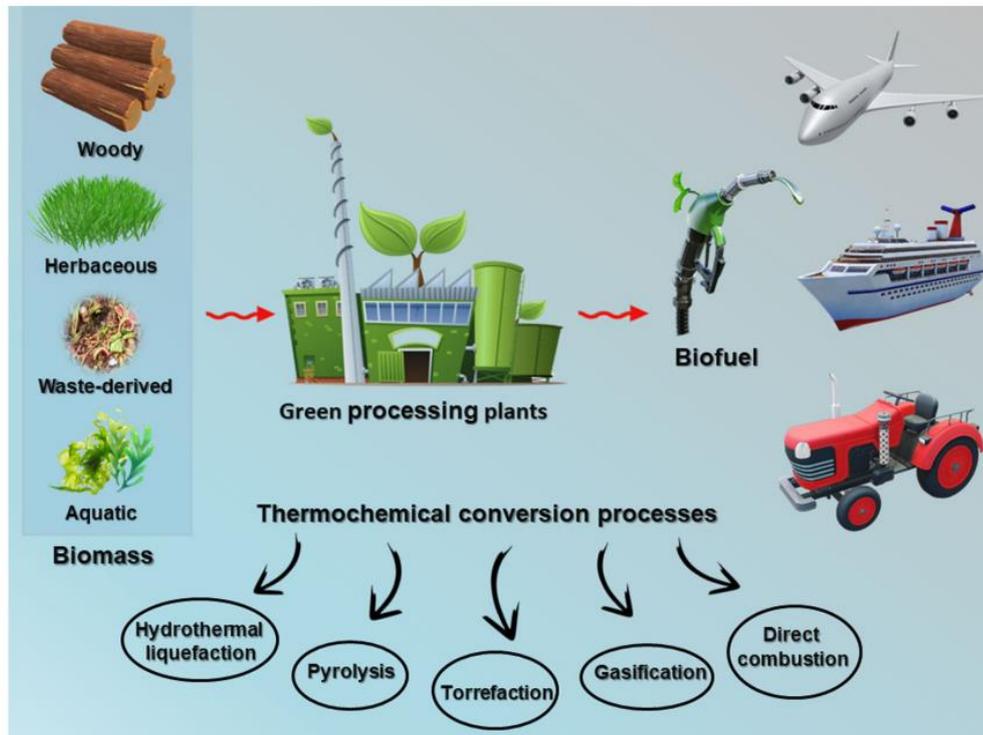
La bioenergía se vislumbra como una alternativa prometedora a los combustibles convencionales en un futuro cercano, ofreciendo la posibilidad de abordar eficazmente los desafíos actuales relacionados con el trilema energético, ambiental y alimentario que ha prevalecido en el mundo en tiempos recientes[60].

La aplicación de metodologías avanzadas en la evaluación del potencial bioenergético de los residuos agrícolas desempeña un papel crucial en el fomento de fuentes energéticas sostenibles y la mitigación de emisiones de carbón[61], estos desechos, que incluyen paja, cáscaras y rastrojos, representan una proporción significativa, entre el 30% y el 40%, del rendimiento total de cultivos fundamentales como arroz, trigo y maíz[62].

Estos subproductos agrícolas, frecuentemente considerados desechos, tienen un potencial sustancial para la bioenergía, y constituyen alrededor de 38 EJ anualmente en todo el mundo, aproximadamente el 20% del uso mundial de petróleo[62], la transformación de subproductos agrícolas en bioenergía se encuentra en sintonía con objetivos fundamentales de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible,

especialmente en el impulso de la energía renovable (ODS 7) y la gestión sostenible de los ecosistemas terrestres (ODS 15)[63]

Figura 21 Bioenergía, a partir de biomasa, diferentes procesos[64]



### 1.8 Bioenergía a partir del Bioetanol: Un Enfoque Detallado.

Para facilitar la movilidad de personas y productos, la sociedad moderna depende en gran medida de las máquinas de combustión interna que utilizan gasolina. Este combustible se obtiene mediante el proceso de refinación del petróleo, una fuente natural no renovable[65].

Frente a los desafíos de los problemas del suministro de combustibles en Ecuador, la academia, los institutos de investigación y los organismos gubernamentales deben explorar alternativas de producción, comparables a la gasolina, pero obtenidos de fuentes renovables, como los cultivos tropicales. El biodiesel y el bioetanol emergen como combustibles prometedores que cumplen con estas características[66].

El combustible diésel se utiliza en autobuses urbanos, locomotoras, generadores eléctricos, etc., y tienen un papel esencial función en la economía industrial de un país. El consumo de diésel en los países desarrollados ha aumentado continuamente durante las últimas décadas y se prevé que continúe en el futuro. Una posible alternativa a los combustibles fósiles es el uso de biodiesel. Consiste en ésteres metílicos de aceites vegetales o grasas animales, y pertenece a la categoría ecológica combustibles debido a su composición cualitativa (carbono 77%, hidrógeno 12%, oxígeno 11%, trazas de nitrógeno y azufre). Como combustible de origen biológico, se recomienda por la Unión Europea y clasificado como posible combustible futuro[67].

El bioetanol puede emplearse como biocombustible único o ser mezclado con gasolina en diversas proporciones, o utilizado como aditivo para mejorar las características de la gasolina, en varios países, se emplea el bioetanol como una mezcla que abarca los rangos de E5 a E25 (etanol del 5% al 25%, gasolina del 95% al 75%), siendo aplicada en vehículos convencionales sin necesidad de modificar los motores. Esta práctica está vigente en países como Brasil, Estados Unidos, Europa y Occidente. Por otro lado, en Europa, se han utilizado mezclas como E85 y E100 (bioetanol hidratado con aproximadamente un 5% de humedad) para impulsar vehículos de combustible flexible (Flex fuel)[68]. En el caso específico de Ecuador, se utiliza la mezcla E5 (5% de bioetanol y 95% de gasolina con un octanaje de 85), de acuerdo con la norma NTE INEN 935.

Los biocombustibles se clasifican comúnmente en diversas categorías denominadas biocombustibles de primera, segunda y tercera generación [16], dependiendo de las Materias primas y tecnología de conversión utilizadas para su producción:

- Los biocombustibles de primera generación se producen a partir de cultivos específicos de cultivos específicos para fines alimentarios (es decir, materias primas para cultivos alimentarios). Ellos son elaborados principalmente a partir de azúcar, almidón y aceite vegetal.

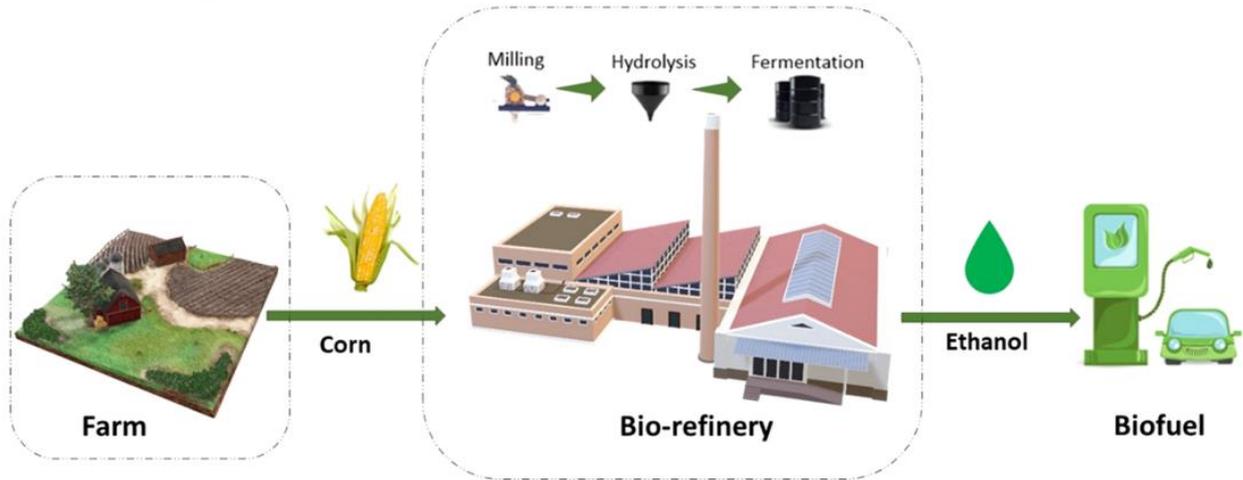
- Los biocombustibles de segunda generación son productos de base biológica que provienen a partir de materias primas no alimentarias, es decir, biomasa lignocelulósica como materia prima agrícola y forestal. Incluyen residuos producidos por sistemas agrícolas y de procesamiento de alimentos (desechados biomasa).
- Los biocombustibles de tercera generación se producen a partir de cultivos acuáticos y algas[69].

La tecnología de producción de biocombustibles de primera generación es la más madura. Los tipos de biomasa más populares utilizados en la producción de biocombustibles de primera generación incluyen principalmente el maíz y la caña de azúcar, los cuales son ampliamente utilizados en varios países. En concreto, el bioetanol se produce en plantas de biorrefinería utilizando como materia prima el grano de maíz adquirido en las granjas cercanas. Estas plantas de biorrefinería generalmente emplean un sistema de molienda de martillos para procesar el maíz, preparándolo para la hidrólisis y fermentación destinadas a la producción de bioetanol[70].

No obstante, el empleo histórico del maíz y caña de azúcar, alimentos destinados al consumo humano y animal genera una competencia entre su uso para la alimentación y su utilización en la producción de energía, esta situación puede dar lugar a escasez de alimentos, afectando especialmente a aquellos países en desarrollo[71].

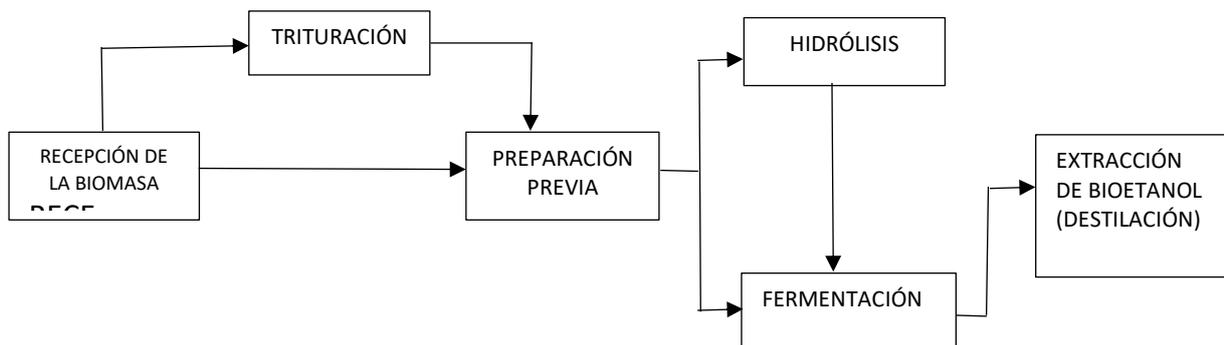
Para superar esta importante limitación de los biocombustibles de primera generación, se propone la adopción de biocombustibles de segunda generación, los cuales principalmente emplean materia no destinada al consumo humano de cultivos, como rastrojos de maíz, tallos azules grandes, tallos de sorgo y paja de trigo,[72]. La industria del bioetanol de segunda generación en Ecuador es incipiente, debido al predominio del uso de caña de azúcar como cultivo energético en la producción de bioetanol en el país. Además, aún no se ha establecido una planificación clara respecto a los biocombustibles de segunda generación.

Figura 22 Fabricación de bioetanol de primera generación a partir de maíz[73]



En la última década, la producción mundial de biocombustibles, como el bioetanol y el biodiesel, ha experimentado un notable crecimiento. Sin embargo, la producción comercial de biocombustibles de segunda generación se encuentra actualmente en desarrollo[74]. Este tipo de biocombustibles enfrenta un alto costo de inversión inicial, lo cual se traduce en un costo de productos superior al de los combustibles fósiles. El proceso preponderante para la producción de biocombustibles de segunda generación es el proceso bioquímico[75]

Figura 23 Secuencia de fases para la obtención de bioetanol de primera y segunda generación[76]



La recepción de la biomasa que implica la adquisición y preparación de la materia prima. Inicialmente, se realiza la recolección de la biomasa, que puede ser diversa, para biocombustibles de segunda generación incluyen residuos agrícolas, maderas, entre otros desechos no exclusivos para generación de energía. Luego, se lleva a cabo el transporte hacia el lugar de procesamiento, donde se procede a su almacenamiento y triturado para obtener partículas más finas (eso en el caso de la biomasa lignocelulósica), Este pretratamiento facilita las etapas subsiguientes de conversión. Es esencial asegurar la calidad y uniformidad de la biomasa recibida, ya que esto impacta directamente en la eficiencia de las operaciones de conversión y, por ende, en la producción final de bioetanol[77], en el caso del mucílago del cacao, al ser una biomasa líquida, no aplicaría la trituración.

La preparación previa de la biomasa en el proceso de obtención de bioetanol es de suma importancia, dado la intrincada estructura de la biomasa. La literatura científica presenta una amplia gama de pretratamientos diseñados para potenciar la digestibilidad de los materiales. Dado que las propiedades fisicoquímicas y el comportamiento varían significativamente entre diversas materias primas, se hace imperativo aplicar el pretratamiento más idóneo, adaptado a las características específicas de cada tipo de biomasa[78]

La hidrólisis representa un proceso químico fundamental mediante el cual las macromoléculas presentes en la biomasa, particularmente la celulosa y la hemicelulosa, experimentan una descomposición en unidades más simples, como azúcares[79]. Este procedimiento implica la ruptura de enlaces químicos mediante la introducción de agua y, con frecuencia, la participación de enzimas catalíticas. Su propósito reside en optimizar la conversión de la biomasa en productos utilitarios, como el bioetanol, al tornar los azúcares más susceptibles a procesos consecutivos, como la fermentación[79]. La hidrólisis desempeña un papel crucial en la producción de biocombustibles de segunda generación, posibilitando la

eficiente utilización de materiales no destinados al consumo humano, como los residuos agrícolas[80].

A diferencia de la producción de licor intermedio por hidrólisis del almidón, que es glucosa C6 pura, el pretratamiento de biomasa y la hidrólisis enzimática producen una mezcla de azúcares C5 y C6 que requieren microorganismos de fermentación especializados para maximizar el rendimiento, con el producto más desarrollado hasta la fecha siendo etanol. Otra complejidad que surge para la fermentación de azúcares lignocelulósicos en comparación con la fermentación basada en almidón es que el hidrolizado resultante del pretratamiento de la biomasa y la hidrólisis enzimática contiene impurezas que reducen o inhiben la productividad de la fermentación[81]

La fase de fermentación implica la conversión de los azúcares liberados durante la etapa de hidrólisis enzimática en etanol y dióxido de carbono, a través de la actividad de microorganismos apropiados, principalmente levaduras[82]. Estos microorganismos pueden ser cepas naturales que metabolizan azúcares de seis carbonos, cepas que consumen tanto azúcares de seis como de cinco carbonos, microorganismos genéticamente modificados para aprovechar todo el sustrato presente en el medio o un cultivo mixto que realiza una co-fermentación[83].

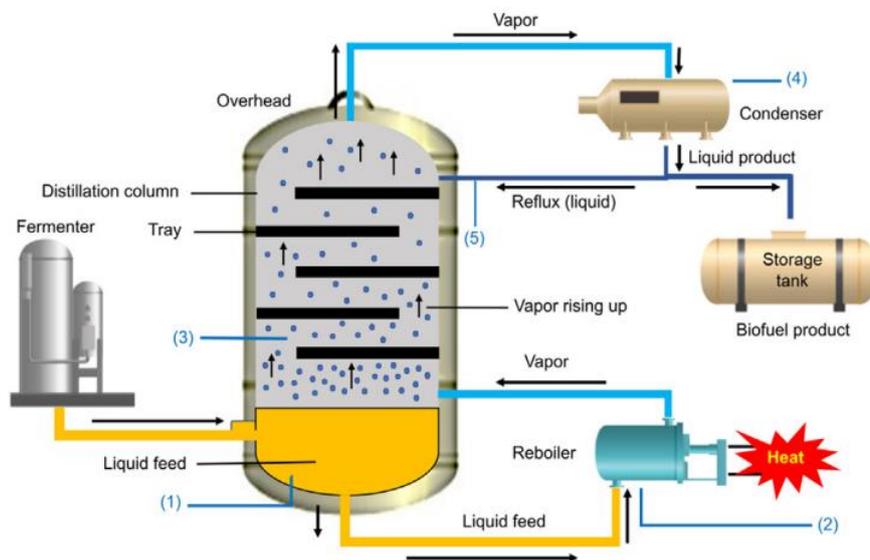
Es un proceso mediante el cual microorganismos o enzimas microbianas se emplean para generar ácidos orgánicos y alcohol. Durante este procedimiento, se generan diversos metabolitos secundarios, como antibióticos, biosurfactantes, enzimas y factores de crecimiento. En esta fase, los monosacáridos liberados mediante la hidrólisis de polisacáridos de la biomasa lignocelulósica (LCB) se transforman en ácidos orgánicos o en combustible. La fermentación en estado sólido (o sustrato) (SF) es un método que utiliza sustratos con escasa o nula presencia de agua libre. Estos sustratos permiten el crecimiento microbiano al mantener cierto contenido de humedad que respalda el desarrollo y metabolismo microbiano[60].

La destilación, en la producción de etanol, se enfoca en la purificación y concentración del alcohol generado durante la fermentación. Tras la fermentación, donde los azúcares se convierten en etanol, el líquido resultante compone una mezcla

con etanol, agua y otros compuestos[84], este proceso de destilación fraccionada es empleado para la separación del etanol, agua y otros componentes en la producción del biocombustible[85]. Al aprovechar las diferencias en los puntos de ebullición de los componentes, en particular, del etanol y el agua, la destilación se convierte en un método eficaz de separación, este proceso destilatorio contribuye a la obtención de un producto final de etanol altamente concentrado y puro, requisito fundamental para su aplicación como biocombustible[86]. La elevada pureza del etanol garantiza un rendimiento eficiente y una combustión óptima al ser utilizado como combustible en motores de combustión interna[87].

La destilación es un proceso ampliamente empleado en la separación de mezclas líquidas, generando un sistema de dos fases donde la mezcla líquida interactúa estrechamente con una segunda fase. En este contacto, se establecen condiciones termodinámicas que propician que el componente deseado de la mezcla líquida ingrese a la segunda fase en forma de vapor. Aunque muchos procesos de separación utilizan métodos de dos fases, en la destilación, la segunda fase se genera mediante la vaporización parcial de la mezcla líquida. Los sistemas de destilación emplean calor en forma de energía, lo cual se puede ajustar con facilidad según las necesidades del proceso[88].

Figura 24 Modelo de una unidad de destilación simple, empleado en la separación de biocombustible líquido de la alimentación líquida[89]



La Figura 24 presenta el modelo de un sistema de destilación general utilizado para separar el biocombustible de la alimentación de fermentación. Se implementan diversas técnicas de destilación según factores como los componentes de la mezcla, el producto a separar, el tamaño y volumen del producto, entre otros. Algunas técnicas ampliamente reconocidas son la destilación extractiva, heterogénea, por cambio de presión, reactiva (RD), adsorción, separación por membranas y sistemas híbridos[90]. Además, se aplican técnicas de destilación que optimizan el uso de energía, como la destilación asistida por membranas, la hidrodestilación asistida óhmica y métodos de calor integrado[89].

### **1.9 Desarrollo y Aplicaciones del Bioetanol en Motores de Combustión Interna.**

Los alcoholes predominantes que se emplean, ya sea como integrantes en mezclas de combustible con gasolina o como la fracción preponderante en la mezcla combustible, son el metanol, etanol y butanol. Tanto el metanol ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ) como el etanol ( $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ) se caracterizan por poseer uno y dos átomos de carbono, respectivamente, sin presentar isómeros. Por otro lado, el butanol ( $\text{C}_4\text{H}_9\text{OH}$ ) cuenta con cuatro átomos de carbono y exhibe cuatro estructuras isómeras distintas. Esta diversidad estructural entre los alcoholes mencionados brinda opciones significativas en la formulación de mezclas de combustibles, permitiendo adaptarse a distintas especificaciones y requisitos de rendimiento en aplicaciones variadas[91].

El etanol tiene una larga trayectoria como combustible para motores de combustión interna, remontándose a 1826 cuando Samuel Morey empleó etanol y trementina para propulsar un motor que él mismo diseñó. Nicolaus Otto, creador del ciclo Otto, también utilizó etanol en uno de sus motores. En 1896, Henry Ford construyó su primer automóvil que operaba con etanol puro. En respuesta a la crisis petrolera de la década de 1970, se produjo un renovado interés en el uso de etanol, marcando un hito en la historia de los biocombustibles[60].

En un período reciente, se ha observado un cambio en la preferencia del uso de bioetanol puro en motores de combustión interna. Por ejemplo, en Brasil desde 2016, se requiere que el 27,5% del etanol se mezcle con gasolina. En los Estados Unidos,

la producción de bioetanol a base de maíz es predominante y se incorpora en un 10% a la gasolina en varios estados[92]. En Turquía, la gasolina debe contener al menos un 3% (v/v) de etanol producido a partir de productos agrícolas nacionales, según el Comunicado No. 28346 publicado en el Diario Oficial en 2012. A pesar de tener uno de los precios más altos del gas en comparación con otros países de la OCDE, en Turquía, se observa un aumento en la demanda de bioetanol como un sustituto más adecuado de la gasolina[93].

La combinación de bioetanol con gasolina se expresa por la notación E, seguida de un número que indica el porcentaje de bioetanol en la mezcla. En Ecuador, se utiliza la mezcla E5, lo que implica un 5% de bioetanol y un 95% de gasolina extra (85 octanos RON). En otros países, como Costa Rica, se emplea la mezcla E10, con un aumento al 10% de bioetanol, combinado con gasolina de 95 octanos RON (en ambos países, la principal materia prima para el bioetanol es la caña de azúcar). Las proporciones de la mezcla varían según las especificaciones detalladas en la Tabla 3, adaptándose a las regulaciones de cada nación.

*Tabla 3 Mezclas de bioetanol usadas en algunos países[92]*

<b>PAIS</b>	<b>MEZCLA DE BIOETANOL</b>	<b>BIOMASA UTILIZADA</b>
Ecuador	E5	Caña de Azúcar
Estados Unidos	E3	Maíz
	E5	Soja
	E10	Sorgo
	E85	Trigo
Suecia	E5	Centeno
		Soja
	E85	Trigo
Australia	E3	Caña de azúcar
	E5	Trigo
	E10	Soja
	E10	Maíz
China		Caña de Azúcar
Colombia	E10	Caña de Azúcar
Perú	E10	Caña de Azúcar
Brasil	E22	Caña de Azúcar
	E25	Soja
	E26	

En la Tabla 3 se presentan países que utilizan biocombustibles, ajustándose a sus regulaciones internas. Colombia y Perú optan por mezclas E10, mientras que Suecia y Estados Unidos destacan por el uso de mezclas que llegan hasta E85, reflejando un mayor contenido de bioetanol. Brasil, por su parte, muestra casos excepcionales, empleando incluso mezclas E100, compuestas completamente por etanol. Para utilizar bioetanol en esta proporción, se requieren vehículos con tecnología Flex Fuel, capaces de funcionar tanto con gasolina al 100% como con biocombustibles en mezclas de E85 a E100, sin pérdida de potencia. La introducción de vehículos Flex Fuel en Brasil comenzó en 2003, logrando una rápida preferencia de los consumidores y estimulando la producción de motores de este tipo por parte de los fabricantes de automóviles. El parque vehicular Flex Fuel creció significativamente, representando el 62,7% en 2017, en comparación con el 10,8% en 2006, evidenciando una preferencia del 88,6% en vehículos comerciales ligeros con licencia, en contraste con el 3,2% de los vehículos de gasolina y el 8,2% de los diésel [94].

Los primeros vehículos de combustible flexible Flex Fuel de etanol fueron conversiones de vehículos de combustible flexible de metanol/gasolina M85, e implica que los primeros vehículos con capacidad de etanol eran efectivamente de combustible triple flexible entre los dos alcoholes y la gasolina[95].

La existencia de vehículos totalmente flexibles en Brasil, ilustra ampliamente la facilidad con la que se puede fabricar un vehículo con capacidad multicomcombustible, siempre que los combustibles sean miscibles en el tanque y el sistema de gestión del motor sea capaz de ajustarse solo.

El hecho mencionado anteriormente de que el E100 hidratado puede usarse en vehículos totalmente flexibles ilustra que la presencia de agua no es un inhibidor del funcionamiento del vehículo (aunque se acepta que los materiales del sistema de combustible deben ser capaces de resistir cualquier combinación de gasolina, etanol, metanol y agua, y que la presencia de agua en cualquiera de esas mezclas puede ser un problema para la industria de suministro de combustible)[91].

En 2006, técnicos de Toyota Motor Company, realizaron experimentación en un motor de encendido convencional de serie (1NZ-FE) con inyección electrónica de combustible, de aspirado natural y una relación de combustión del 13:1, que generalmente se usa en el Toyota Corolla, el ensayo se realizó comparando el rendimiento del motor usando gasolina de 92 octanos RON y varias mezclas E, descubrieron que el par aumentaba en un 5% y un 20% usando E100 en comparación con la operación con gasolina de 100 RON y 92 RON, respectivamente.

Las mejoras totales en el par debido a la posibilidad de ejecutar el tiempo de encendido MBT fueron evidentes para el E50[96], destacando la versatilidad del bioetanol, y su idoneidad para motores de combustión interna, incluso en ausencia del sistema Flex Fuel. Su capacidad para integrarse efectivamente en motores convencionales muestra la viabilidad de su uso.

En varios países, como Bangladesh, Colombia, Ecuador, Indonesia, Egipto, Ucrania y Uzbekistán, aún se emplean gasolinas con índices de octanaje bajos, entre 85 y 90 octanos RON. Sin embargo, el uso de tales combustibles de bajo octanaje plantea desafíos en la era moderna, dado que los motores contemporáneos están diseñados con relaciones de compresión elevadas, lo que demanda la utilización de gasolinas de alto octanaje (con un RON de 97 o superior)[97], En este contexto, el bioetanol emerge como una alternativa viable en Ecuador, ofreciendo una solución compatible con las demandas tecnológicas actuales.

Considerando los aspectos previamente expuestos, la implementación de biocombustibles se presenta como una alternativa estratégica frente a la dependencia de combustibles fósiles en el contexto ecuatoriano. Dada la significativa importación de Nafta y los subsidios a la gasolina, la transición hacia el uso de biocombustibles surge como una contribución sustancial para mitigar la crisis energética en el país. La adopción de esta solución no solo impulsa la seguridad energética, sino que también se alinea con objetivos medioambientales, promoviendo una matriz energética más limpia y sostenible.

## **1.10 Bioenergía a partir de procesos termoquímicos de transformación de biomasa**

El uso de biomasa para calefacción y luz ha sido fundamental en el desarrollo de la civilización, desde el encendido de la primera antorcha. A lo largo de la historia, la biomasa ha desempeñado un papel significativo en la provisión de energía en las sociedades humanas. A medida que el mundo desarrollado adoptó combustibles de alta densidad energética, como turba, carbón, gas y petróleo, la biomasa experimentó un declive durante la Revolución Industrial[98].

Sin embargo, con las crecientes preocupaciones sobre el calentamiento global y la seguridad energética, la biomasa está recobrando importancia y se convierte en un componente esencial del mix energético. Aunque inicialmente se utilizó a pequeña escala para aprovechar residuos industriales, en la última década, la biomasa ha ganado popularidad como fuente clave de combustible renovable para la generación de energía. El co-encendido de biomasa con carbón marcó el primer paso hacia su despliegue a gran escala en estaciones de energía. Sin embargo, en respuesta a las crecientes preocupaciones sobre el cambio climático, las políticas actuales favorecen conversiones completas de plantas o la construcción de nuevas instalaciones, alejándose del co-encendido que aún implica la quema de carbón[99].

La búsqueda de nuevas fuentes de energía es una de las principales preocupaciones de la economía y la industria actuales. Entre las posibles soluciones, la agricultura y residuos forestales o en general residuos de biomasa pueden utilizarse como materia prima para generar energía, productos químicos y carbón activado[100]

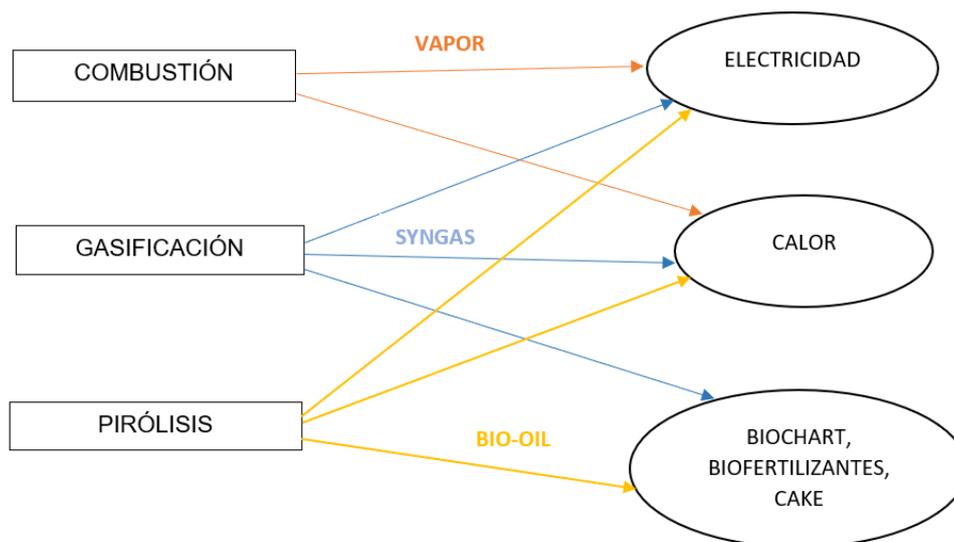
La biomasa constituye un material biológico obtenido de seres vivos o recientemente organismos disponibles, aprovechable de manera renovable y compuesto por una compleja mezcla de carbono, nitrógeno, hidrógeno y oxígeno.

Estos recursos renovables abarcan diversas formas de materiales orgánicos, como la materia vegetal, tanto en su estado vivo como en forma de residuos, así como la materia animal y sus subproductos. A nivel mundial, varios recursos de biomasa se transforman en bioproductos mediante distintos procesos de conversión en las cadenas de producción basadas en biomasa[101].

Las fuentes de biomasa poseen un considerable potencial como materias primas renovables destinadas a transformarse en formas útiles de energía, como la energía eléctrica, térmica y diversos biocombustibles. Este potencial se explora mediante una diversidad de tecnologías de conversión y opciones de proceso, adaptadas a distintas escalas de aplicación[102].

Los procesos de conversión de biomasa se dividen principalmente en dos categorías: procesos bioquímicos, discutidos detalladamente en la sección de biocombustibles debido a la obtención de bioetanol a partir del mucílago del cacao; y procesos termoquímicos, representados en la Figura 25, utilizados para la transformación de biomasa sólida, de la cáscara de la vaina del cacao. Estos procesos se aplican a distintos tipos de biomasa, incluidos los residuos agroindustriales generados durante la refinación del cacao.

*Figura 25 Procesos Termoquímicos de transformación de biomasa[102].*



Debido a la extensa diversidad de materias primas, existen diversos procesos para la conversión de biomasa en energía directa, combustibles y productos químicos. Una solución técnica eficaz es la aplicación de tecnologías de conversión, como la pirólisis, gasificación o combustión de biomasa. Sin embargo, antes de tener en cuenta cualquiera de los procesos de pirólisis convencional hay que tener en cuenta que la tecnología convencional generalmente se percibe como no óptima para la producción de gas, dado su bajo rendimiento gaseoso (normalmente inferior al 40% en peso) y los problemas de corrosión asociados en equipos aguas abajo, como turbinas o motores de gas, ocasionados por los elevados contenidos de vapores de alquitrán presentes en la fase gaseosa[103].

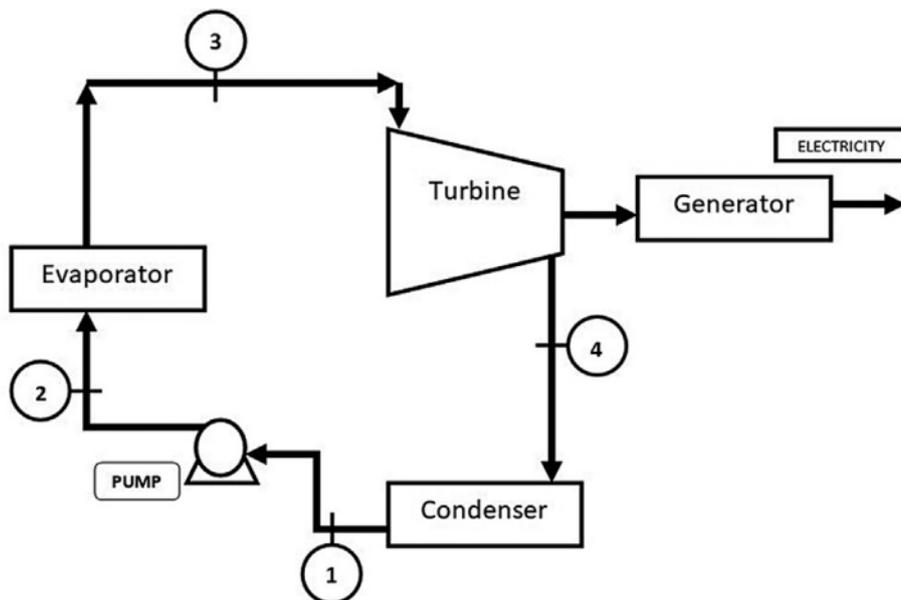
### 1.10.1 Combustión directa de biomasa.

En el futuro, la combustión de biomasa desempeñará un papel importante en la producción de energía para obtener electricidad o calefacción[103], en el caso de Ecuador al ser un país con la crisis en el suministro de electricidad, resulta imperante la investigación de este proceso, y obtener los potenciales energéticos de la biomasa de la zona.

La combustión se define como una reacción exotérmica entre el combustible y el oxígeno, produciendo principalmente dióxido de carbono y vapor de agua. La energía liberada se aprovecha para la generación de electricidad a través de un ciclo de

Rankine[104]. Durante la combustión de biomasa, se producen gases con temperaturas entre 800-1000°C; Cabe señalar que, en la práctica, la combustión sólo es factible para biomasa con un contenido de humedad inferior al 50%[105]. Una de las ventajas notables de este proceso radica en la utilización de la turbina de vapor, la cual está acoplada a un generador síncrono generalmente de polos salientes. Este enfoque asegura una integración eficiente en la red eléctrica, adaptándose de manera óptima al comportamiento de la carga y al despacho centralizado de unidades generadoras en el sistema eléctrico.

Figura 26 Ciclo Rankine básico para generación de electricidad por medio de combustión directa de biomasa[104]



En la Figura 26 se puede apreciar el Ciclo Rankine que es un ciclo cerrado, de combustión externa que usa agua en su fluido de trabajo y consta de 4 componentes como muestra la figura.

1. Condensador
2. Bomba.
3. Boiler o Caldera.
4. Turbina.

El agua, inicialmente en estado líquido saturado tras pasar por el condensador 1, es dirigida por la bomba 2 hacia la caldera o boiler 3 mediante un proceso de compresión. En la caldera, se quema la biomasa liberándose calor, transformando así el agua en vapor saturado. Este vapor se dirige a la turbina de vapor 4, donde experimenta un proceso de expansión o trabajo. La turbina está acoplada a un generador síncrono de polos salientes, convirtiendo la energía cinética de rotación en electricidad que se integra directamente a la red. Posteriormente, el vapor húmedo resultante fluye hacia el condensador en el proceso rechazo de calor, repitiendo el ciclo[106].

Hoy en día, la producción de energía eléctrica a partir de turbinas de vapor de calderas de combustión directa de biomasa es una tecnología madura. Mejor control sobre el proceso de combustión logra una mejor conversión de carbono, mayor eficiencia, y menores emisiones con más flexibilidad de combustible. La mayor parte de la materia prima proviene procedente de la industria de productos forestales (pasta, papel, madera, etc.) y se consume internamente para el calor del proceso.

Las centrales eléctricas de combustión directa de biomasa en operación comercial tienden a ser de pequeña escala, con capacidades típicas alrededor de 20 MW, y presentan eficiencias relativamente más bajas, oscilando entre el 17% y el 25%, en comparación con los generadores de turbinas de vapor que emplean ciclos combinados de carbón o gas natural [81].

El potencial de la biomasa para generación de energía y de calor mediante procesos de combustión directa, implica algunos elementos tales como: heterogeneidad intrínseca de la biomasa (debido a sus diferentes orígenes), alto contenido de humedad, baja densidad aparente, poder calorífico bajo (LHV), la degradación y la estacionalidad dificultan su uso directo como sustituto del carbón. La biomasa se puede mejorar cuando sea necesario mediante un pretratamiento: la biomasa mejorada es más estable frente a la degradación y las variaciones del contenido de humedad, y tiene mayor LHV, mayor densidad aparente y menor contenido de humedad que la biomasa cruda [107]

Para el uso en procesos de combustión directa, es importante caracterizar la biomasa, la mayoría de los procesos se escalan en función de la materia seca disponible, por lo que el contenido de humedad es una propiedad fundamental que necesita ser medida, este ensayo se lo realiza con la norma UNE-EN 14774-2[108].

Las propiedades de degradación térmica de los materiales lignocelulósicos están profundamente influenciadas por su composición química, que incluye celulosa, hemicelulosa y lignina. El análisis de las curvas termogravimétricas (TG) y de tasa de descomposición térmica (DTG) ofrece una comprensión semicuantitativa de los procesos de degradación térmica que tienen lugar durante la conversión termoquímica bajo diversas atmósferas. Por lo tanto, la comparación termogravimétrica de diferentes materiales puede proporcionar información valiosa sobre las diferencias asociadas a su composición lignocelulósica. Por otro lado, durante la pirólisis de biomasa se generan tres fases: sólido (carbón), líquido y gas, lo que destaca la complejidad de los procesos involucrados en la conversión térmica de la biomasa[109].

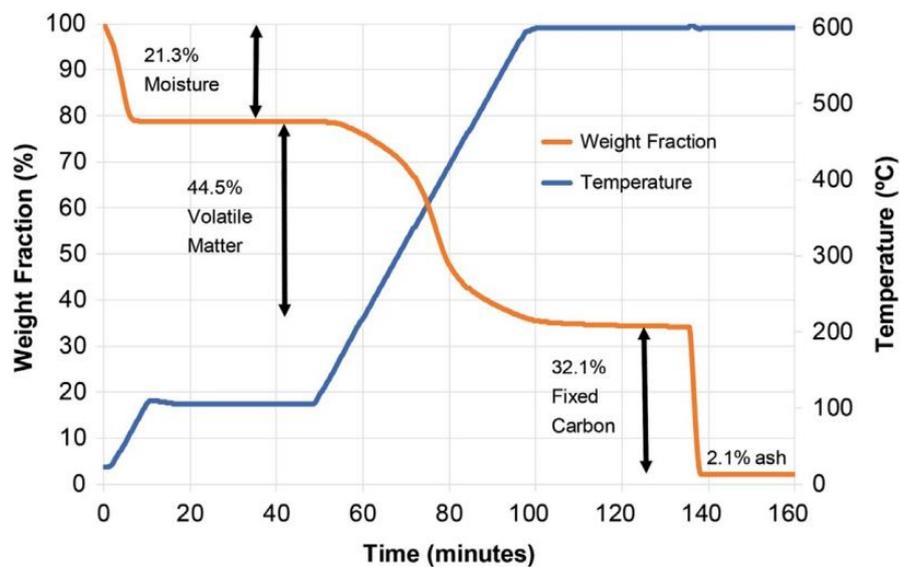
El análisis de combustibles ha evolucionado a partir de la investigación en combustibles sólidos como el carbón, combustible cuya energía química almacenada se divide en dos formas principales: carbono fijo y volátiles. El contenido de volátiles o materia volátil (VM) de un sólido representa la fracción que se libera en forma de gas, incluida la humedad, mediante calentamiento (a 950 °C durante 7 minutos). Por otro lado, el contenido de carbono fijo (FC) se refiere a la masa restante después de las liberaciones de volátiles, excluyendo cenizas y humedad. Para determinar VM y el contenido de FC de los combustibles de biomasa, se realizan pruebas de laboratorio. Este tipo de análisis, basado en VM, cenizas y humedad, con el FC determinado por la diferencia, se conoce como análisis proximal de un combustible[105].

El contenido de humedad es una de las mediciones realizadas durante el análisis proximal, que también evalúa el contenido de materia volátil, carbono fijo y cenizas de una muestra, siguiendo el estándar ASTM D5142. En una prueba típica, se carga una pequeña muestra (10 mg) en un analizador termogravimétrico (TGA).

La temperatura aumenta a 10 °C/min en un ambiente de helio u otro gas inerte hasta alcanzar los 105 °C. La pérdida de peso en este punto se utiliza como medida del contenido de humedad. Posteriormente, el cambio de peso al aumentar la temperatura desde 105 °C hasta 600 °C a una velocidad de 10 °C/min se utiliza para determinar el contenido de volátiles. A 600 °C, el gas cambia de inerte a aire, y el cambio de peso resultante mide el carbono fijado en la muestra que se quema. La masa residual después de la oxidación representa la cantidad de cenizas presente en la muestra[110].

La Figura 27 muestra una curva típica de perfil de análisis proximal, por medio de análisis Termogravimétrico TGA.

Figura 27 Curva típica de análisis termogravimétrico (fracción de peso y temperatura) para análisis proximal de una muestra sólida de biomasa[110].



La biomasa contiene una diversidad de compuestos complejos, humedad y una minoría de impurezas inorgánicas, conocidas como cenizas. Los compuestos orgánicos predominantes se componen principalmente de cuatro elementos: carbono (C), hidrógeno (H), oxígeno (O) y nitrógeno (N). Además, la biomasa puede contener trazas de cloro (Cl) y azufre (S). Para obtener información precisa sobre la composición, es necesario realizar un análisis final de la biomasa[111], a la medición

de estos parámetros se denomina análisis elemental (CHONS) y se realiza según ASTM D5373[110].

El poder calorífico de la biomasa es un parámetro importante para la planificación y el control de centrales eléctricas que utilicen este tipo de combustible, el procedimiento para encontrar este importante parámetro se deriva de la norma UNE-EN 14918[112].

Es importante que la biomasa antes del proceso de combustión tenga un proceso de pretratamiento llamado peletización, En comparación con otras tecnologías de mejora de la biomasa, la peletización es un proceso eficiente, sencillo y de bajo coste[113]. El proceso de producción de pellets se basa en una serie de etapas en las que se trata la biomasa para obtener un material compactado y densificado, los criterios para evaluar la calidad de los pellets generalmente son:

- Diámetro
- Longitud.
- Densidad aparente.
- Contenido de humedad.
- Contenido de cenizas.
- Materia volátil.
- Carbono fijo.
- Poder calorífico superior [114]

*Figura 28 Muestras de pellets producidos a: pellets de espigas de maíz, b: pellets de madera de Movingui[115]*



El uso de pellets en procesos de combustión de biomasa presenta varias ventajas. Los pellets ofrecen una forma densificada y de fácil manipulación de la biomasa, facilitando su almacenamiento y transporte. Además, su tamaño uniforme y contenido de humedad controlado contribuyen a una combustión más eficiente. La peletización también brinda la posibilidad de aprovechar una variedad de fuentes de biomasa para la generación de energía, promoviendo prácticas más sostenibles[116]

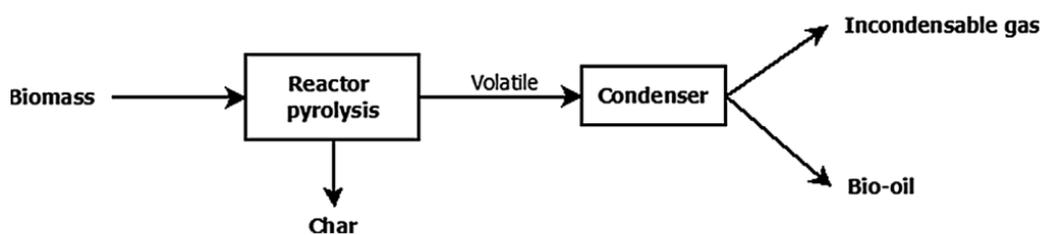
### **1.10.2 Pirólisis de biomasa.**

La pirólisis es el proceso de degradación térmica de un combustible sólido en una atmósfera inerte, sin oxígeno, lo que da lugar a la formación de un combustible líquido o gaseoso y un residuo sólido, conocido como "char", que contiene cenizas y el carbono fijo del combustible. Durante la pirólisis de combustibles sólidos, parte de la materia sólida se transforma en un flujo gaseoso denominado "vapores de pirólisis", que comprenden componentes condensables y gases no condensables. La fracción condensable de los vapores de pirólisis puede convertirse en un combustible líquido mediante un proceso de condensación, mientras que la fracción no condensable permanece en estado gaseoso incluso a temperatura ambiente. La composición de los gases no condensables generados suele incluir monóxido de carbono, dióxido de carbono, hidrógeno e hidrocarburos de bajo peso molecular. Las propiedades y cantidades de los productos sólidos, líquidos y gaseosos obtenidos después de la pirólisis de biomasa dependen principalmente de las características de la materia prima y de las condiciones operativas del proceso de pirólisis[117].

La pirólisis de biomasa produce una amplia variedad de productos. como gases, carbón vegetal, aceites ligeros y alquitranes. Temperatura y las velocidades de calentamiento suelen ser los factores que definen la Naturaleza de la pirólisis (convencional, flash, rápida, ...). La pirólisis convencional se aplica para obtener carbones como principales productos que pueden usarse como combustible, agentes reductores y materias primas para preparar productos activados[118]

El proceso de pirólisis se clasifica en tres tipos según las condiciones operativas utilizadas: pirólisis lenta, rápida y flash. Además, las proporciones y la composición de los productos de pirólisis también están influenciadas por las condiciones empleadas. La pirólisis lenta ocurre a temperaturas más bajas, con una velocidad de calentamiento menor y tiempos de residencia más prolongados, favoreciendo la producción de carbón. Por otro lado, la pirólisis flash implica un tiempo de reacción de solo unos segundos, con una velocidad de calentamiento muy alta, requiriendo partículas de tamaño pequeño debido al rápido calentamiento. La pirólisis rápida, que favorece la formación de bioaceite, ocurre a una temperatura moderada y presenta tiempos de residencia cortos y una velocidad de calentamiento elevada, aunque no tan alta como en la pirólisis flash[119]. La tecnología de pirólisis rápida ha experimentado un notable desarrollo en los últimos años para la producción de líquidos, ofreciendo ventajas significativas en almacenamiento y transporte. Esta tecnología puede presentar costos de inversión relativamente bajos y altas eficiencias energéticas, especialmente a pequeña escala, lo que la hace más atractiva en términos de inversiones de capital reducidas, eficiencia mejorada y aceptabilidad ambiental[120].

Figura 29 Esquema del proceso de pirólisis[121]



El material sólido carbonoso formado durante diversos procesos de conversión termoquímica se presenta en una amplia variedad de formas, porosidades y grupos funcionales, lo que le confiere diversas aplicaciones potenciales. En el contexto de la pirólisis, se destacan dos enfoques de carbonización que se han resumido en el apartado anterior: la pirólisis lenta, que se centra en maximizar la formación de carbono y representa la ruta tradicional hacia la producción comercial de carbón vegetal; y la pirólisis rápida, diseñada para maximizar la producción de biopetróleo con propósitos de biorefinería, pero que deja como subproducto una fracción

sustancial (aproximadamente del 15 al 30 % en peso), conocida como biochar en la literatura reciente[122].

La pirólisis rápida de biomasa tiene la capacidad de generar hasta un 60-70% en peso de bioaceite, utilizado como biocrudo en aplicaciones de biorrefinerías. Acompañando al bioaceite, se obtiene un 20-30 % en peso de biochar, que incluye tanto carbón como cenizas. La viabilidad económica de la producción de aceite de pirólisis como combustible intermedio o como flujo de alimentación para biorrefinerías se ha vinculado, en parte, a los muchos usos potenciales[123].

El biochar se produce mediante la descomposición termoquímica de biomasa a temperaturas de 200° a 900° C en atmósfera pobre de oxígeno, en el proceso de pirólisis[124]. El creciente interés en las aplicaciones beneficiosas del biochar ha dado lugar a investigaciones multidisciplinarias en ciencia e ingeniería. Las posibles aplicaciones del biochar abarcan el secuestro de carbono, la mejora de la fertilidad del suelo, la remediación de la contaminación y el reciclaje de subproductos agrícolas[125]. Los parámetros clave que influyen en sus propiedades incluyen la temperatura de pirólisis, el tiempo de residencia, la tasa de transferencia de calor y el tipo de materia prima.

El biochar, producto de la pirolisis de biomasa, encuentra diversas aplicaciones en la agricultura. Se destaca por su capacidad para secuestrar carbono, como se evidencia en estudios donde el biochar pirolizado a 500 °C logró mitigar hasta 380 g/kg de carbono cuando se aplicó en suelos arcillosos. En otro análisis, una combinación de suelo y biochar resultó en una reducción anual del 1,2% y 9,5% en la pérdida de carbono en comparación con el suelo sin biochar, que registró pérdidas del 10% y 13%[126].

Cabe mencionar que la degradación del biochar en el suelo varía, según investigaciones que indican que el biochar derivado de pasto a baja temperatura tiende a descomponerse más rápidamente que el obtenido de madera a alta temperatura [26]. A pesar de esta variabilidad, la estabilidad del biochar puede extenderse a varios años, tema abordado en numerosos estudios, en particular, se ha observado que el biochar derivado de temperaturas más bajas puede generar

mayores emisiones de CO<sub>2</sub> debido a su fácil descomposición microbiana. No obstante, estas emisiones tienden a estabilizarse después de aproximadamente una semana de descomposición[127].

En comparación con la biomasa, el biochar derivado de la pirólisis de biomasa presenta diversas ventajas, como una mayor densidad de energía y una estabilidad superior en comparación con la biomasa utilizada en la combustión directa [128]. Al igual que en el caso de la biomasa, el poder calorífico superior del biochar (HHV-BC) constituye uno de los atributos más significativos para reflejar la energía disponible [129]. Medir el poder calorífico superior siempre implica calcular la diferencia de entalpía entre la muestra antes y después de las reacciones de oxidación, mediante el uso de bombas calorimétricas como se mostró en apartados anteriores[129]. Sin embargo, el biochar obtenido tiene desventajas como su alto costo y el consumo de tiempo. Por lo tanto, desde una perspectiva de economía y viabilidad, resulta imperativo encontrar métodos más eficientes para obtener un mayor poder calorífico[130], siendo el biochar una alternativa que debe ser estudiada a profundidad.

El bioaceite es otro biocombustible líquido atractivo para un reemplazo más sostenible de los combustibles fósiles en el futuro. Es de un color oscuro, muy oxigenado. Líquido orgánico marrón que fluye libremente y que presenta una cantidad sustancial de agua (generalmente 25%) pero es insoluble en agua[131].

La biomasa se puede convertir en bioaceite mediante pirólisis rápida, que es un proceso de alta temperatura en el que la materia prima se calienta rápidamente en ausencia de oxígeno, se vaporiza y se condensa en una atmósfera oscura y es un líquido móvil marrón. La pirólisis rápida de biomasa es atractiva porque la biomasa se puede convertir fácilmente en productos líquidos. Estos líquidos, como el biopetróleo crudo, tienen ventajas en el transporte, almacenamiento, combustión, modernización y flexibilidad en la producción y comercialización[132].

Se pueden extraer varias sustancias químicas del bioaceite con potencial para ser aplicado en los siguientes sectores:

- Biocombustible (hidrógeno y combustible vía gas de síntesis).
- Productos químicos (resinas fertilizantes, aromas, y adhesivos),
- Calor (cocombustión de calderas y hornos).
- Energía (motores diésel y turbinas)[133].

Tipos de biomasa como aserrín de madera de pino, aserrín de muebles, cascarilla de arroz, residuos de caña de azúcar y hoja de maíz en diversos tipos de reactores en condiciones de pirólisis rápida mostraron eficiencias de conversión superiores al 56%[134]

### **1.10.3 Gasificación de biomasa.**

La gasificación, un proceso termoquímico crucial en la transformación de biomasa, desempeña un papel fundamental en la producción de productos valiosos como combustibles o materias primas químicas. Esta tecnología se presenta como una opción atractiva para la generación de combustibles gaseosos, como el gas de síntesis SYNGAS (una mezcla de H<sub>2</sub> y CO con contenido ligero de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>). Inicialmente, la gasificación se empleó para sintetizar petróleo mediante el proceso de Fischer-Tropsch, utilizando gas de hulla como materia prima, en una estrategia destinada a reducir las dependencias en la importación de recursos petroleros a gran escala. Sin embargo, en respuesta a las crecientes preocupaciones ambientales, como el calentamiento global y la búsqueda de una biosfera más limpia, ha surgido el desarrollo de unidades de generación de energía integradas mediante el ciclo combinado de gasificación (IGCC), buscando la obtención de combustibles más sostenibles[135].

Los principales parámetros operativos del gasificador se presentan a continuación:

- Tipo de gasificador.
- Diseño de gasificador.
- Temperatura de gasificación.
- Caudal de biomasa.

- Caudal de agentes oxidantes.
- Tipo de catalizadores.
- Cantidad de catalizadores.
- Tipo de biomasa.
- Propiedades de la biomasa[136]

Hay muchas configuraciones posibles para la gasificación y los gasificadores pueden ser clasificados con respecto a cuatro características distintas. Estos son los siguientes:

Agente de oxidación: Puede ser aire, oxígeno, vapor o una mezcla de estos gases.

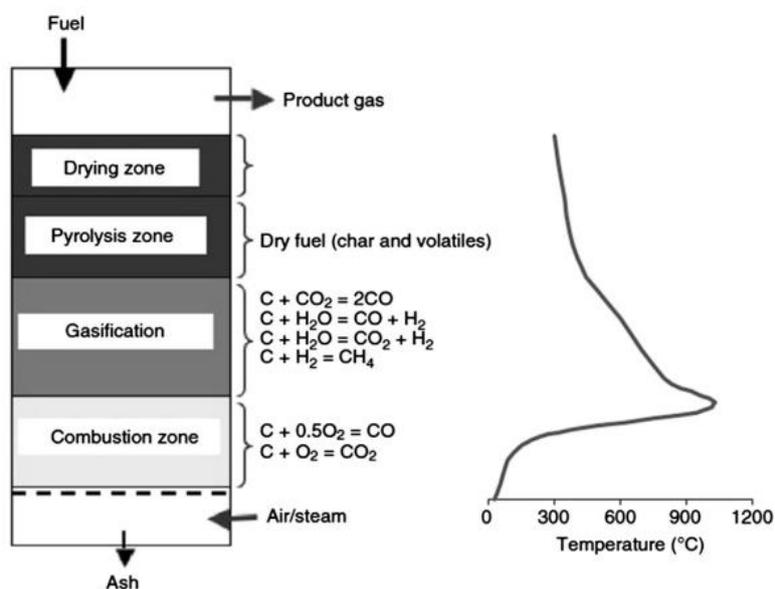
Calor para el proceso: Esto puede ser directo (dentro de la vasija del reactor mediante el proceso de combustión) o indirecto (proporcionado desde una fuente externa al reactor).

El nivel de presión: La gasificación puede tener lugar a presión atmosférica o a presiones más altas.

Tipo de reactor: Según el modo de contacto gas-sólido, estos son lecho fijo, lecho fluidizado o flujo arrastrado. Cada uno de estos se subdivide en tipos específicos. Los gasificadores de lecho fijo son de tres tipos: tiro ascendente (o tipo contracorriente), tiro descendente (o tipo cocorriente) y tiro cruzado

Cada uno suele estar diseñado para un sustrato específico, tasas de alimentación, características, y produce gas de síntesis de diferente calidad[137]

Figura 30 Esquema de un gasificador de corriente ascendente.[137]



El gasificador de corriente ascendente se usa comúnmente para biomasa y materiales de desechos sólidos. La figura 30 muestra el gasificador de corriente ascendente básico. La materia prima se introduce desde arriba y el material se mueve hacia abajo y pasa por las zonas de secado, pirólisis, reducción y oxidación del carbón. se pasa aire a través de una rejilla desde el fondo del gasificador, que proporciona un lecho para el sustrato y carbón, y el gas de síntesis producido fluye hacia arriba, en contracorriente al Flujo de sustrato y sale por la parte superior del gasificador[138].

En las últimas décadas, la gasificación de biomasa se ha desarrollado rápidamente como una tecnología de reacción termoquímica, que puede convertir eficientemente la biomasa en combustibles gaseosos. La gasificación de biomasa es la conversión de materiales combustibles en biomasa en gas sintético combustible SYNGAS [139] como se mencionó en el apartado anterior, en este proceso, la biomasa, está sometida a varios procesos que son:

1. Secado o calentamiento: La biomasa se somete a un proceso de secado a temperaturas entre 100 y 200 °C con el objetivo de disminuir su contenido de

humedad y reducir la concentración de agua en el material, bajando la humedad al 30-60% dependiendo de la biomasa.

2. Pirólisis: La biomasa se somete a un proceso de descomposición térmica, lo que resulta en la formación de carbonilla y gases volátiles. Este proceso involucra la degradación de diversos componentes de la biomasa, tales como celulosa, lignina y hemicelulosa. En esta etapa, se producen residuos sólidos y compuestos volátiles como subproductos.

3. Oxidación o Combustión Parcial: En esta etapa, los residuos de carbón y los compuestos volátiles formados experimentan un proceso de oxidación, resultando en la generación de vapor de agua, dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ). Este proceso, conocido como reacción exotérmica, se lleva a cabo con el apoyo de un agente gasificante a temperaturas superiores a  $700\text{ }^\circ\text{C}$ .

4. Gasificación: Después de que el carbono y los componentes volátiles han reaccionado con el vapor de agua o  $\text{CO}_2$ , que actúa como agente gasificante, se produce un proceso de reducción para formar gas de síntesis. Este fenómeno ocurre a temperaturas superiores a  $800\text{ }^\circ\text{C}$  en una reacción endotérmica[140]

La comercialización de tecnologías basadas en biomasa como alternativa a los combustibles fósiles es necesaria para un futuro sostenible[141], La producción de SYNGAS se fundamenta principalmente en el reformado con vapor de hidrocarburos o en la gasificación. En el caso de la producción de hidrógeno, el SYNGAS resultante se somete a un proceso de wáter gas shift para transformar el monóxido de carbono en dióxido de carbono. Sin embargo, para la producción de amoníaco, el oxígeno puede suministrarse en forma de aire. Aunque los hidrocarburos fósiles, como el gas natural y los fluidos petrolíferos, son las fuentes predominantes que se convierten en gas de síntesis, el uso de recursos renovables, como el producto de la gasificación de biomasa sólida y el biogás, ha emergido como un tema relevante en este ámbito[142].

La composición típica del SYNGAS se puede expresar como 20%  $\text{CO}$ , 20%  $\text{H}_2$ , 2%  $\text{CH}_4$ , 12%  $\text{CO}_2$  y 46%  $\text{N}_2$ , con un poder calorífico de aproximadamente  $5\text{ MJ/m}^3$ [143]. En comparación con la combustión directa de biomasa, la gasificación ofrece la ventaja adicional del almacenamiento y transporte sencillo del gas de síntesis desde el punto de producción hasta el punto de utilización. La capacidad

de una unidad de gasificación varía según el tipo de gasificador, oscilando entre 1 MW y aproximadamente 300 MW[144].

La eficiencia de conversión de biomasa a electricidad, según informes de la literatura, varía entre el 15% y el 43%, con un promedio del 27%[145]. En comparación con los combustibles fósiles, como el carbón, el costo de la electricidad derivada de la biomasa es más económico cuando se tienen en cuenta las externalidades ambientales, como la salud humana y la erosión del suelo. Además, la mayor emisión de CO<sub>2</sub> informada por una planta eléctrica de biomasa es menor que la de una planta de gas natural en un factor de 3 y la de una planta de carbón en un factor de 5[146].

## **2. OBJETIVOS.**

Esta Tesis Doctoral tiene como objetivo principal el estudio, clasificación y valoración de los residuos agroindustriales generados durante el proceso de refinación del cacao, con el propósito de explorar su viabilidad como fuente de energía renovable no convencional.

Con el fin de alcanzar el propósito mencionado, es esencial abordar los siguientes objetivos específicos:

- Identificar las distintas formas en que la biomasa derivada de los residuos agroindustriales del cacao puede ser convertida en energía utilizable.
- Evaluar las propiedades físicoquímicas del biocombustible derivado del proceso bioquímico de refinado de la biomasa líquida (mucílago) obtenida a través de la refinación del cacao.
- Valorar el rendimiento del motor de combustión interna mediante pruebas de la mezcla etanol-gasolina, comparándolo con los combustibles comerciales disponibles en el mercado.
- Determinar la viabilidad ambiental del biocombustible a través de pruebas de ruta reales, contrastándolo con los combustibles convencionales disponibles en Ecuador.
- Caracterizar la biomasa sólida obtenida mediante los procesos de refinación del cacao, evaluando sus propiedades físico-químicas con el fin de proporcionar información detallada sobre su composición y potencial aplicación como energía renovable.
- Establecer la eficiencia y viabilidad de diferentes procesos termoquímicos de conversión de biomasa, como la combustión directa, gasificación y la pirolisis, aplicados a las cáscaras de cacao, analizando la generación de productos útiles como, astillas, SYNGAS, bioaceite o biochar.

### **3. MATERIALES Y MÉTODOS.**

### 3.1 Selección de la materia prima usada para la experimentación.

Para la experimentación se determinaron los desechos producidos por la refinación del cacao CCN 51 (*Theobroma cacao*) con potencial importante para caracterizarlo como biomasa.

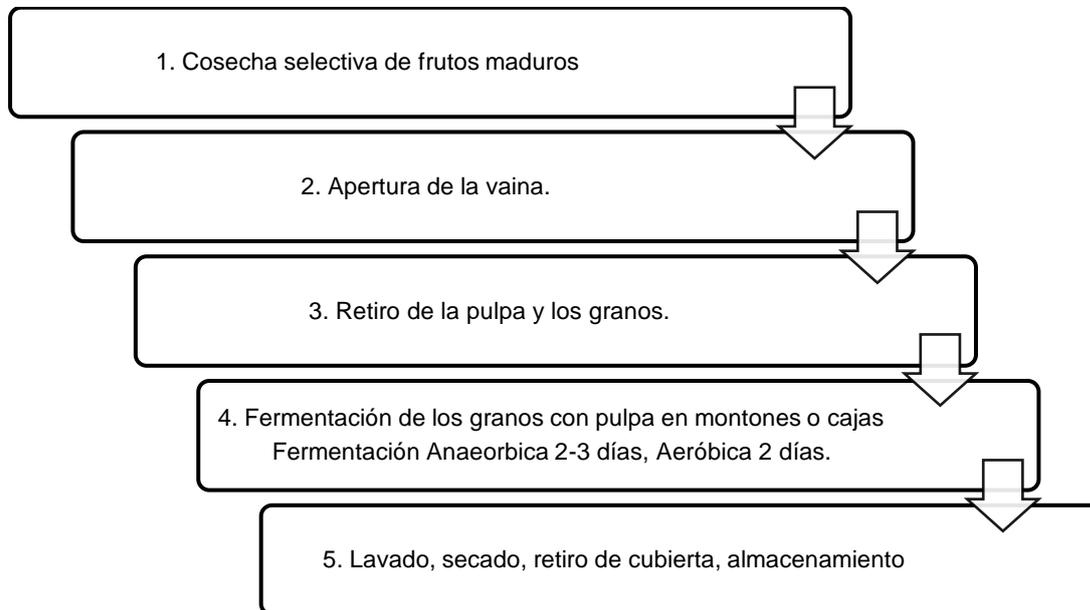
*Figura 31 Mazorcas de cacao recién cultivadas.*



El cacao representa el principal producto agrícola de exportación en varios países, entre ellos Ecuador, Costa de Marfil, Nigeria, entre otros, destacándose en la producción global de granos de cacao. Estos granos son sometidos a procesos de transformación para obtener licor de chocolate, cacao en polvo y manteca de cacao, que constituyen los ingredientes esenciales del chocolate y se utilizan en la elaboración de diversos productos, como bebidas de cacao, helados y productos de panadería. Gracias a sus numerosos beneficios y propiedades medicinales, los productos derivados del cacao ganan cada vez más popularidad a nivel mundial[147].

El proceso para la obtención del grano seco consta de los pasos descritos en la Figura 32:

Figura 32 Método de producción de granos secos de cacao[148]



Una vez obtenido el cacao en grano seco, los desechos resultantes están compuestos principalmente por tres fracciones, en los cuales de acuerdo con las fases descritas en la figura 33 se obtienen:

- Cáscara de vaina de cacao (obtenido en el apartado 2),
- Mucílago de cacao (obtenido en el apartado 4).
- Cáscaras de granos de cacao (obtenido en el apartado 5)

En la mayoría de los casos, estos coproductos se encuentran subexplotados y son considerados productos no deseados o "residuos" de la industria del cacao. Por lo general, se les permite pudrirse en las plantaciones de cacao, lo que puede ocasionar problemas ambientales. Además de generar malos olores, estos residuos pueden propagar enfermedades, como *Phytophthora* spp, que es la principal causa de pérdidas económicas en la actividad cacaotera[149], Se elimina el mucílago en los sistemas de drenaje, desechándose un producto con alto contenido de azúcares y levaduras beneficiosas para los procesos de fermentación[150].

Los coproductos, a pesar de ser comúnmente compostados, poseen una composición que sugiere un potencial significativo para aplicaciones alternativas. Por ejemplo, podrían ser utilizados para la obtención de compuestos bioactivos y fibra dietética, los cuales podrían emplearse como ingredientes en el procesamiento de alimentos. Recientemente, la valorización de estos coproductos agrícolas ha ganado atención creciente debido a la creciente escasez de recursos naturales y a los graves problemas medioambientales. Varios investigadores se han dedicado a transformar estos coproductos en ingredientes alimentarios y en otros usos con aplicaciones de valor agregado[151], sin embargo, los estudios para transformarlos en energía aún son incipientes.

Figura 33 Fermentación aeróbica de los granos de cacao, paso previo a la obtención del mucílago



Los mucilagos o pulpas mucilaginosas y las gomas son polisacáridos altamente viscosos derivados de semillas de plantas o tallos blandos como el *psyllium* (*plantago especie*), mostaza amarilla (*Sinapis alba*) y mucílago de lino (*Linum usi tatissimum*). Estos polisacáridos ácidos tienen estructuras similares a ciertas encías exudadas. Por su funcionalidad (viscosidad, gelificación, unión de agua), su uso en muchos alimentos se está expandiendo [152], en el caso del mucílago del cacao contienen

células de savia que son ricas en azúcares y capaces de fermentar sin modificaciones, convirtiendo el azúcar en alcohol. Estudios han reportado que este mucílago tiene 84,2% de humedad, 8,9% proteína, 4,1% de azúcar y 0,7% de cenizas[147], lo cual da una perspectiva importante para mediante procesos bioquímicos, ver el potencial de esta pulpa como biomasa. Aunque el volumen total de exudado es sustancial, hasta la fecha, no se ha identificado un uso adecuado a nivel industrial[153]

Tabla 4 Composición de la pulpa mucilaginoso del proceso de refinación del cacao[147], [154][155]

<b>COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA PULPA MUCILAGINOSA</b>		
<b>COMPONENTES</b>	<b>ANTES DE LA FERMENTACIÓN (PASO 4)</b>	<b>DESPUÉS DE LA FERMENTACIÓN (PASO 5)</b>
Humedad	88 %	84,2 %
Sacarosa	11%	4,1 %
Densidad g/ml	1.07	1.009
Ácido cítrico	2 – 3%	0,7 %
Pectina	1,1 – 1,6 %	-
PH	3,6	6,7
Alcohol etílico	-	0,55 %
Ácido acético	-	1,65 %

Según la revisión de la literatura disponible, se destaca que el mucílago, tras el proceso de fermentación de la refinación del cacao (paso 5, figura 32), posee un considerable potencial para la producción de biocombustibles. Después de someterse a procesos bioquímicos adicionales, se espera encontrar su potencial uso como biomasa.

Las cáscaras forman parte de los materiales residuales que están siendo considerados para el reciclaje en la industria agroalimentaria. Este enfoque busca la recuperación de valiosos metabolitos primarios y secundarios, así como fibras dietéticas, con el propósito de utilizarlos como suplementos en productos alimenticios o en otras formas de industrialización[156].

Considerando el volumen del mercado del cacao (*Theobroma cacao L.*), es evidente que la industria del cacao/chocolate ha generado cantidades sustanciales

de residuos. En 2013, se produjeron 3,455,622 toneladas métricas, y se estima que este número crecerá a una Tasa Compuesta Anual de Crecimiento del 3.1% desde 2014 hasta 2019. Se prevé que el mercado del chocolate continuará creciendo a una tasa compuesta anual del 2.3% en el mismo período. Se proyecta que Europa liderará el mercado global con mayor participación en términos de volumen en 2014, seguida de América del Norte y Asia Pacífico. Se ha calculado que por cada tonelada de granos secos producida se generan 10 toneladas de cáscaras[157], lo que plantea un importante problema de eliminación de residuos.

*Figura 34 Cáscaras de cacao, desechos generados por la refinación del cacao.*



En la actualidad, la biomasa derivada de las cáscaras de cacao se emplea comúnmente como combustible en las instalaciones de procesamiento de cacao o se utiliza como mantillo para enriquecer el suelo y controlar las malas hierbas. No obstante, la plena explotación de esta biomasa para la recuperación de compuestos con valor añadido como biomasa de combustión directa o biocombustibles, representa un recurso económico potencialmente significativo, que debe ser estudiado a fondo[158].

Con base en los antecedentes expuestos, la biomasa proveniente de los residuos agroindustriales generados durante la refinación del cacao seleccionada para la

experimentación y caracterización, son la pulpa mucilaginoso y la cáscara, elegidos por su potencial para generar energía.

Para realizar una comparación exhaustiva de los parámetros ambientales y operativos en ensayos bajo condiciones reales del biocombustible obtenido, se lleva a cabo un análisis comparativo con los combustibles locales en circulación: Gasolina Super (92 Octanos RON) y Gasolina Extra (85 Octanos RON). Las tablas 5 y 6 muestran las características de estos combustibles, según la normativa ecuatoriana. La Gasolina Extra se emplea tanto en la mezcla E5 (95% Gasolina Extra y 5% bioetanol obtenido del proceso bioquímico aplicado a la pulpa mucilaginoso del cacao) como en su forma pura, permitiendo así contrastar el rendimiento de los tres combustibles. Es importante señalar que en algunas ciudades de Ecuador, la mezcla E5 se conoce como Gasolina Ecopaís.

*Tabla 5 Características de la Gasolina Extra de Ecuador[159]*

<b>Requisitos</b>	<b>Unidad</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>
Octanaje (RON)	--	85,0	--
Poder Calorífico Superior HHV	kJ/kg	--	47746,9
Poder Calorífico Inferior LHV	kJ/kg	--	47124,4
Temperatura de destilación: 50%	°C	77	121
Temperatura de destilación: 10%	°C	--	70
Temperatura de destilación: 90%	°C		189
Presión de vapor	kPa	--	60,0

*Tabla 6 Características de la Gasolina Súper de Ecuador[159]*

<b>Requisitos</b>	<b>Unidad</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>
Octanaje (RON)	--	92,0	--
Poder Calorífico Superior HHV	kJ/kg		46819,8
Poder Calorífico Inferior LHV	kJ/kg		45882,3
Temperatura de destilación: 10%	°C	--	70
Temperatura de destilación: 50%	°C	77	121
Temperatura de destilación: 90%	°C	--	190
Presión de vapor	kPa	--	60,0

### **3.2 Localización de la materia prima.**

La materia prima para los ensayos de biomasa consistió en muestras de cacao provenientes de diversas plantaciones ubicadas en la provincia de Los Ríos, Ecuador, específicamente del cantón Quevedo.

Tanto el mucílago como las cáscaras de cacao empleados en este estudio fueron recolectados en diversos centros de acopio. Es imperativo destacar que la selección de estos residuos agroindustriales, generados durante la refinación del cacao, como materiales de estudio se basó en su disponibilidad, importancia económica y su potencial aplicación en procesos de conversión de biomasa. Este abordaje contempla tanto procesos bioquímicos como termoquímicos, con una amplia variedad de productos resultantes cabe indicar que Ecuador, en el contexto del mercado mundial del cacao, desempeña un papel destacado, siendo el principal productor de cacao fino y contribuyendo con aproximadamente el 65% del suministro global[160]. La inclusión de muestras provenientes de diversas plantaciones proporcionó una perspectiva holística de las propiedades de la biomasa de cacao en la región, contribuyendo así a una investigación exhaustiva y detallada en el ámbito de la biomasa y sus posibles aplicaciones.

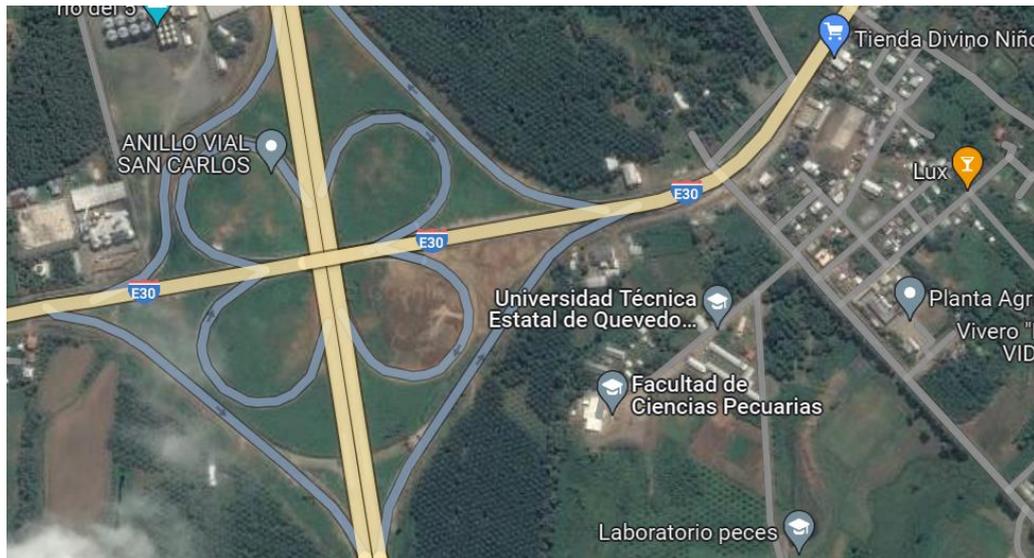
### **3.3 Localización de los ensayos.**

La experimentación se desarrolló en tres localizaciones estratégicamente seleccionadas, cada una cumpliendo un papel crucial en esta investigación. Estos lugares fueron escogidos por la disponibilidad de laboratorios, equipos y rutas experimentales, seleccionados meticulosamente para asegurar la representatividad y robustez de los resultados. A continuación, se describen las características distintivas de cada sitio, destacando la importancia de su elección en el contexto de esta investigación.

Los análisis de la pulpa mucilaginososa se llevaron a cabo en la Universidad Técnica Estatal de Quevedo, específicamente en el campus "La María", ubicado en la Vía a El Empalme, en la entrada del cantón Mocache. En este campus, la ejecución de los ensayos se realizó en el Laboratorio de Operaciones Unitarias, donde se llevó a cabo

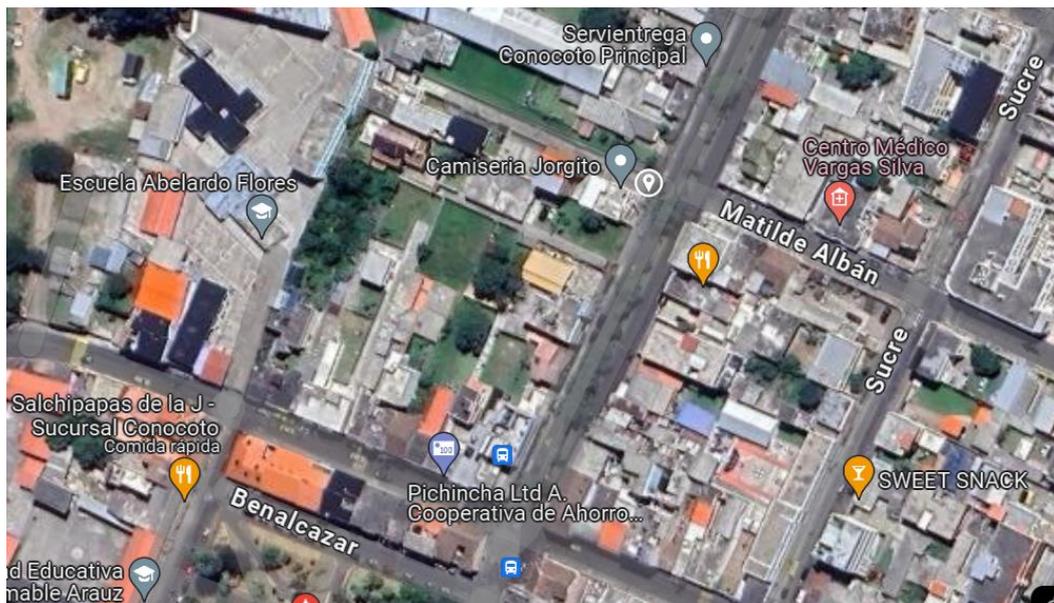
la conversión del mucílago del cacao a etanol. Este laboratorio cuenta con los equipos necesarios para realizar las diversas etapas del proceso, desde la preparación de la materia prima hasta la obtención del biocombustible final, así como el análisis correspondiente del producto obtenido.

Figura 35 Ubicación de la Finca Experimental "La María" Quevedo-Ecuador



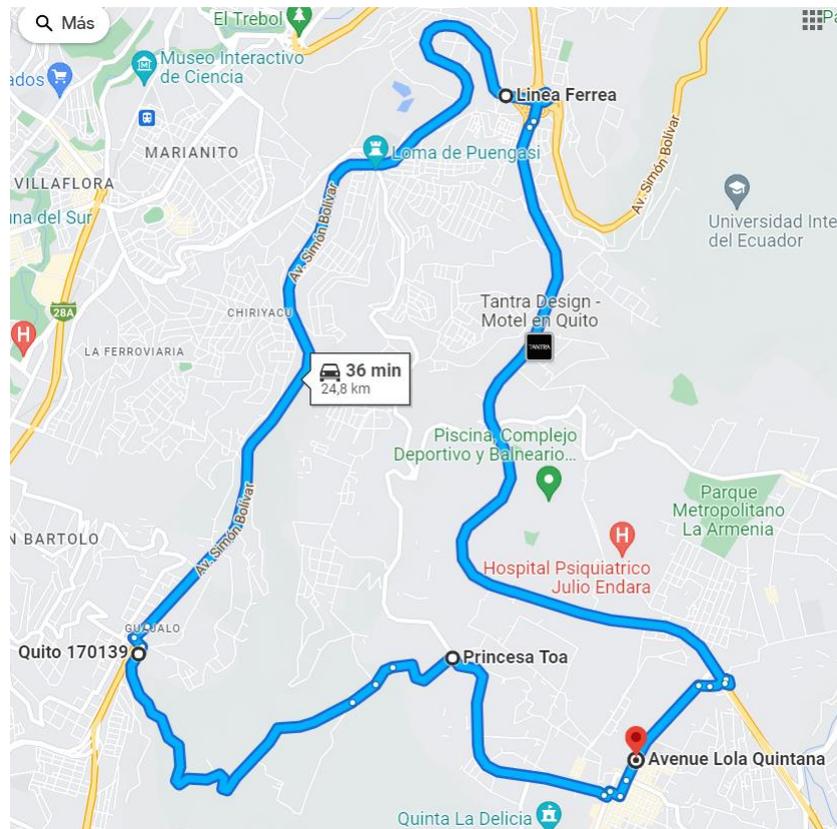
Luego de completar las pruebas del biocombustible, se llevaron a cabo evaluaciones estáticas. Estas pruebas se llevaron a cabo en la Provincia de Pichincha, específicamente en la ciudad de Quito, en el sector de Conocoto, utilizando las instalaciones del taller automotriz "Talleres Unidos". Este taller está equipado con las herramientas y equipos necesarios para realizar este tipo de pruebas, lo que justificó su elección para llevar a cabo dichas evaluaciones.

Figura 36 Ubicación "Talleres Unidos"



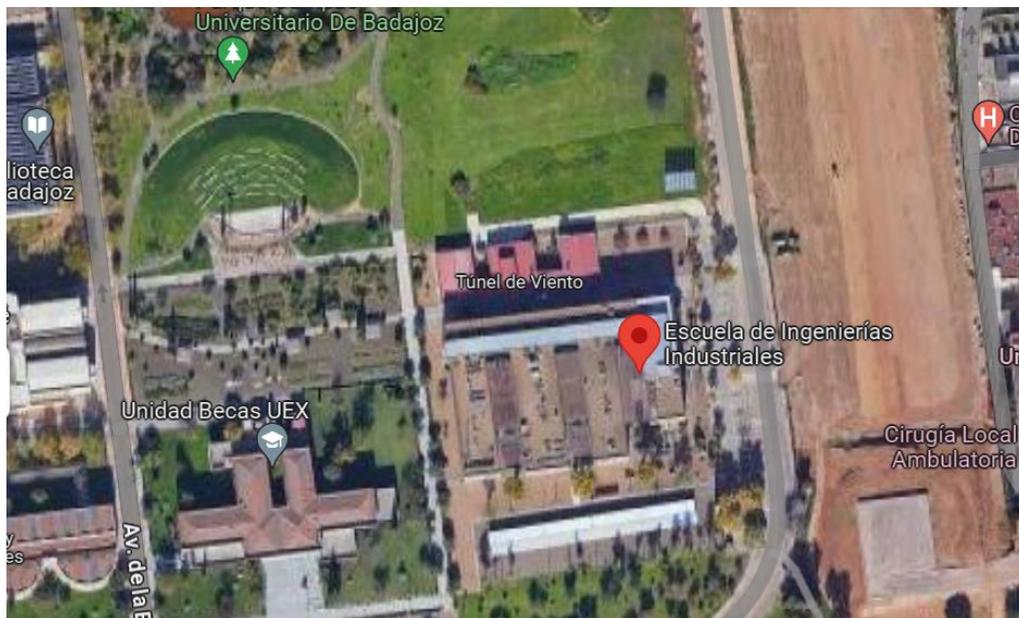
Con el propósito de registrar los parámetros de desempeño efectivo del biocombustible obtenido usado en vehículos reales, se seleccionó aleatoriamente una ruta en la ciudad de Quito, que inicia desde la Av. Lola Quintana y se dirige hacia las Av. Gran Rumiñahui, Av. Simón Bolívar Sur, Vía Conocoto, y Av. Princesa Toa, llegando finalmente a Av. Camilo Ponce Enrique, tal como se indica en la figura 37. Esta ruta abarca una distancia de 24,8 km y se caracteriza por presentar varias pendientes y curvas, proporcionando así una evaluación de los parámetros de operación en condiciones reales de conducción.

*Figura 37 Ruta aleatoria para realizar las pruebas experimentales del biocombustible bajo condiciones reales de operación*



La experimentación y ensayos termoquímicos de la biomasa sólida obtenida de las cáscaras de cacao se realizó en el Laboratorio de Caracterización de Residuos Biomásicos, perteneciente al Grupo de Aprovechamiento Integral de Residuos Biomásicos y Energías Renovables GAIRBER, del Departamento de Física Aplicada de la Escuela de Ingenierías Industriales de la Universidad de Extremadura en Badajoz, España, Campus Universitario, Av. de Elvas, s/n, 06006, este laboratorio cuenta con todos los equipos para este tipo de ensayos.

Figura 38 Ubicación Laboratorio de Caracterización de Residuos Biomásicos, Universidad de Extremadura, España.



### 3.4 Diseño de la experimentación.

Por las características de la biomasa obtenida en los residuos agroindustriales de la refinación del cacao, para la experimentación de esta investigación se determinó que con la pulpa mucilaginosa se apliquen los procesos bioquímicos, para la obtención de bioetanol, mientras que para la cáscara de la fruta, se aplique la caracterización de la biomasa en procesos termoquímicos de combustión, gasificación y pirólisis para determinar su potencial, por lo que se desarrollaron los experimentos de la siguiente manera.

### 3.5 Producción de biocombustibles a partir del mucílago: evaluación del rendimiento energético y ambiental en operaciones prácticas.

En la fase inicial de la investigación, se realizará un análisis exhaustivo del cultivo de cacao. Para obtener el alcohol, se comenzará extrayendo el mucílago del grano de cacao y almacenándolo en depósitos provisionales bajo condiciones controladas. A continuación, se llevará a cabo un proceso de fermentación anaeróbica mediante la aplicación de una concentración del 0,05% de levadura *Saccharomyces cerevisiae* ya que esta mezcla es la óptima para este tipo de biomasa[161], homogeneizando la mezcla para garantizar una distribución uniforme de la levadura a 25 °C en un reactor.

Durante esta fase, los azúcares del mucílago del cacao se convertirán en etanol. Se implementará un mecanismo para controlar la liberación de dióxido de carbono generado por la fermentación en cada recipiente de mucílago, y esta etapa se extenderá a lo largo de 21 días, asegurando niveles específicos de azúcar (3-4°Brix).

Una vez fermentada la materia prima, se realizará un proceso de cernido para eliminar impurezas, y la sustancia libre de sólidos se someterá a un proceso de destilación en una torre de destilación simple de acero inoxidable de las siguientes características:

- Volumen de procesamiento. 30 litros, vaso reactor
- Volumen de procesamiento 20 litros, vaso colector.
- Alimentación por gravedad.
- Válvula de reflujo y retorno.
- Sistema de calefacción con manto calefactor.

La primera destilación tiene como objetivo obtener alcohol con un rango de 50-70 % v/v, mientras que la segunda destilación se centrará en obtener un grado de pureza superior (90 % v/v), que se utilizará para la formulación de la mezcla E5.

La relación estimada de entrada y salida de materia prima transformada en biocombustible se estima será de 9:1, donde 9 litros de mucílago de cacao se convierten en 1 litro de alcohol. Se verificarán los porcentajes de metanol y etanol, buscando valores superiores al 71 % de etanol. La fórmula química del etanol es  $\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-OH}$ . Además, se determinará el poder calorífico y el octanaje del biocombustible, que se espera alcance 105, según norma NTE INEN 2102-Derivados del petróleo. Gasolina. Determinación de las características antidetonantes. Método Research (RON).

Tabla 7 Descripción del proceso de fermentación del mucílago.

<b>DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE FERMENTACIÓN</b>		
<b>Fecha</b>	<b>23/6/2021</b>	<b>24/6/2021</b>
<b>Proceso</b>	Agitar la mezcla mediante un mezclador agregando levadura concentración de 0.05% en el proceso.	
<b>Cantidad</b>	80 litros de mucílago	80 litros de mucílago
<b>Grados Brix</b>	18 grados brix	18 grados brix
<b>Temperatura</b>	<b>48°C</b>	
<b>Observaciones</b>	Se almacena en envases con mecanismos para controlar la salida de dióxido de carbono generado por la fermentación del mucílago de cada experimento, que contiene un pH de 4,10,5.	

Tabla 8 Descripción del proceso de destilación del mucílago fermentado.

<b>DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE DESTILACIÓN</b>	
<b>Fecha</b>	14/6/2021
<b>Proceso</b>	Someter a procesos de destilación pasando del tambor al calderín.
<b>Cantidad</b>	20 litros
<b>Grados Brix</b>	6 grados brix
<b>Temperatura</b>	Temperatura del Calderín: 80 – 95 °C. Temperatura de la torre de destilación: 78,5 °C.
<b>Resultados</b>	El fluido se evapora y pasa a través de condensadores que están alimentados por una torre de enfriamiento, y finalmente se va acumulando el alcohol destilado en un recipiente.
<b>Nivel de alcohol</b>	66% V/V
<b>Observaciones</b>	No exceder de 90 °C de temperatura en la torre de destilación.

El análisis energético en motores de combustión interna y su desempeño mecánico en operaciones reales de operación, se llevarán a cabo en dos vehículos cuyas características se detallarán en apartados posteriores, en estos se utilizarán los distintos combustibles comerciales de Ecuador, así como la mezcla E5 con gasolina extra. Las pruebas se realizarán en una ruta urbana y extraurbana con relieve variado, ubicada en la Parroquia Rural Conocoto. Se efectuarán dos recorridos por cada

combustible para la recolección de datos utilizando el CANedge 1 y el CANmod de la unidad de control del vehículo. Previo a las pruebas de ruta, se caracterizarán las propiedades de la mezcla E5 conforme a la norma NTE INEN 935 Productos Derivados de Petróleo. Gasolina. Requisitos.

Los ensayos comprenden la realización de pruebas de idoneidad del biocombustible obtenido de la mezcla del bioetanol producto de los procesos bioquímicos aplicados a la pulpa mucilaginoso del cacao en la mezcla E5, estas pruebas están basadas en las siguientes normas:

**ASTM D4809-18 Método de prueba estándar para el calor de combustión de combustibles de hidrocarburos líquidos mediante calorímetro de bomba (método de precisión).**

Este método de ensayo se enfoca en la medición del calor de combustión de los hidrocarburos utilizados como combustibles. Su diseño está particularmente orientado al análisis de combustibles de turbinas de aviación, siendo capaz de detectar diferencias mínimas del orden del 0,2% entre determinaciones duplicadas. Aunque está especialmente adaptado para combustibles de aviación, es aplicable a una variedad extensa de materiales, tanto volátiles como no volátiles, donde se puedan aceptar variaciones de precisión ligeramente superiores[162].

**ASTM D86 Método de prueba estándar para la destilación de productos derivados del petróleo a presión atmosférica**

Las propiedades de destilación, que incluyen la volatilidad, de los productos petrolíferos ofrecen indicadores clave sobre su rendimiento. Los resultados empíricos obtenidos a través de este método de prueba se correlacionan con los factores de rendimiento de los equipos automotrices y con las características de volatilidad de la muestra[163], mediante esta norma, se pueden determinar de manera cuantitativa las características del rango de ebullición del biocombustible, también tiene aplicación en, aviación gasolinas, combustibles para turbinas de aviación, combustibles diésel, mezclas de biodiésel hasta un 20%, combustibles marinos, gasolinas especiales, naftas, aguarrás, querosenos y combustibles para quemadores de grados 1 y 2[164].

### **ASTM D323 Método de prueba estándar para la presión de vapor de productos derivados del petróleo (método Reid)**

Este método de prueba se utiliza para medir la presión de vapor de la gasolina, el petróleo crudo volátil y otros productos derivados del petróleo que presentan volatilidad[163]. El procedimiento A es adecuado para muestras con una presión de vapor inferior a 180 kPa. Por otro lado, el procedimiento B también es aplicable a estos productos, pero específicamente a la gasolina[165]

### **ASTM D130 Método de prueba estándar para determinar la corrosividad del cobre de los productos derivados del petróleo mediante la prueba de la tira de cobre**

Este método de prueba se utiliza para determinar la corrosividad al cobre de diversas gasolinas, combustibles, aceites lubricantes u otros hidrocarburos. Aunque la mayoría de los compuestos de azufre del petróleo se eliminan durante el refinado, algunos residuales pueden tener una acción corrosiva sobre varios metales. La prueba de corrosión de la tira de cobre mide el grado relativo de corrosividad de un producto petrolífero, variando según los tipos de compuestos de azufre presentes[163].

Se enfoca en diversos combustibles como la gasolina de aviación, el combustible para turbinas de aviación, la gasolina para automóviles, solventes de limpieza (Stoddard), queroseno, combustible diésel, aceite combustible destilado, aceite lubricante, y gasolina natural, así como otros hidrocarburos con una presión de vapor no superior a 124 kPa (18 psi) a 37,8 °C[166].

### **ASTM D4294 Método de prueba estándar para azufre en petróleo y productos derivados del petróleo mediante espectrometría de fluorescencia de rayos X de dispersión de energía.**

Este método de prueba cubre la determinación del azufre total en petróleo y productos derivados del petróleo que son monofásicos y líquidos en condiciones ambientales, licuables con calor moderado o solubles en solventes de hidrocarburos. Estos materiales pueden incluir combustible diesel, combustible para aviones,

queroseno, otros aceites destilados, nafta, aceite residual, aceite base lubricante, aceite hidráulico, petróleo crudo, gasolina sin plomo, mezclas de gasolina y etanol, biodiesel y productos derivados del petróleo similares[167], El rango de concentración de azufre aplicable abarca desde 0,015 hasta 5,0 % de masa. Posibles interferencias incluyen líneas espectrales y matrices, siendo estas últimas provocadas por diferentes relaciones C/H u oxígeno en los estándares y muestras. Las interferencias, ya sean espectrales o de matriz, suelen compensarse eficientemente mediante software en instrumentos modernos. En el caso de combustibles con alto contenido de oxígeno M-85 y M-100, se recomienda analizarlos utilizando estándares de calibración que coincidan con la matriz de la muestra[163].

### **ASTM D381 Método de prueba estándar para contenido de goma en combustibles por evaporación a chorro**

La verdadera relevancia de este método de prueba para determinar la presencia de goma en la gasolina para motores aún no está completamente establecida. Se ha evidenciado que niveles elevados de goma pueden dar lugar a depósitos en el sistema de inducción y obstrucciones en las válvulas de admisión, mientras en la mayoría de los casos, se podría asumir que niveles bajos de goma asegurarán la ausencia de problemas en el sistema de inducción. No obstante, es crucial que el usuario comprenda que este método de prueba no se correlaciona directamente con la formación de depósitos en el sistema de inducción[163].

El propósito principal de este método de prueba, aplicado a la gasolina para motores, es medir los productos de oxidación formados en la muestra antes o durante las condiciones relativamente suaves del procedimiento de prueba. Dado que muchas gasolinas de motor se mezclan intencionalmente con aceites o aditivos no volátiles, la etapa de extracción con heptano se vuelve necesaria para eliminarlos del residuo de la evaporación, permitiendo así la determinación precisa del componente perjudicial, la goma[168].

En cuanto a las pruebas estáticas de emisiones, se llevarán a cabo en un taller especializado situado en la parroquia Conocoto, ubicada en la provincia de

Pichincha. La recolección de datos durante estas pruebas se llevará a cabo utilizando el software ETS IDC5, que permitirá obtener información detallada sobre las emisiones producidas durante el funcionamiento del motor con los distintos combustibles, incluida la mezcla E5, estos valores se contrastan con los indicados en la norma NTE INEN 2204 Gestión ambiental, aire, Vehículos automotores. Límites permitidos de emisiones producidas por fuentes móviles terrestres que utilizan gasolina.

Según la normativa mencionada, siempre que un motor de combustión interna a gasolina esté en funcionamiento, ya sea en marcha mínima, en ralentí y a temperatura normal, no debería emitir monóxido de carbono en cantidades superiores a las establecidas en la siguiente tabla:

*Tabla 9 Emisiones según Norma INEN 2204[169]*

Año modelo	%		ppm	
	0-	1500-	0-	1500-
2000 y posteriores	1,0	1,0	200	200
1990 a 1999	3,5	4,5	650	750
1989 y anteriores	5,5	6,5	1000	1200

La normativa indicada especifica límites máximos de emisiones permitidos para fuentes móviles que emplean motores de combustión interna a gasolina, establecidos mediante el Ciclo FTP-75. Este ciclo, también conocido como "Federal Test Procedure", simula condiciones de conducción típicas en áreas urbanas y suburbanas, con patrones específicos de aceleración, frenado y velocidad. En cumplimiento con estas regulaciones, los vehículos deben demostrar conformidad con los estándares establecidos durante las pruebas realizadas bajo el Ciclo FTP-75, garantizando así niveles aceptables de emisiones contaminante, estos límites están establecidos en la tabla 10.

Tabla 10 Límites máximos de emisiones permitidos[169].

Categoría	50,000 millas/5 años				100,000 millas/10			
	CO	THC	NMHC	NOx	CO	THC	NMHC	NOx
	g/mi	g/mi	g/mi	g/mi	g/mi	g/mi	g/mi	g/mi
Vehículo de pasajeros	3,4	0,41	0,25	0,4	4,2	-	0,31	0,6
LLDT, LVW < 3750 lbs	3,4	-	0,25	0,4	4,2	0,80	0,31	0,6
LLDT, LVW > 3750 lbs	4,4	-	0,32	0,7	5,5	0,80	0,40	0,97
HLDT, ALVW < 5750 lbs	4,4,	0,32	-	0,7	6,4	0,80	0,46	0,98
HLDT, ALVW > 5750 lbs	5,0	0,39	-	1,1	7,3	0,80	0,56	1,53

"a" Vida útil 120,000 millas/11 años para todos los estándares HLDT, THC y LDT.

Abreviaturas:

**PBV** Peso bruto vehicular

**LVW** Peso del vehículo cargado (tara + 300 lbs)

**ALVW LVW** ajustado (promedio numérico de la tara y el PBV)

**LDT** Camión ligero

**LLDT** Camión liviano ligero (debajo de 6000 lbs PBV)

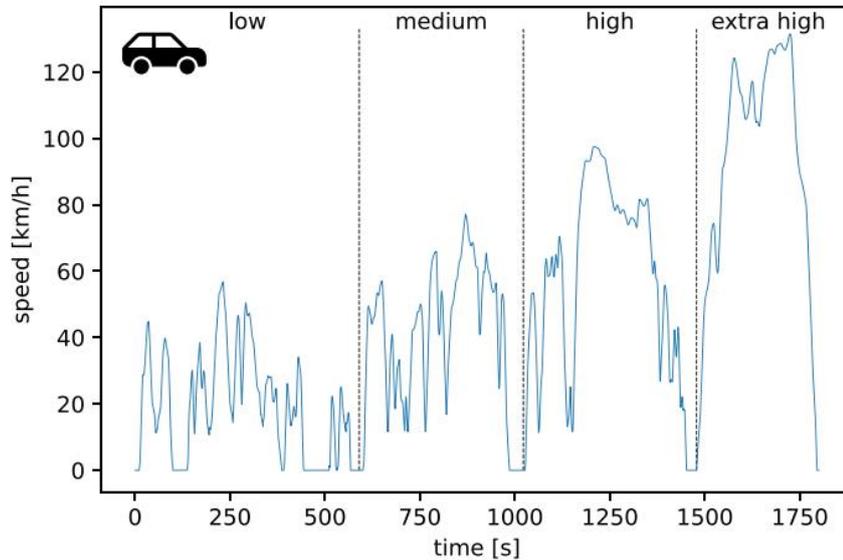
**HLDT** Camión ligero pesado (sobre 6000 lbs PBV)

En el marco de la experimentación y las pruebas estáticas, se llevaron a cabo mediciones a 700 y 2500 rpm en ambos vehículos seleccionados, utilizando los tres tipos de combustible. Se realizaron tres mediciones en cada caso para obtener un promedio representativo y facilitar la comparación entre el biocombustible y los dos combustibles comerciales convencionales del país.

Para el análisis energético se trazó una ruta mostrada en la figura 37, para la cual se establecieron ciclos de conducción que serán analizados en los resultados. Un ciclo de conducción se define como un patrón predefinido o secuencia que representa el perfil típico de velocidad y aceleración de un vehículo durante un período específico. Este patrón abarca diversas condiciones de conducción, como escenarios urbanos, suburbanos y en carretera, encapsulando así las experiencias que vive un vehículo en un viaje particular. Los ciclos de conducción desempeñan un papel crucial en la prueba y certificación de vehículos, la estimación de autonomía para vehículos eléctricos, la evaluación de emisiones y su impacto ambiental, la medición del consumo y la eficiencia del combustible, la optimización

del rendimiento y componentes del vehículo, y en la planificación y diseño de infraestructura de tráfico[170].

Figura 39 Ejemplo de un ciclo de conducción usado para experimentación[171]



En el análisis energético, se determinarán los siguientes parámetros:

### Torque del motor:

El torque es una medida del momento de fuerza que produce el motor y se transmite a las ruedas para generar movimiento. El torque del motor se relaciona con la capacidad del motor para realizar trabajo y superar la resistencia al giro de las ruedas[172].

$$T = F * r$$

**Ec. 1.**

Donde:

T: Torque o par motor (Nm)

F: Fuerza Aplicada (N)

r: Radio de la manivela del motor (rad/s)

### Potencia efectiva del motor:

Representa la capacidad del motor para convertir la energía contenida en el combustible en trabajo mecánico de salida, descontando las pérdidas y resistencias internas[173].

$$P = T * \omega = \frac{M * n}{\frac{60}{2\pi}} \quad \text{Ec. 2.}$$

Donde:

P: Potencia del motor (kW)

T: Torque o par motor (Nm)

$\omega$ : Velocidad angular del eje del cigüeñal (rad/s)

n: Revoluciones por minuto (rpm)

### Consumo específico de combustible

El consumo específico de combustible se refiere a la cantidad de combustible que un motor de combustión interna consume por unidad de trabajo realizado. Se expresa típicamente en términos de una medida de trabajo, como la potencia producida por el motor, y se mide en unidades de volumen o masa de combustible por unidad de trabajo[174].

$$b_e = \frac{\dot{m}_c}{P} \quad \text{Ec. 3.}$$

Donde:

$b_e$  consumo específico (g/kWh)

$\dot{m}_c$  es el flujo másico del combustible (kg/s)

P es la potencia del vehículo (kW)

### Balance energético del Motor de Combustión Interna

$$\sum Q_a = \sum H_{\text{entrada}} - \sum H_{\text{salida}} \quad \text{Ec. 4.}$$

Donde:

$\sum Q_a$ : sumatoria de calor evacuado al ambiente (kJ)

$\sum H_{\text{entrada}}$ : sumatoria de entalpías que entran al sistema

$\sum H_{\text{salida}}$ : sumatoria de entalpías que salen al ambiente

El balance energético se determina considerando los siguientes cálculos generales

(Ecuaciones 2 – 5):

### Flujo másico de combustible

$$\dot{m}_c = \rho \frac{V}{\Delta t} \quad \text{Ec. 5.}$$

Donde:

$\dot{m}_c$  = flujo másico de combustible (kg/s)

$\rho_{com}$  = densidad específica de combustible (kg/m<sup>3</sup>)

$V$  = volumen de combustible (m<sup>3</sup>)

$\Delta t$  = tiempo de flujo (180 s)

### Calor liberado por el combustible

$$\dot{Q}_c = \dot{m}_c \cdot PCI \quad \text{Ec. 6.}$$

Donde

$\dot{Q}_c$  = calor liberado por el combustible (kW)

$PCI$  = poder calorífico inferior del combustible (kJ/kg)

### Eficiencia energética del sistema

$$\eta_{energético} = \frac{P_{máx}}{\dot{Q}_c} \quad \text{Ec. 7.}$$

Donde:

$P_{máx}$  = potencia máxima del motor kW

$\dot{Q}_c$  = calor liberado por el combustible kW

### Exergía del combustible

$$E_{Xc} = \dot{m}_c PCI \quad \text{Ec. 8.}$$

$E_{Xc}$  = Exergía del combustible (kW)

$PCI$  = Poder calorífico inferior del combustible (kJ/kg)

### Exergía de flujo de los gases del escape

$$\dot{E}_{xg} = \dot{m}_g \left[ C_p T_0 \left( \frac{T}{T_0} - 1 \right) - \ln \left( \frac{T}{T_0} \right) \right] \quad \text{Ec. 9.}$$

Donde:

$$\dot{m}_g = \dot{m}_{ar} + \dot{m}_c \quad \text{Ec. 10.}$$

$\dot{m}_g$  = Caudal de gas (kg/s)

$\dot{m}_{ar}$  = flujo de aire (kg/s)

$\dot{m}_c$  = flujo másico de combustible (kg/s)

$\dot{E}_{xg}$  = Exergía asociada al flujo de gases (kW)

$C_p$  = Calor específico a presión constante (kJ/kg K)

$T_0$  = Temperatura de referencia (K)

$T$  = Temperatura de los gases de salida (K)

### Eficiencia exergética del sistema

$$\eta_{exergética} = \frac{\sum E_{flujos\ de\ entradas} - \sum E_{flujos\ de\ salida}}{\sum E_{flujos\ de\ entradas}} \quad \text{Ec 11.}$$

El calor específico del aire a una temperatura T (K), está dado por la ecuación:

$$c_{par,T} = C_0 + C_1 T + C_2 T^2 + C_3 T^3 + C_4 T^4 \quad (J/kgK) \quad \text{Ec. 12.}$$

Para temperatura entre 200 a 800 K.

Donde:

$$c_0 = 1,0189 \times 10^3 \text{ J/KgK}$$

$$c_1 = -1,3784 \times 10^{-1} \text{ J/KgK}^2$$

$$c_2 = 1,9843 \times 10^{-4} \text{ J/KgK}^3$$

$$c_3 = 4,2399 \times 10^{-7} \text{ J/KgK}^4$$

$$c_4 = -3,7632 \times 10^{-10} \text{ J/KgK}^5$$

El calor específico a presión constante de los gases de combustión está dado por la siguiente ecuación:

$$c_{p\ g,T} = c_{par,T} + \frac{f}{1+f} \theta_{c_{p,T}} \quad \left( \frac{J}{kgK} \right) \quad \text{Ec. 13.}$$

Donde:

$$f = \frac{\dot{m}_{comb}}{\dot{m}_{ar}} \quad \text{Ec. 14.}$$

$$\theta_{C_p,T} = C_{P0} + C_{P1}T + C_{P2}T^2 + C_{P3}T^3 + C_{P4}T^4 + C_{P5}T^5 \quad \text{Ec.15.}$$

Para temperatura entre 200 a 800 K.

$$C_{P0} = -3,5949 \times 10^2 J/KgK$$

$$C_{P1} = 4,5164 \times 10^0 J/KgK^2$$

$$C_{P2} = 2,8116 \times 10^{-3} J/KgK^3$$

$$C_{P3} = -2,1709 \times 10^{-5} J/KgK^4$$

$$C_{P4} = 2,8689 \times 10^{-8} J/KgK^5$$

$$C_{P5} = -1,2226 \times 10^{-11} J/KgK^6$$

### 3.6 Equipos utilizados.

Los equipos usados en las diferentes etapas de la experimentación son, en los procesos de extracción de biocombustibles son:

#### Reactor

El reactor, es un contenedor conectado a un sistema de calentamiento, permitiendo un control preciso de la temperatura durante la mezcla de fluidos. En el caso específico del tratamiento del mucílago de cacao, se regula a una temperatura óptima situada en el rango de 25 a 50 °C.

Figura 40 Reactor del Laboratorio de Operaciones Unitarias.



### **Columna de destilación.**

La columna de destilación es usada en el proceso posterior a la fermentación del mucílago del cacao, ya que se encarga de separar la mezcla en función de su composición, distinguiendo entre los elementos presentes en el líquido y su fase vapor. La eficacia de este proceso depende de variables como la presión, el caudal, la composición interna, la temperatura de entrada y el calor añadido, entre otros. Es fundamental mantener un control preciso de estas variables para garantizar una destilación adecuada.

Figura 41 Columna de destilación Laboratorio de Operaciones Unitarias.



### **Estación Meteorológica portátil Skywatch Geos 11**

Para llevar a cabo la experimentación de manera precisa, es imperativo contar con un conocimiento detallado de las condiciones meteorológicas en el lugar y momento específicos. Con este propósito, se ha seleccionado la estación portátil Skywatch Geos 11, de la cual se han extraído los datos pertinentes que se utilizarán en el experimento.

- Velocidad del viento actual, media y máxima.
- Temperatura actual, máxima y mínima.
- Humedad relativa actual, máxima y mínima.
- Presión atmosférica absoluta y relativa, máxima y mínima.
- Variación de la presión atmosférica.
- Altímetro.
- Fecha, hora y cronómetro.

Los datos del dispositivo vienen con el software SkyWatchLog, que permite importar a una hoja de Excel los datos obtenidos por la estación meteorológica.

Figura 42 Estación Metereológica Skywatch Geos 11[175]



### **Registrador de datos CANedge1**

Este dispositivo es un registrador de datos de bus CAN dual de categoría profesional que incluye una tarjeta SD industrial extraíble de 8 GB (Clase 10). Su funcionalidad principal radica en la capacidad para registrar datos CAN con marcas de tiempo. Su aplicación abarca diversas áreas, como:

- Monitoreo de vehículos fuera de línea.
- Diagnóstico y mantenimiento de máquinas.
- Desarrollo y optimización de prototipos.
- Gestión de seguros/cumplimiento/garantía[176].

En cuanto a la evaluación de parámetros de rendimiento del motor con los ensayos del biocombustible y los combustibles comerciales, el dispositivo se conecta al puerto OBDII, permitiendo la obtención de datos clave, entre los cuales se incluyen:

Figura 43 Punto de Conexión del CANedge 1 en el puerto OBD II del vehículo para la experimentación



Tabla 11 Datos que entrega el CANedge 1 al conectado al puerto OBD II[176]

<b>PID</b>	<b>Variables</b>	<b>Unidades</b>
0C	Revoluciones por minuto	rpm
0D	Velocidad del vehículo	
0B	Presión absoluta del colector de admisión	kPa
0F	Temperatura de entrada	°C
04	Carga del motor	%

Figura 44 Equipo CANEdge 1[176]



### Módulo CANmod GPS

Este módulo sensor GPS a CAN genera datos de posición GNSS y 3D IMU (Unidad de Medición Inercial) mediante la utilización de un giroscopio y acelerómetro. Estos datos son transmitidos a través del bus CAN y son completamente integrables con cualquier sistema, ofreciendo flexibilidad en términos de velocidad de transmisión en baudios e ID CAN configurables[177].

En el contexto de la investigación, se implementó el CANmod GPS en conjunto con el registrador de datos CANedge1.

El módulo GPS a CAN proporciona diversas señales CAN de gran utilidad:

- Posición: Incluye datos de posición GNSS y el estado satelital con soporte para GPS, Galileo, BeiDou y GLONASS
- Velocidad: Mide con alta precisión la velocidad del vehículo.
- Altitud: Útil, por ejemplo, en el análisis del consumo de energía del vehículo.
- Cuenta kilómetro: Realiza el seguimiento de la distancia recorrida por el activo, ya sea en términos totales o por viaje.
- IMU 3D: Proporciona tasas angulares basadas en IMU a 100 Hz y tasas de aceleración, permitiendo una visión completa del comportamiento del vehículo.
- Geocercas: Permite determinar si el vehículo ha ingresado o salido de áreas específicas.

- Tiempo: Sella temporalmente con alta precisión el tiempo de recorrido de la ruta[177].

Figura 45 Equipo CANmod GPS[177]



La obtención de los datos de los equipos CANedge1 y CANmod GPS es el software Asammdf GUI/API, que permite importar a hojas de Excel todos los datos para posteriores cálculos y análisis.

### **Analizador de gases “GASBOX”**

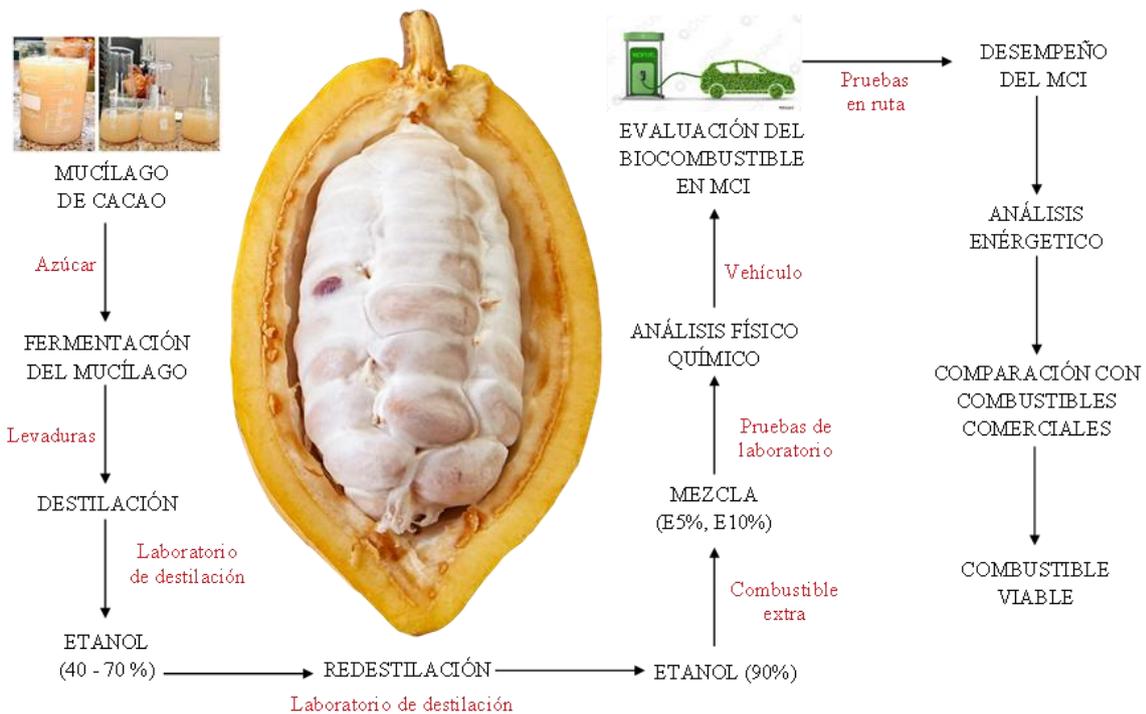
Este dispositivo analiza las emisiones producidas por motores que utilizan gasolina, GLP y GNV. Además, ofrece una conexión Bluetooth que facilita la revisión de las emisiones a través del software proporcionado por la marca, entre las variables que mide están:

- Hidrocarburos (HC),
- Oxígeno (O<sub>2</sub>),
- Monóxido de carbono (CO),
- Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)
- Relación de la sonda Lambda[178].

Figura 46 Equipo GasBox, utilizado para las pruebas estáticas en los vehículos



Figura 47 Resumen del proceso de extracción de bioetanol y su experimentación en condiciones reales de funcionamiento,



La Figura 47 muestra un resumen completo del experimento que se realizan a la biomasa de la pulpa mucilaginosa del cacao, desde los procesos de fermentación, destilación, hasta las pruebas en condiciones reales de funcionamiento en vehículos y su comparación con combustibles comerciales.

### **Otro Instrumental pequeño.**

Para el análisis del biocombustible obtenido del mucílago, se utiliza el siguiente instrumental básico de laboratorio.

- Refractómetro.
- Alcoholímetro.
- Densímetro.
- Probetas

### **3.7 Vehículos en los que se realizaron las pruebas del biocombustible.**

Para las pruebas estáticas se escogieron dos vehículos cada uno descrito con sus respectivas características:

#### **Chevrolet Optra**

- **Año de fabricación:** 2006
- **Cilindraje:** 1799 cc
- **Potencia máxima:** 119 HP
- **Torque máximo:** 165 NM
- **Masa del vehículo:** 1211 kg.
- **Masa del vehículo con carga máxima:** 1660 kg
- **Velocidad máxima:** 187 km/h

#### **Hyundai Grand i10**

- **Año de fabricación:** 2020
- **Cilindraje:** 1197 cc
- **Potencia máxima:** 82 HP
- **Torque máximo:** 114 NM
- **Masa del vehículo:** 1400kg.
- **Masa del vehículo con carga máxima:** 1750 kg
- **Velocidad máxima:** 166 km/h

Para la prueba de ruta, se llevó a cabo la experimentación exclusivamente en el vehículo Hyundai i10 del año 2020. Durante estas pruebas, se recopilaron datos relevantes relacionados con el rendimiento y otros parámetros específicos del vehículo para realizar un análisis detallado y obtener una comprensión más profunda de su comportamiento en condiciones de conducción reales de funcionamiento.

### **3.8 Caracterización de la biomasa, procesos termoquímicos.**

La biomasa seleccionada para los procesos termoquímicos es la sólida proveniente de las cáscaras de la vaina de cacao, a esta biomasa se obtiene de la caracterización con los productos provenientes de los productos finales de los tres procesos termoquímicos, combustión directa, gasificación y pirólisis,

Primero, se llevó a cabo la selección aleatoria de una porción de la muestra, la cual se secó de manera natural tras establecer su contenido de humedad previamente.

A continuación, se llevan a cabo procesos de la biomasa de las cáscaras de cacao en astillas, para combustión directa, a su vez procesos de pirólisis y gasificación para luego hacer los análisis correspondientes de cada uno de los productos obtenidos de los procesos termoquímicos aplicados.

A continuación, se describe la metodología aplicada en cada uno de los experimentos llevados a cabo.

### **3.8.1 Ensayos de Combustión Directa.**

Antes de los ensayos la cáscara de la vaina de cacao fue sometida a un proceso de trituración y tamizado. La trituración se llevó a cabo utilizando una trituradora (RETSCH, modelo SM100), seguida por un proceso de tamizado utilizando una serie de tamices (CISA 200/50, conforme a la norma ISO-3310.1). Se seleccionó la fracción de material que se encontraba en el rango de tamaños de partícula de 1 a 2 mm, luego se realizaron los siguientes ensayos:

**Análisis elemental.** El análisis elemental implica determinar la proporción de diferentes elementos los productos obtenidos de los procesos termoquímicos aplicados a la biomasa. Los elementos clave a analizar incluyen carbono (C), hidrógeno (H), nitrógeno (N) y azufre (S).

Se lleva a cabo mediante el método interno de determinación de carbono, hidrógeno, nitrógeno y azufre en la biomasa utilizando un equipo True Spec Leco CHNS mod. 4084. Este equipo determina las cantidades de cada elemento analizando los gases de combustión de la muestra mediante rayos infrarrojos. Los resultados del análisis elemental se expresan en porcentaje en peso, conforme a la Norma UNE-EN 15104 Biocombustibles sólidos. Determinación del contenido total de carbono, hidrógeno y nitrógeno. Métodos instrumentales.

**Análisis inmediato.** es una técnica que se utiliza para determinar la composición elemental básica de un material de biomasa sin realizar procesos de descomposición química más complejos. Este análisis proporciona información valiosa sobre los principales componentes presentes en la biomasa y su contenido de agua[179]. Los parámetros realizados a los productos obtenidos de los procesos termoquímicos de la biomasa fueron:

**Humedad.** El análisis de humedad se lleva a cabo mediante el secado de la muestra del producto resultante del proceso termoquímico aplicado a la biomasa seleccionada, en una estufa a 105°C hasta alcanzar una constante de peso. La pérdida de masa resultante, expresada como porcentaje, representa el contenido de humedad. El procedimiento se ajusta a lo establecido en la norma UNE-EN 14774-2 Biocombustibles sólidos. Determinación del contenido de humedad. Método de secado en estufa. Parte 2: Humedad total. Método simplificado.

**Cenizas 815°C.** La determinación del contenido de cenizas a 815 °C se lleva a cabo mediante un procedimiento interno que implica la calcinación de la biomasa. Este proceso consiste en la combustión controlada de la biomasa en un horno de mufla, calentado gradualmente mediante rampas de temperatura hasta alcanzar los 815 °C. La metodología adoptada sigue los lineamientos de las normas UNE-EN 14775 Biocombustibles sólidos. Método para la determinación del contenido en cenizas.

**Volátiles 900°C.** La determinación de los componentes volátiles a 900 °C implica el calentamiento controlado de la biomasa en una atmósfera con bajo contenido de oxígeno, utilizando crisoles con tapaderas. Este método sigue las directrices de la norma UNE-EN 15148 Biocombustibles sólidos. Determinación del contenido en materias volátiles.

**Carbono fijo.** El carbono fijo se determina mediante el cálculo por diferencia, obteniendo el valor como complemento al 100% tras restar los contenidos de humedad a 815 °C y volátiles.

#### **Poder calorífico en base seca:**

**Superior.** Poder Calorífico Superior (PCS). Se determina mediante el procedimiento interno de análisis del poder calorífico en biomasa, utilizando una bomba calorimétrica PARR 1351 y llevando a cabo la combustión de la biomasa bajo una presión de oxígeno de 30 bar. El PCS se calcula automáticamente

midiendo la variación de temperatura del agua en el calorímetro antes y después de la combustión. Este método sigue las pautas establecidas por la norma UNE-EN 14918, Biocombustibles sólidos. Determinación del poder calorífico.

**Inferior.** Poder Calorífico Inferior (PCI). Se obtiene restando al Poder Calorífico Superior (PCS) en base seca el calor de vaporización generado por la combustión del hidrógeno contenido en la biomasa. Este cálculo se realiza mediante la siguiente expresión:

$$PCI_s = PCS_s - 5400H \quad \text{Ec. 17}$$

Donde  $PCI_s$  es el poder calorífico inferior en kcal/kg de biomasa en base seca,  $PCS_s$  es el poder calorífico superior determinado anteriormente en kcal/kg de biomasa en base seca.

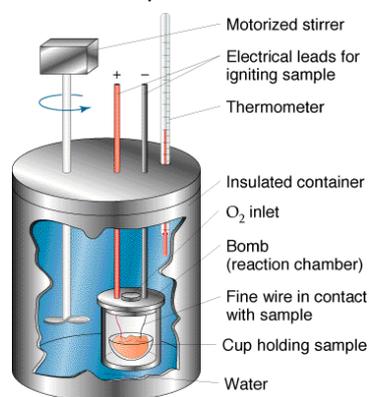
#### **Poder calorífico en base húmeda:**

**Superior.** Poder Calorífico Superior (PCS). Este se determina de manera similar al método anterior, pero en este caso, la muestra no se somete a un proceso de secado previo. La medición se realiza mediante la bomba calorimétrica PARR 1351, siguiendo el protocolo establecido por la norma UNE-EN 14918.

*Figura 48 Bomba calorimétrica (Parr 1351).*



Figura 49 Esquema de la bomba calorimétrica



**Inferior.** Poder Calorífico Inferior (PCI). Este se obtiene restando al Poder Calorífico Superior (PCS) en base húmeda el calor de vaporización del agua formada durante la combustión de la biomasa, considerando tanto el hidrógeno elemental presente en la biomasa como el contenido de agua inicial del combustible. La expresión utilizada para este cálculo es:

$$PCI_h = PCS_h - 5400H - 600X \quad \text{Ec. 18}$$

donde  $PCI_h$  es el poder calorífico inferior en kcal/kg de biomasa en base húmeda,  $PCS_h$  es el poder calorífico superior determinado anteriormente en kcal/kg de biomasa en base seca y  $X$  es el contenido en humedad determinada en el análisis inmediato.

### Estudio de fusibilidad de cenizas

El procedimiento operativo seguido se ajusta a la norma ASTM D 1857 "Standard Test Method for Fusibility of Coal and Coke Ash". Las cenizas fueron obtenidas mediante calcinación a 815°C en una atmósfera oxidante generada por un flujo de aire. La ejecución del ensayo se llevó a cabo utilizando un equipo automático LECO AF-700.

Para la realización del ensayo, se empleó una probeta con forma de pirámide de aristas vivas, con una base en forma de triángulo equilátero y una altura de aproximadamente 19 mm, tres veces la longitud del lado de la base. La probeta se fijó a un soporte cerámico con un adhesivo adecuado, y ambos se colocaron en el interior de un horno sobre un pedestal rotatorio. La temperatura máxima de trabajo del horno fue de 1500°C, con una velocidad de calentamiento controlada de 8 °C/min.

Durante todo el proceso de calentamiento, las dimensiones de la probeta fueron registradas de forma automática por el equipo, que cuenta con una cámara de vídeo y la correspondiente tarjeta de análisis de la señal. Se registraron de manera automática los cambios característicos siguientes:

**Temperatura de deformación inicial:** Temperatura a la cual se produce redondeamiento del vértice de la pirámide.

**Temperatura de reblandecimiento:** Temperatura a la cual la pirámide ha fundido hasta adquirir una forma casi semiesférica cuya altura es igual al diámetro de la base.

**Temperatura de hemisferio:** Temperatura a la cual la pirámide ha fundido hasta adquirir una forma semiesférica en la que la altura es igual al radio.

**Temperatura de fluidez:** Temperatura a la cual la pirámide ha fundido por completo extendiéndose en una capa casi plana con una altura máxima de 1.6 mm.

**Caracterización de elementos inorgánicos en muestras de biomasa y ceniza derivada.**

Mediante el proceso de calcinación de la muestra a una temperatura de 815°C, se procede a la identificación y cuantificación de los elementos mayoritarios y minoritarios presentes en las cenizas, incluyendo, entre otros, Ca, K, P, S, Fe, Al, Mg, Na, Si.

Recientemente, se ha validado la eficacia de la fluorescencia de rayos X (XRF) como un método rápido y eficiente para la determinación directa de elementos en muestras de biomasa sólida[180], Los resultados obtenidos mediante el análisis XRF mostraron una concordancia notable con los del método estándar actual, que implica la degradación por microondas con HF, HNO<sub>3</sub> y H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (DS/EN 15290), y la cuantificación de elementos minerales mediante ICP-OES. Estos estudios se centraron en materiales de referencia certificados y materias primas de biomasa cruda[181]

Se lleva a cabo mediante procedimiento interno utilizando la técnica de WDXRF (fluorescencia de Rayos X por dispersión de longitud de onda). Se ha realizado en un equipo Modelo S8 Tiger del fabricante Bruker.

#### **Especificaciones Técnicas del Equipo:**

- Excitación con fuente de Rayos X de Rh a 4 kW
- Condiciones de Voltaje e intensidad max. 60 kV y 170 mA
- Máscaras Disponibles: 32, 24 y 8 mm de diámetro.
- Cristales disponibles: XS-55, PET, LiF (200), XS-Ge-C, LiF (220), XS-B, XS-C y XS-N
- Detectores Automáticos proporcional y centelleo
- Software de tratamiento de datos Spectra Plus (Versión 3)

#### **Condiciones Específicas del Análisis:**

- Método de Análisis: QuantExpress
- Modo de evaluación: óxidos
- Preparación de la muestra: polvo sobre film de prolene
- Condiciones de atmósfera para la medida: atmósfera de He
- Diámetro de la máscara: 28 mm
- Método de medida: Full analysis
- Cristales empleados, sus intervalos de energía y elementos medibles:
- XS-5S, 0,48 – 1,63 keV, del O y Al.
- PET, 1,69 – 3,25 keV, del Si al Ar.
- LiF (200), 3,25 – 58 keV, del K al U.

### **Análisis de halógenos, cloro y fluor.**

- La biomasa a analizar se moltura y homogeniza con el equipo apropiado.
- Se pesa con precisión la muestra.
- Se calienta con agua mQ, en vaso cerrado a 120 grados.
- Se filtra por 45 micras.
- Las concentraciones de cloro y fluoruros se miden en el extracto acuoso obtenido.
- El método de análisis utilizado es la Cromatografía Iónica.

### **Análisis termogravimétrico**

#### **Condiciones del Análisis:**

Tipo de Ensayo: TG+MS

Crisol: Alúmina

Tratamiento en atmósfera y temperatura controlada:

- Inerte: Argón
- Oxidante: Argón+Oxígeno (80/20)

*Tabla 12 Protocolo de calentamiento TG-MS*

<b>Temperatura inicial, °C</b>	<b>Temperatura final, °C</b>	<b>Rampa, °C/min</b>	<b>Tiempo, min</b>
40			30
40	800	5	

Seguimiento Gaseoso mediante espectrometría de Masas del Tratamiento: Sí  
Relaciones m/z=H<sub>2</sub> (2), C (12), CH<sub>3</sub> (15), CH<sub>4</sub> (16), O<sub>2</sub> (16 y 32), OH (17), H<sub>2</sub>O (18),

CO/N<sub>2</sub> (28), CH<sub>3</sub>OH (31 y 32), Ar (40), CO<sub>2</sub> (44).

Condiciones del tratamiento

- Gas o Gases: Argón o Argón+Oxígeno (80/20)
- Flujo total: 100 mL/min

*Figura 50 Termobalanza acoplada al espectrómetro de masas para el ensayo TG-MS*



La figura 50 muestra la Termobalanza acoplada al espectrómetro de masas usada para este ensayo.

### **3.8.2 Ensayos de Pirólisis y Gasificación.**

#### **Instalación Experimental para pirólisis y gasificación.**

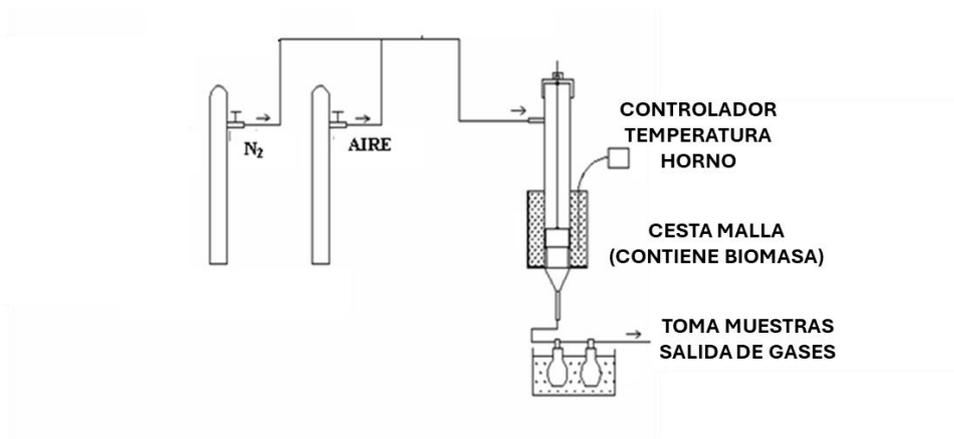
La figura 51 presenta un esquema de la instalación experimental utilizada en el proceso de pirólisis y gasificación. A continuación, se describen los elementos que componen dicha instalación:

- Se suministraron gases N<sub>2</sub> y aire (ambos ambientales y aspirados por un compresor) como parte del proceso. La presión (2 bar) y los caudales utilizados en cada serie experimental se controlaron mediante manorreductores y rotámetros, respectivamente.

- El sistema de calefacción y control de temperatura consta de un horno cilíndrico hueco que alberga el reactor para el proceso de gasificación o pirólisis, con capacidad para alcanzar temperaturas de hasta 1200 °C. Un sistema de control de temperatura permite ajustar las condiciones de trabajo y establecer la temperatura deseada. El horno utilizado (modelo C. I. Electronics TF/3/IZ/F/240 V) está construido con material cerámico, equipado con resistencias y recubierto de chapa. Sus dimensiones son de 40 cm de longitud, 4,4 cm de diámetro interno y 22 cm de diámetro externo.

El reactor utilizado para los procesos de pirólisis y gasificación es un cilindro de acero inoxidable equipado con una cesta de malla suspendida de un cable también de acero inoxidable, lo que permite su desplazamiento a lo largo del mismo. Sus dimensiones son de 75 cm de longitud, con un diámetro interno de 4 cm y un diámetro externo de 4,3 cm. En un lateral del reactor se encuentra una entrada para el gas de alimentación (en este caso, N<sub>2</sub>), mientras que en la parte inferior se encuentra una salida para los gases y productos condensables

*Figura 51 Instalación experimental para pirólisis y gasificación*



El sistema de condensación de gases y recogida de alquitranes está compuesto por una serie de condensadores dispuestos en serie y sumergidos en un baño de agua con hielo, donde se almacena la fase líquida resultante del proceso.

### **3.8.2.1 Proceso de pirólisis.**

Para llevar a cabo el proceso de pirólisis, se introdujo una masa inicial de 15 g en la cesta del reactor, colocándola en la parte superior del mismo. Luego, se encendió el sistema de calefacción a una velocidad de 20°C por minuto, y se inició la alimentación de N<sub>2</sub> a una velocidad de 120 cm<sup>3</sup> por minuto para asegurar una atmósfera inerte en todo el sistema. Una vez que se alcanzó la temperatura deseada para cada caso (500, 600 y 700°C), la cesta se bajó a través del reactor hasta que llegó al seno del horno. A partir de este momento, se consideró que la reacción se había iniciado y se mantuvo durante 60 minutos de manera isotérmica. Durante el proceso, los gases producidos en el reactor fueron dirigidos hacia un sistema de enfriamiento para recolectar la fracción condensable. Este sistema estaba compuesto por dos matraces conectados entre sí y sumergidos en agua con hielo.

Una vez que los gases se enfriaron, se hicieron pasar a través de un sistema de toma de muestras (bolsa Tesla), que se retiraba periódicamente para analizar el contenido de los gases correspondiente a las condiciones ensayadas. En el circuito experimental, este sistema estaba dispuesto de manera que el tomamuestras estaba conectado por un extremo a la válvula de tres vías y por otro al caudalímetro. Una vez finalizado este período de tiempo, se desconectó el sistema de calefacción y se elevó la cesta hasta la parte superior del reactor, manteniendo el flujo de N<sub>2</sub> hasta que el sistema alcanzó la temperatura ambiente.

Al concluir el proceso, se determinó el rendimiento de la fase sólida mediante pesaje. El Poder Calorífico Superior (PCS) del carbonizado se analizó utilizando una bomba calorimétrica (Parr 1351), siguiendo el protocolo establecido por la Norma ISO 192898. El PCS de la fase gaseosa se estimó a partir de su composición química, la cual fue analizada mediante cromatografía de gases.

### **3.8.2.2 Proceso de gasificación.**

Para realizar la gasificación de la materia prima, se introdujo una masa de 15 g en la cesta de malla y se depositó en la parte superior del reactor. Durante el

proceso de calentamiento, se suministró N<sub>2</sub> a una velocidad de 120 cm<sup>3</sup> por minuto para mantener una atmósfera inerte en el sistema. Una vez alcanzada la temperatura deseada, se substituyó la corriente de agente inerte por la de agente gasificante (aire), con un caudal de 100 cm<sup>3</sup> por minuto. Al finalizar el tiempo de gasificación previsto, se desconectó el sistema de calefacción y se substituyó el agente gasificante por N<sub>2</sub>, que se mantuvo hasta que la temperatura del reactor descendió por debajo de 100°C. El sistema de muestreo de gases y la determinación del rendimiento se llevaron a cabo de la misma manera que en el caso anterior.

### **Caracterización de los productos obtenidos después de pirólisis y gasificación.**

La caracterización de un sólido mediante diversos métodos tiene como objetivo comprender, tanto cualitativa como cuantitativamente, la composición superficial y las transformaciones experimentadas como resultado de un tratamiento térmico o una reacción química. A continuación, se presentan los análisis realizados tanto para el precursor inicial como para los productos obtenidos.

#### **Rendimiento sólido.**

Debido a la reacción de pirólisis o gasificación que tiene lugar en el interior del reactor, existe parte de los componentes del sólido que se volatilizan es interesante conocer en qué proporción se produce. Para ello es necesario conocer la masa inicial  $m_i$ , y la masa final tras la reacción,  $m_f$ . Conociendo estos valores podemos calcular este parámetro tal y como se muestra en la siguiente ecuación.

$$\text{Rendimiento sólido (\%)} = \frac{m_f}{m_i} * 100 \quad \text{Ec. 19.}$$

Los análisis elemental, inmediato y de poder calorífico de los subproductos de la pirólisis y la gasificación se llevaron a cabo utilizando los mismos métodos y equipos empleados en la caracterización de la combustión directa descritos anteriormente.

## 4 RESULTADOS

Este apartado presenta los resultados derivados de una serie de análisis exhaustivos, pruebas y experimentos llevados a cabo en la biomasa generada a partir de los residuos agroindustriales del proceso de refinación del cacao. Estos resultados se clasifican en dos categorías principales: los obtenidos de la biomasa líquida, resultado de la aplicación de procesos bioquímicos a la pulpa mucilaginosa, la cual se transformó en bioetanol. Este bioetanol fue sometido a pruebas prácticas en vehículos con motor de combustión interna para evaluar diversos parámetros de rendimiento. Además, se presentan los resultados derivados de los procesos termoquímicos aplicados a la biomasa sólida proveniente de los residuos de las cáscaras de las vainas del cacao. Se analizan los productos resultantes de la combustión directa, la gasificación y la pirólisis de dicha biomasa sólida.

### 4.1 Resultados experimentación al proceso bioquímico de la biomasa de la pulpa mucilaginosa.

#### 4.1.1 Resultados del Proceso de Fermentación.

*Figura 52 Medición de una muestra de alcohol de 86 grados con el alcoholímetro de Gay Lussac*



En la Tabla 13 se puede observar el nivel de azúcar por día medidos en grados Brix durante los 21 días del proceso de Fermentación.

Tabla 13 Niveles de azúcar por día proceso de fermentación del mucílago.

<b>Tiempo (días)</b>	<b>°brix</b>
1	18
2	16.8
3	16
4	15
5	14.3
6	13.1
7	12.8
8	11.9
9	11
10	10.6
11	10.2
12	9.7
13	9.4
14	9
15	8.6
16	8.2
17	7.9
18	7.4
19	7
20	6.5
21	6

#### **4.1.2 Resultados del Proceso de Destilación**

En la Tabla 14 se presenta el porcentaje de alcohol en relación con la temperatura después del proceso de primera destilación. Se realizaron ajustes en las temperaturas durante este proceso con el objetivo de maximizar el rendimiento de alcohol en la primera destilación. Estos ajustes se realizaron con miras a optimizar la temperatura en la segunda destilación, buscando así obtener la máxima cantidad de bioetanol posible a la temperatura óptima.

Tabla 14 Porcentaje de alcohol a la primera destilación

T (°C)	% Alcohol
100	0
96.5	2
94.5	14
88.5	38
84.5	45
83.5	48
82.5	50
81.5	52,5
80.5	64
78,5	66

Tabla 15 Porcentaje de alcohol a la temperatura de 78°C primera y segunda destilación

T (°C)	Primera destilación	Segunda destilación
78	66%	92%

Figura 53 Proceso de fermentado y destilado en el Laboratorio



### 4.1.3 Resultados de caracterización del biocombustible mezcla E5 según INEN 2102.

La Tabla 16 muestra la caracterización del biocombustible en la mezcla E5 (5% bioetanol obtenido del proceso bioquímico aplicado al mucílago del cacao y 95% gasolina extra, grado octano 85 RON).

Tabla 16 Caracterización del biocombustible de mezcla E5 según INEN 2102.

ENSAYO	BIOCOMBUSTIBLE	UNIDAD	NORMA METODO
Grado Octano (RON)	85.8	----	NTE INEN 2102
Poder calorífico inferior	45217,737	kJ/kg	ASTM D4809-18
Temperatura 10%	54.1	°C	ASTM D86-15
Temperatura 50%	107	°C	ASTM D86-15
Temperatura 90%	164	°C	ASTM D86-15
Punto Final	210	°C	ASTM D86-15
Residuo	1.01	%	ASTM D86-15
Presión de vapor Ried	56,05	KPa	ASTM D323-15a
Corrosión a la lámina de cobre	1	-----	ASTM D130-12
Contenido de azufre	0.059	%	ASTM D4292-16
Contenido de goma	3	Mg/100ml	ASTM D381-12

### 4.1.4 Resultados de la prueba estática de emisiones en los vehículos.

En esta sección, se presentan los resultados de las emisiones de diversas gasolinas comerciales en Ecuador (Extra, 85 Octanos RON y Super 92 Octanos RON), así como del biocombustible. Las pruebas se realizaron en dos vehículos disponibles para la experimentación, Hyundai I10 2020 y Chevrolet Optra 2006, a dos diferentes velocidades de motor (2500 rpm y 700 rpm) durante un periodo de 30 segundos, promediando los resultados de las tres pruebas realizadas en cada caso.

#### 4.1.4.1 Datos recolectados de análisis de emisiones del vehículo Hyundai i10 Sedán 2020.

Tabla 17 Resultados de emisiones de la primera prueba a 2500 rpm con Extra.

<b>Gasolina Extra</b>					
<b>Primera Prueba</b>					
<b>Ralentí acelerado a 2500 rpm</b>					
<b>Tiempo</b>	<b>CO(%vol.)</b>	<b>CO<sub>2</sub>(% vol.)</b>	<b>HC(ppm)</b>	<b>λ</b>	<b>O<sub>2</sub>(% vol.)</b>
0	0,4	14,2	94	0,987	0,08
1	0,4	14,1	100	0,988	0,09
2	0,4	14,1	100	0,988	0,11
3	0,5	14,0	111	0,987	0,12
4	0,5	14,0	111	0,987	0,14
5	0,5	14,0	125	0,987	0,17
6	0,5	13,9	134	0,998	0,20
7	0,5	13,9	134	0,990	0,24
8	0,6	13,8	153	0,992	0,28
9	0,6	13,8	163	0,990	0,32
10	0,7	13,7	175	0,993	0,42
11	0,7	13,6	184	0,995	0,42
12	0,7	13,6	184	0,994	0,49
13	0,8	13,4	195	0,995	0,56
14	0,9	13,3	218	1,000	0,63
15	0,9	13,2	233	1,002	0,82
16	1,0	13,0	256	1,005	0,82
17	1,1	12,8	274	1,011	0,95
18	1,1	12,8	274	1,010	1,13
19	1,1	12,5	296	1,020	1,38
20	1,1	12,3	312	1,036	1,70
21	1,1	11,9	329	1,062	2,12
22	1,2	12,4	263	1,110	2,63
23	1,2	12,4	263	1,111	3,09
24	1,2	12,8	232	1,119	3,34
25	0,7	12,9	231	1,127	3,13
26	0,5	12,9	230	1,096	2,38
27	0,5	13,4	224	1,042	1,34
28	0,5	13,5	221	1,012	0,76
29	0,5	13,6	219	1,009	0,69

30                      0,5                      13,7                      218                      1,011                      0,71

Tabla 18      *Resultados de emisiones de la primera prueba a 700 rpm con Extra.*

<b>Gasolina Extra</b>					
<b>Primera Prueba</b>					
<b>Ralentí normal a 700 rpm</b>					
Tiempo	CO(% vol.)	CO <sub>2</sub> (% vol.)	HC (ppm)	λ	O <sub>2</sub> (% vol.)
0	0,2	14,3	115	0,988	0,00
1	0,2	14,3	116	0,988	0,00
2	0,2	14,3	116	0,988	0,00
3	0,2	14,3	116	0,988	0,00
4	0,3	14,3	115	0,988	0,00
5	0,3	14,3	115	0,988	0,00
6	0,3	14,3	115	0,987	0,00
7	0,3	14,3	115	0,987	0,00
8	0,3	14,3	114	0,987	0,00
9	0,3	14,3	110	0,988	0,00
10	0,2	14,3	109	0,989	0,01
11	0,2	14,3	109	0,989	0,02
12	0,3	14,3	110	0,989	0,02
13	0,3	14,3	110	0,989	0,03
14	0,3	14,3	110	0,989	0,04
15	0,3	14,2	111	0,989	0,05
16	0,3	14,2	112	0,988	0,05
17	0,3	14,2	112	0,989	0,07
18	0,3	14,2	113	0,989	0,08
19	0,3	14,2	113	0,990	0,10
20	0,4	14,2	114	0,989	0,11
21	0,4	14,1	114	0,990	0,15
22	0,4	14,1	113	0,991	0,16
23	0,4	14,1	112	0,992	0,19
24	0,4	14,0	113	0,995	0,22
25	0,5	14,0	116	0,995	0,26
26	0,5	13,9	117	0,994	0,29
27	0,5	13,8	119	0,995	0,35
28	0,6	13,8	121	1,000	0,40
29	0,6	13,8	121	1,000	0,48
30	0,7	13,6	125	1,002	0,56

Tabla 19 Resultados de emisiones de la segunda prueba a 2500 rpm con Extra.

<b>Gasolina Extra</b>					
<b>Segunda Prueba</b>					
<b>Ralentí acelerado a 2500 rpm</b>					
<b>Tiempo</b>	<b>CO(% vol.)</b>	<b>CO<sub>2</sub>(% vol.)</b>	<b>HC (ppm)</b>	<b>λ</b>	<b>O<sub>2</sub>(% vol.)</b>
0	0,5	14,4	65	0,983	0,00
1	0,5	14,4	66	0,982	0,00
2	0,5	14,4	66	0,982	0,00
3	0,5	14,4	67	0,982	0,01
4	0,5	14,4	69	0,982	0,01
5	0,5	14,4	71	0,982	0,02
6	0,5	14,4	75	0,984	0,02
7	0,5	14,4	79	0,984	0,03
8	0,5	14,4	82	0,985	0,03
9	0,5	14,5	88	0,986	0,05
10	0,4	14,5	92	0,987	0,06
11	0,4	14,4	97	0,987	0,07
12	0,4	14,4	100	0,987	0,08
13	0,4	14,4	101	0,988	0,10
14	0,4	14,4	99	0,989	0,10
15	0,4	14,4	99	0,989	0,12
16	0,4	14,4	96	0,991	0,16
17	0,4	14,4	92	0,994	0,20
18	0,4	14,4	85	1,001	0,26
19	0,4	14,3	75	1,005	0,43
20	0,4	14,2	71	1,009	0,53
21	0,4	14,2	71	1,016	0,66
22	0,4	14,2	62	1,023	0,78
23	0,1	14,2	59	1,038	0,90
24	0,1	14,1	57	1,051	0,99
25	0,1	14,0	53	1,057	1,08
26	0,1	13,9	51	1,066	1,19
27	0,1	13,6	49	1,068	1,37
28	0,1	13,3	49	1,084	1,64
29	0,1	13,3	49	1,104	2,03
30	0,1	12,0	30	1,147	2,55

Tabla 20 Resultados de emisiones de la segunda prueba a 700 rpm con Extra.

<b>Gasolina Extra</b>					
<b>Segunda Prueba</b>					
<b>Ralentí normal a 700 rpm</b>					
<b>Tiempo</b>	<b>CO(% vol.)</b>	<b>CO<sub>2</sub> (% vol.)</b>	<b>HC (ppm)</b>	<b>λ</b>	<b>O<sub>2</sub> (% vol.)</b>
0	0,1	14,8	54	0,998	0,00
1	0,1	14,8	55	0,997	0,00
2	0,1	14,7	55	0,997	0,00
3	0,1	14,7	55	0,997	0,00
4	0,1	14,8	55	0,997	0,00
5	0,1	14,8	56	0,998	0,01
6	0,1	14,7	56	0,998	0,02
7	0,1	14,7	56	0,998	0,02
8	0,1	14,7	57	0,998	0,03
9	0,1	14,7	57	0,999	0,05
10	0,1	14,7	57	1,000	0,06
11	0,1	14,7	58	1,001	0,09
12	0,1	14,6	58	1,001	0,10
13	0,1	14,6	58	1,003	0,14
14	0,1	14,5	58	1,003	0,15
15	0,1	14,5	59	1,005	0,19
16	0,1	14,4	59	1,007	0,23
17	0,1	14,3	59	1,009	0,29
18	0,1	14,2	60	1,012	0,35
19	0,1	14,1	60	1,015	0,43
20	0,1	13,9	60	1,019	0,52
21	0,2	13,8	61	1,024	0,63
22	0,2	13,5	62	1,030	0,76
23	0,2	13,3	63	1,038	0,92
24	0,4	13,4	66	1,039	1,07
25	0,4	13,5	66	1,043	1,20
26	0,5	13,6	66	1,043	1,20
27	0,5	13,6	66	1,035	1,04
28	0,5	14,1	65	0,999	0,71
29	0,5	14,3	63	0,999	0,32
30	0,5	14,4	61	0,989	0,09

Tabla 21 Resultados de emisiones de la tercera prueba a 2500 rpm con Extra.

<b>Gasolina Extra</b>					
<b>Tercera Prueba</b>					
<b>Ralentí acelerado a 2500 rpm</b>					
<b>Tiempo</b>	<b>CO (% vol.)</b>	<b>CO<sub>2</sub> (% vol.)</b>	<b>HC (ppm)</b>	<b>λ</b>	<b>O<sub>2</sub>(% vol.)</b>
0	0,3	14,7	58	0,990	0,01
1	0,2	14,7	60	0,991	0,01
2	0,2	14,7	62	0,992	0,02
3	0,2	14,8	63	0,992	0,00
4	0,2	14,8	66	0,992	0,02
5	0,2	14,7	71	0,991	0,03
6	0,3	14,7	74	0,991	0,03
7	0,3	14,7	79	0,991	0,06
8	0,3	14,7	83	0,990	0,07
9	0,3	14,7	87	0,990	0,07
10	0,3	14,7	91	0,990	0,08
11	0,3	14,7	96	0,992	0,11
12	0,3	14,7	101	0,992	0,12
13	0,3	14,7	101	0,993	0,15
14	0,4	14,6	114	0,993	0,19
15	0,4	14,5	106	0,994	0,24
16	0,5	14,4	101	1,001	0,30
17	0,5	14,4	101	1,005	0,49
18	0,5	14,3	101	1,010	0,49
19	0,5	14,2	98	1,011	0,61
20	0,4	14,2	97	1,018	0,73
21	0,4	14,1	95	1,025	0,84
22	0,3	14,1	94	1,031	0,93
23	0,3	14,0	94	1,037	1,02
24	0,3	14,0	92	1,043	1,11
25	0,2	13,9	87	1,051	1,24
26	0,2	13,8	84	1,060	1,42
27	0,2	13,7	83	1,084	1,64
28	0,2	13,5	82	1,085	1,87
29	0,2	13,5	82	1,098	2,11
30	0,2	13,0	82	1,113	2,36

Tabla 22 Resultados de emisiones de la tercera prueba a 700 rpm con Extra.

---

**Gasolina Extra****Tercera Prueba****Ralentí normal a 700 rpm**

---

<b>Tiempo</b>	<b>CO (% vol.)</b>	<b>CO<sub>2</sub> (% vol.)</b>	<b>HC (ppm)</b>	<b>λ</b>	<b>O<sub>2</sub> (% vol.)</b>
<b>0</b>	0,1	14,8	52	0,997	0,00
<b>1</b>	0,1	14,8	53	0,997	0,00
<b>2</b>	0,1	14,9	53	0,997	0,00
<b>3</b>	0,1	14,9	53	0,998	0,01
<b>4</b>	0,1	14,9	53	0,998	0,02
<b>5</b>	0,1	14,8	54	0,998	0,03
<b>6</b>	0,1	14,8	54	0,999	0,03
<b>7</b>	0,1	14,8	54	0,999	0,05
<b>8</b>	0,1	14,8	54	0,999	0,06
<b>9</b>	0,1	14,8	55	1,001	0,09
<b>10</b>	0,1	14,8	55	1,001	0,09
<b>11</b>	0,1	14,8	56	1,003	0,13
<b>12</b>	0,1	14,7	56	1,003	0,14
<b>13</b>	0,1	14,7	56	1,005	0,18
<b>14</b>	0,1	14,7	56	1,006	0,20
<b>15</b>	0,1	14,6	57	1,008	0,25
<b>16</b>	0,1	14,6	57	1,010	0,29
<b>17</b>	0,1	14,5	57	1,015	0,36
<b>18</b>	0,1	14,5	58	1,019	0,41
<b>19</b>	0,1	14,4	58	1,019	0,50
<b>20</b>	0,1	14,3	58	1,023	0,59
<b>21</b>	0,1	14,1	59	1,029	0,73
<b>22</b>	0,1	14,0	59	1,036	0,87
<b>23</b>	0,2	13,8	60	1,045	1,05
<b>24</b>	0,2	13,5	64	1,055	1,25
<b>25</b>	0,2	13,3	65	1,067	1,49
<b>26</b>	0,2	13,6	64	1,076	1,70
<b>27</b>	0,3	13,7	64	1,081	1,83
<b>28</b>	0,3	13,8	64	1,077	1,77
<b>29</b>	0,3	13,9	63	1,059	1,45
<b>30</b>	0,4	14,4	63	1,001	0,87

---

Tabla 23 Resultados de emisiones de la primera prueba a 2500 rpm con Super.

<b>Gasolina Super</b>					
<b>Primera Prueba</b>					
<b>Ralentí acelerado a 2500 rpm</b>					
<b>Tiempo</b>	<b>CO (% vol.)</b>	<b>CO<sub>2</sub> (% vol.)</b>	<b>HC (ppm)</b>	<b>λ</b>	<b>O<sub>2</sub> (% vol.)</b>
0	0,01	12,0	22	1,244	4,19
1	0,01	12,1	23	1,240	4,15
2	0,01	12,1	23	1,238	4,11
3	0,02	12,1	23	1,235	4,07
4	0,02	12,1	24	1,230	4,03
5	0,03	12,1	24	1,230	4,03
6	0,03	12,1	24	1,230	3,99
7	0,03	12,1	24	1,230	3,99
8	0,02	12,1	24	1,233	4,03
9	0,02	12,1	24	1,236	4,07
10	0,02	11,9	24	1,241	4,11
11	0,02	11,8	24	1,245	4,14
12	0,03	11,8	23	1,249	4,18
13	0,03	11,7	23	1,255	4,27
14	0,03	11,6	23	1,265	4,41
15	0,03	11,5	22	1,280	4,61
16	0,03	11,3	22	1,301	4,86
17	0,03	11,1	22	1,324	4,86
18	0,04	10,8	21	1,356	5,47
19	0,05	10,8	21	1,377	5,79
20	0,04	10,9	21	1,385	5,97
21	0,04	10,9	21	1,381	5,91
22	0,04	11,2	20	1,348	5,58
23	0,04	11,4	20	1,315	5,12
24	0,04	11,5	20	1,290	4,76
25	0,04	11,5	19	1,291	4,76
26	0,05	11,3	19	1,307	4,94
27	0,05	11,2	18	1,325	5,18
28	0,05	11,0	16	1,346	5,42
29	0,04	10,9	15	1,359	5,58
30	0,04	10,9	16	1,364	5,58

Tabla 24 Resultados de emisiones de la primera prueba a 700 rpm con Super.

<b>Gasolina Super</b>						
<b>Primera Prueba</b>						
<b>Ralentí normal a 700 rpm</b>						
<b>Tiempo</b>	<b>CO vol.)</b>	<b>(% CO<sub>2</sub> (% vol.)</b>	<b>HC (ppm)</b>	<b>λ</b>	<b>O<sub>2</sub> (% vol.)</b>	
0	0,00	11,3	10	1,324	5,23	
1	0,00	11,3	10	1,321	5,18	
2	0,01	11,3	10	1,321	5,18	
3	0,01	11,3	9	1,319	5,16	
4	0,01	11,3	10	1,319	5,15	
5	0,01	11,3	10	1,319	5,15	
6	0,01	11,3	10	1,319	5,16	
7	0,01	11,3	10	1,320	5,16	
8	0,01	11,3	11	1,322	5,19	
9	0,01	11,3	11	1,324	5,21	
10	0,01	11,3	11	1,324	5,22	
11	0,02	11,3	12	1,322	5,19	
12	0,02	11,3	12	1,319	5,17	
13	0,03	11,3	12	1,318	5,14	
14	0,03	11,3	12	1,316	5,14	
15	0,03	11,3	13	1,315	5,11	
16	0,03	11,3	13	1,315	5,11	
17	0,02	11,4	13	1,315	5,10	
18	0,02	11,4	14	1,315	5,10	
19	0,02	11,4	14	1,315	5,10	
20	0,02	11,4	14	1,315	5,11	
21	0,02	11,3	15	1,317	5,12	
22	0,00	11,3	15	1,321	5,17	
23	0,00	11,1	15	1,331	5,24	
24	0,00	10,9	16	1,343	5,36	
25	0,00	10,8	16	1,357	5,51	
26	0,01	10,8	16	1,371	5,73	
27	0,01	11,2	17	1,371	5,93	
28	0,01	11,2	17	1,381	6,10	
29	0,01	11,3	17	1,379	6,10	
30	0,01	11,3	17	1,360	6,10	

Tabla 25 Resultados de emisiones de la segunda prueba a 2500 rpm con Super.

<b>Gasolina Super</b>					
<b>Segunda Prueba</b>					
<b>Ralentí acelerado a 2500 rpm</b>					
<b>Tiempo</b>	<b>CO (% vol.)</b>	<b>CO<sub>2</sub> (% vol.)</b>	<b>HC (ppm)</b>	<b>λ</b>	<b>O<sub>2</sub> (% vol.)</b>
0	0,01	11,8	33	1,276	4,68
1	0,02	11,7	33	1,283	4,77
2	0,02	11,7	34	1,289	4,83
3	0,02	11,6	34	1,295	4,89
4	0,02	11,6	34	1,301	4,99
5	0,01	11,4	34	1,313	5,13
6	0,01	11,3	35	1,329	5,33
7	0,01	11,0	35	1,353	5,33
8	0,01	10,8	35	1,382	5,92
9	0,02	10,8	35	1,406	6,31
10	0,02	10,9	36	1,429	6,71
11	0,02	11,0	38	1,444	7,02
12	0,02	11,0	38	1,446	7,05
13	0,01	11,1	38	1,416	6,61
14	0,01	11,2	38	1,360	5,79
15	0,01	11,7	38	1,303	5,79
16	0,01	11,8	38	1,285	4,82
17	0,01	11,7	37	1,289	4,87
18	0,02	11,7	38	1,293	4,93
19	0,02	11,7	38	1,297	4,97
20	0,03	11,7	38	1,298	5,00
21	0,03	11,7	40	1,300	5,02
22	0,03	11,6	42	1,302	5,05
23	0,03	11,6	43	1,307	5,10
24	0,03	11,3	42	1,328	5,18
25	0,04	11,1	41	1,350	5,34
26	0,04	10,8	38	1,360	5,60
27	0,05	10,6	37	1,392	5,96
28	0,05	10,6	37	1,418	6,35
29	0,05	10,3	37	1,454	6,71
30	0,05	10,1	37	1,484	7,00

Tabla 26 Resultados de emisiones de la segunda prueba a 700 rpm con Super.

<b>Gasolina Super</b>					
<b>Segunda Prueba</b>					
<b>Ralentí normal a 700 rpm</b>					
<b>Tiempo</b>	<b>CO (% vol.)</b>	<b>CO<sub>2</sub> (% vol.)</b>	<b>HC (ppm)</b>	<b>λ</b>	<b>O<sub>2</sub> (% vol.)</b>
0	0,01	11,6	21	1,303	5,04
1	0,01	11,6	21	1,303	5,03
2	0,01	11,3	21	1,302	5,03
3	0,02	11,3	22	1,302	5,02
4	0,02	11,6	22	1,301	5,02
5	0,01	11,7	23	1,301	5,02
6	0,01	11,7	23	1,301	5,02
7	0,02	11,7	23	1,301	5,02
8	0,02	11,3	24	1,301	5,02
9	0,02	11,3	24	1,301	5,02
10	0,02	11,6	24	1,302	5,03
11	0,02	11,6	24	1,303	5,03
12	0,02	11,6	24	1,304	5,06
13	0,02	11,6	25	1,306	5,07
14	0,03	11,6	25	1,308	5,10
15	0,03	11,5	26	1,311	5,12
16	0,03	11,5	26	1,314	5,17
17	0,03	11,4	26	1,318	5,21
18	0,03	11,4	27	1,324	5,26
19	0,02	11,3	27	1,330	5,34
20	0,02	11,2	27	1,349	5,44
21	0,02	11,0	27	1,364	5,57
22	0,02	10,8	28	1,372	5,75
23	0,02	10,6	28	1,393	5,98
24	0,02	10,9	28	1,401	6,25
25	0,01	11,1	29	1,413	6,54
26	0,01	11,1	29	1,426	6,78
27	0,00	11,2	29	1,427	6,83
28	0,00	11,2	29	1,408	6,53
29	0,01	11,5	30	1,356	6,53
30	0,01	11,7	30	1,300	5,85

Tabla 27 Resultados de emisiones de la tercera prueba a 2500 rpm con Super.

<b>Gasolina Super</b>					
<b>Tercera Prueba</b>					
<b>Ralentí acelerado a 2500 rpm</b>					
<b>Tiempo</b>	<b>CO (% vol.)</b>	<b>CO<sub>2</sub> (% vol.)</b>	<b>HC (ppm vol.)</b>	<b>λ</b>	<b>O<sub>2</sub> (% vol.)</b>
0	0,01	12,1	26	1,247	4,29
1	0,02	12,1	25	1,249	4,29
2	0,02	12,1	25	1,249	4,32
3	0,03	12,1	25	1,250	4,32
4	0,03	12,1	24	1,252	4,35
5	0,03	12,1	24	1,253	4,37
6	0,02	12,0	24	1,255	4,40
7	0,02	12,0	24	1,256	4,41
8	0,01	12,0	24	1,258	4,44
9	0,00	12,0	23	1,260	4,46
10	0,00	12,0	23	1,263	4,50
11	0,00	12,0	23	1,265	4,53
12	0,01	11,9	22	1,268	4,57
13	0,01	11,9	22	1,271	4,60
14	0,01	11,9	22	1,274	4,65
15	0,01	11,8	21	1,277	4,69
16	0,02	11,8	21	1,281	4,74
17	0,02	11,8	21	1,285	4,78
18	0,02	11,7	20	1,291	4,83
19	0,02	11,7	20	1,291	4,87
20	0,03	11,7	20	1,293	4,91
21	0,03	11,7	20	1,294	4,91
22	0,04	11,7	19	1,296	4,94
23	0,05	11,6	19	1,299	4,97
24	0,05	11,6	19	1,304	5,02
25	0,04	11,5	18	1,311	5,10
26	0,04	11,4	18	1,322	5,23
27	0,03	11,4	18	1,335	5,40
28	0,02	11,1	18	1,353	5,60
29	0,02	11,0	17	1,369	5,80
30	0,03	10,8	17	1,398	5,98

Tabla 28 Resultados de emisiones de la tercera prueba a 700 rpm con Super.

<b>Gasolina Super</b>					
<b>Tercera Prueba</b>					
<b>Ralentí normal a 700 rpm</b>					
<b>Tiempo</b>	<b>CO (% vol.)</b>	<b>CO<sub>2</sub> (% vol.)</b>	<b>HC (ppm)</b>	<b>λ</b>	<b>O<sub>2</sub> (% vol.)</b>
0	0,01	11,6	16	1,299	4,96
1	0,02	11,6	16	1,299	4,95
2	0,02	11,6	16	1,298	4,95
3	0,01	11,6	16	1,297	4,94
4	0,01	11,7	17	1,297	4,93
5	0,01	11,7	17	1,296	4,93
6	0,01	11,7	17	1,295	4,91
7	0,01	11,7	18	1,295	4,91
8	0,01	11,7	18	1,295	4,90
9	0,00	11,6	19	1,295	4,91
10	0,00	11,6	19	1,297	4,92
11	0,00	11,6	19	1,300	4,96
12	0,00	11,5	19	1,304	5,00
13	0,01	11,5	20	1,308	5,05
14	0,01	11,4	20	1,312	5,10
15	0,01	11,4	20	1,322	5,17
16	0,01	11,3	21	1,330	5,23
17	0,01	11,3	21	1,330	5,33
18	0,01	11,2	21	1,340	5,44
19	0,01	11,1	21	1,352	5,58
20	0,02	10,7	22	1,376	5,77
21	0,02	10,5	22	1,400	6,00
22	0,02	10,3	22	1,425	6,27
23	0,02	11,0	24	1,419	6,58
24	0,02	11,3	25	1,431	6,86
25	0,02	11,3	25	1,431	6,99
26	0,02	11,4	25	1,417	6,79
27	0,01	11,5	26	1,376	6,15
28	0,01	11,8	27	1,310	5,25
29	0,01	12,0	28	1,263	4,53
30	0,01	12,1	28	1,243	4,23

Tabla 29 Resultados de emisiones de la primera prueba a 2500 rpm con Biocombustible.

<b>Biocombustible</b>					
<b>Primera Prueba</b>					
<b>Ralentí acelerado a 2500 rpm</b>					
Tiempo	CO (% vol.)	CO <sub>2</sub> (% vol.)	HC (ppm )	λ	O <sub>2</sub> (% vol.)
0	0,2	14,5	30	0,993	0,01
1	0,2	14,5	30	0,993	0,02
2	0,2	14,5	31	0,994	0,03
3	0,2	14,5	32	0,995	0,03
4	0,1	14,5	34	0,996	0,03
5	0,1	14,5	35	0,997	0,06
6	0,1	14,5	36	0,999	0,06
7	0,1	14,5	36	0,999	0,07
8	0,1	14,5	36	0,999	0,08
9	0,1	14,5	35	1,001	0,11
10	0,1	14,5	35	1,001	0,12
11	0,1	14,4	35	1,002	0,15
12	0,2	14,4	35	1,002	0,18
13	0,2	14,4	34	1,004	0,24
14	0,2	14,3	34	1,006	0,30
15	0,3	14,3	34	1,010	0,39
16	0,3	14,2	33	1,015	0,50
17	0,3	14,1	33	1,021	0,64
18	0,3	14,0	33	1,029	0,79
19	0,1	14,0	32	1,043	0,97
20	0,1	13,9	32	1,054	1,13
21	0,1	13,8	32	1,063	1,31
22	0,1	13,6	30	1,074	1,50
23	0,1	13,4	28	1,088	1,75
24	0,1	13,1	26	1,108	2,09
25	0,1	12,8	26	1,137	2,55
26	0,1	12,3	27	1,174	3,13
27	0,1	11,8	28	1,219	3,77
28	0,1	11,1	29	1,275	4,49
29	0,1	10,3	16	1,358	5,39
30	0,1	9,1	10	1,484	5,39

Tabla 30 Resultados de emisiones de la primera prueba a 700 rpm con Biocombustible.

<b>Biocombustible</b>					
<b>Primera Prueba</b>					
<b>Ralentí normal a 700 rpm</b>					
Tiempo	CO (% vol.)	CO <sub>2</sub> (% vol.)	HC (ppm)	λ	O <sub>2</sub> (% vol.)
0	0,1	14,7	21	0,998	0,00
1	0,1	14,7	21	0,998	0,00
2	0,1	14,7	22	0,998	0,00
3	0,1	14,7	22	0,998	0,00
4	0,1	14,7	22	0,998	0,00
5	0,1	14,7	23	0,998	0,01
6	0,1	14,8	23	0,998	0,01
7	0,1	14,8	23	0,999	0,02
8	0,1	14,8	23	0,999	0,30
9	0,1	14,8	24	0,999	0,04
10	0,1	14,8	24	0,999	0,04
11	0,1	14,8	24	1,000	0,05
12	0,1	14,7	25	1,001	0,07
13	0,1	14,7	25	1,002	0,08
14	0,1	14,5	25	1,004	0,11
15	0,1	14,4	26	1,004	0,12
16	0,1	14,3	26	1,006	0,15
17	0,1	14,3	26	1,007	0,18
18	0,1	14,2	26	1,009	0,22
19	0,1	14,1	27	1,011	0,27
20	0,1	13,9	27	1,012	0,34
21	0,2	13,8	29	1,014	0,42
22	0,2	13,6	31	1,019	0,51
23	0,2	13,4	32	1,025	0,61
24	0,2	13,4	32	1,029	0,71
25	0,2	13,5	31	1,032	0,76
26	0,2	13,6	29	1,031	0,74
27	0,2	13,7	28	1,025	0,64
28	0,2	14,0	27	1,018	0,51
29	0,2	14,2	27	1,012	0,38
30	0,1	14,4	28	1,004	0,38

Tabla 31 Resultados de emisiones de la segunda prueba a 2500 rpm con Biocombustible.

<b>Biocombustible</b>					
<b>Segunda Prueba</b>					
<b>Ralentí acelerado a 2500 rpm</b>					
<b>Tiempo</b>	<b>CO (% vol.)</b>	<b>CO<sub>2</sub> (% vol.)</b>	<b>HC (ppm)</b>	<b>λ</b>	<b>O<sub>2</sub> (% vol.)</b>
0	0,3	14,9	20	0,992	0,03
1	0,3	14,9	20	0,993	0,04
2	0,3	15,0	19	0,994	0,04
3	0,2	15,0	18	0,996	0,05
4	0,2	15,0	18	0,997	0,05
5	0,1	15,0	19	0,999	0,06
6	0,1	15,0	19	1,000	0,07
7	0,1	15,0	20	1,001	0,07
8	0,1	15,0	21	1,001	0,10
9	0,1	15,0	20	1,002	0,13
10	0,1	15,0	20	1,004	0,15
11	0,1	14,9	20	1,006	0,19
12	0,1	14,9	20	1,008	0,24
13	0,1	14,9	20	1,011	0,30
14	0,1	14,8	20	1,015	0,38
15	0,1	14,7	21	1,020	0,49
16	0,1	14,6	21	1,026	0,62
17	0,1	14,5	20	1,034	0,78
18	0,1	14,0	20	1,044	0,97
19	0,1	14,0	19	1,067	1,18
20	0,1	14,0	19	1,067	1,42
21	0,1	13,8	19	1,082	1,68
22	0,1	13,5	19	1,099	1,68
23	0,1	13,1	19	1,122	2,37
24	0,1	12,8	18	1,151	2,84
25	0,1	12,3	18	1,189	3,40
26	0,1	11,8	18	1,235	4,07
27	0,1	11,1	17	1,292	4,78
28	0,1	10,5	17	1,356	5,52
29	0,2	9,6	17	1,454	6,41
30	0,2	8,6	17	1,586	7,53

Tabla 32 Resultados de emisiones de la segunda prueba a 700 rpm con Biocombustible.

<b>Biocombustible</b>					
<b>Segunda Prueba</b>					
<b>Ralentí normal a 700 rpm</b>					
Tiempo	CO (% vol.)	CO <sub>2</sub> (% vol.)	HC (ppm)	λ	O <sub>2</sub> (% vol.)
0	0,1	11,0	15,1	0,999	0,00
1	0,1	11,0	15,1	0,999	0,00
2	0,1	12,0	15,1	0,999	0,00
3	0,1	12,0	15,1	0,999	0,00
4	0,1	12,0	15,1	0,999	0,00
5	0,1	13,0	15,1	0,999	0,00
6	0,1	13,0	15,1	0,999	0,00
7	0,1	13,0	15,1	0,999	0,00
8	0,1	14,0	15,1	0,999	0,00
9	0,1	14,0	15,1	0,999	0,00
10	0,1	14,0	15,1	0,999	0,00
11	0,1	14,0	15	0,999	0,00
12	0,1	15,0	15	0,999	0,00
13	0,1	15,0	15	0,999	0,00
14	0,1	15,0	15	0,999	0,00
15	0,1	15,0	16	0,999	0,01
16	0,1	14,9	16	0,999	0,02
17	0,1	14,9	16	0,999	0,02
18	0,1	14,8	17	0,999	0,03
19	0,1	14,8	17	0,999	0,04
20	0,1	14,7	17	1,000	0,06
21	0,1	14,6	17	1,000	0,07
22	0,2	14,5	22	1,001	0,09
23	0,2	14,3	20	1,002	0,15
24	0,2	14,2	21	1,002	0,15
25	0,2	14,0	23	1,003	0,19
26	0,3	13,9	23	1,003	0,27
27	0,3	14,0	23	1,002	0,28
28	0,4	14,1	23	0,999	0,25
29	0,4	14,4	22	0,996	0,18
30	0,4	14,6	21	0,992	0,11

Tabla 33 Resultados de emisiones de la tercera prueba a 2500 rpm con Biocombustible.

<b>Biocombustible</b>					
<b>Tercera Prueba</b>					
<b>Ralentí acelerado a 2500 rpm</b>					
Tiempo	CO (% vol.)	CO <sub>2</sub> (% vol.)	HC (ppm)	λ	O <sub>2</sub> (% vol.)
0	0,3	14,8	22	0,990	0,00
1	0,3	14,8	23	0,991	0,00
2	0,3	14,9	23	0,991	0,00
3	0,3	14,9	23	0,991	0,00
4	0,3	14,8	22	0,991	0,00
5	0,3	14,8	22	0,990	0,01
6	0,3	14,8	22	0,990	0,01
7	0,3	14,8	21	0,993	0,02
8	0,2	14,8	21	0,994	0,03
9	0,2	14,9	21	0,994	0,03
10	0,2	14,9	20	0,995	0,04
11	0,2	14,9	20	0,995	0,05
12	0,2	14,9	20	0,996	0,06
13	0,2	14,9	20	0,996	0,06
14	0,2	14,9	19	0,998	0,09
15	0,2	14,9	19	0,998	0,11
16	0,2	14,9	19	1,000	0,14
17	0,2	14,8	18	1,002	0,19
18	0,2	14,8	18	1,004	0,24
19	0,2	14,8	18	1,008	0,30
20	0,2	14,7	17	1,011	0,38
21	0,2	14,7	17	1,016	0,47
22	0,2	14,6	17	1,021	0,56
23	0,1	14,6	17	1,026	0,65
24	0,1	14,6	16	1,030	0,71
25	0,1	14,5	16	1,034	0,77
26	0,1	14,4	16	1,039	0,86
27	0,0	14,3	15	1,046	0,98
28	0,0	14,2	15	1,054	1,13
29	0,0	14,0	15	1,064	1,33
30	0,0	13,9	14	1,076	1,55

Tabla 34 Resultados de emisiones de la tercera prueba a 700 rpm con Biocombustible.

<b>Biocombustible</b>					
<b>Tercera Prueba</b>					
<b>Ralentí normal a 700 rpm</b>					
<b>Tiempo</b>	<b>CO (% vol.)</b>	<b>CO<sub>2</sub> (% vol.)</b>	<b>HC (ppm)</b>	<b>λ</b>	<b>O<sub>2</sub> (% vol.)</b>
0	0,1	15,1	15	0,999	0,00
1	0,1	15,1	15	0,999	0,00
2	0,1	15,1	16	0,999	0,00
3	0,1	15,1	16	0,999	0,00
4	0,1	15,1	16	0,999	0,00
5	0,1	15,0	17	0,999	0,00
6	0,1	15,0	17	0,999	0,01
7	0,1	15,0	17	1,000	0,01
8	0,1	15,0	18	1,000	0,02
9	0,1	15,0	18	1,000	0,03
10	0,1	15,0	18	1,001	0,04
11	0,1	15,0	18	1,001	0,05
12	0,1	15,0	19	1,001	0,05
13	0,1	15,0	19	1,001	0,06
14	0,1	14,9	19	1,003	0,09
15	0,1	14,9	20	1,003	0,10
16	0,1	14,9	20	1,004	0,12
17	0,1	14,8	21	1,005	0,15
18	0,1	14,7	21	1,008	0,18
19	0,1	14,6	21	1,008	0,22
20	0,1	14,5	22	1,010	0,27
21	0,1	14,4	22	1,012	0,33
22	0,1	14,4	22	1,016	0,40
23	0,1	14,2	24	1,020	0,49
24	0,1	14,1	26	1,024	0,59
25	0,2	13,8	27	1,031	0,73
26	0,2	13,5	27	1,038	0,87
27	0,3	13,8	26	1,042	1,02
28	0,3	13,8	26	1,046	1,12
29	0,3	13,9	26	1,042	1,08
30	0,4	14,0	26	1,030	1,08

**4.1.4.2 Datos recolectados de análisis de emisiones del vehículo Chevrolet Optra Sedán 2006.**

*Tabla 35 Resultados de emisiones de la primera prueba a 2500 rpm con Extra, Chevrolet Optra.*

<b>Gasolina Extra</b>					
<b>Primera Prueba</b>					
<b>Ralentí acelerado a 2500 rpm</b>					
<b>Tiempo</b>	<b>CO (% vol.)</b>	<b>CO<sub>2</sub> (% vol.)</b>	<b>HC (ppm)</b>	<b>λ</b>	<b>O<sub>2</sub> (% vol.)</b>
0	0,3	12,9	243	1,085	2,01
1	0,3	12,9	242	1,087	2,03
2	0,3	12,9	240	1,088	2,04
3	0,3	12,8	239	1,092	2,11
4	0,3	12,8	238	1,096	2,19
5	0,3	12,8	238	1,100	2,25
6	0,3	12,8	239	1,100	2,26
7	0,3	12,8	239	1,100	2,26
8	0,3	12,8	240	1,102	2,27
9	0,3	12,6	246	1,108	2,4
10	0,3	12,6	254	1,113	2,5
11	0,3	12,5	262	1,117	2,58
12	0,3	12,3	274	1,121	2,65
13	0,3	12,2	285	1,129	2,78
14	0,4	11,9	301	1,144	3,02
15	0,4	11,7	313	1,166	3,38
16	0,4	11,4	325	1,190	3,77
17	0,4	11,4	331	1,210	4,1
18	0,4	11,4	331	1,220	4,27
19	0,4	11,5	344	1,213	4,2
20	0,4	11,5	435	1,197	4,03
21	0,4	11,4	474	1,191	3,96
22	0,4	11,4	474	1,201	4,14
23	0,5	11,2	476	1,215	4,37
24	0,5	11	479	1,231	4,6
25	0,6	10,4	488	1,262	4,95
26	0,6	10	504	1,271	4,69
27	0,6	9,8	508	1,347	6,08
28	0,6	9,8	508	1,370	6,43
29	0,7	9,7	506	1,368	6,43
30	0,8	9,6	507	1,360	6,47

Tabla 36 Resultados de emisiones de la primera prueba a 700 rpm con Extra, Chevrolet Optra.

<b>Gasolina Extra</b>					
<b>Primera Prueba</b>					
<b>Ralentí normal a 700 rpm</b>					
<b>Tiempo</b>	<b>CO (% vol.)</b>	<b>CO<sub>2</sub> (% vol.)</b>	<b>HC (ppm )</b>	<b>λ</b>	<b>O<sub>2</sub> (% vol.)</b>
0	0,3	13,2	267	1,065	1,65
1	0,3	13,2	267	1,065	1,65
2	0,3	13,2	267	1,065	1,65
3	0,3	13,2	268	1,065	1,65
4	0,3	13,2	269	1,066	1,67
5	0,3	13,1	271	1,066	1,68
6	0,3	13,2	272	1,066	1,68
7	0,3	13,2	273	1,066	1,68
8	0,3	13,2	274	1,066	1,68
9	0,3	13,1	274	1,066	1,68
10	0,3	13,1	278	1,068	1,69
11	0,3	13,1	282	1,069	1,74
12	0,3	13,1	285	1,069	1,74
13	0,3	13,1	285	1,069	1,75
14	0,3	13	295	1,071	1,75
15	0,3	13	295	1,073	1,79
16	0,3	12,9	308	1,078	1,94
17	0,3	12,8	317	1,082	2,02
18	0,3	12,8	325	1,087	2,11
19	0,3	12,7	336	1,091	2,19
20	0,3	12,7	336	1,096	2,19
21	0,3	12,5	359	1,102	2,42
22	0,3	12,4	370	1,109	2,42
23	0,4	12,2	386	1,114	2,65
24	0,4	12,1	399	1,122	2,79
25	0,4	11,9	414	1,134	2,99
26	0,4	11,6	424	1,153	3,29
27	0,3	11,3	434	1,182	3,67
28	0,3	11,1	438	1,216	4,14
29	0,3	10,7	437	1,251	4,61
30	0,3	10,7	437	1,278	4,61

Tabla 37 Resultados de emisiones de la segunda prueba a 2500 rpm con Extra, Chevrolet Optra.

<b>Gasolina Extra</b>					
<b>Segunda Prueba</b>					
<b>Ralentí acelerado a 2500 rpm</b>					
<b>Tiempo</b>	<b>CO (% vol.)</b>	<b>CO<sub>2</sub> (% vol.)</b>	<b>HC (ppm)</b>	<b>λ</b>	<b>O<sub>2</sub> (% vol.)</b>
0	0,4	14,1	96	0,987	0,08
1	0,4	14,1	100	0,988	0,09
2	0,4	14,1	100	0,988	0,11
3	0,5	14	111	0,987	0,12
4	0,5	14	111	0,987	0,14
5	0,5	14	125	0,987	0,17
6	0,5	14	125	0,988	0,2
7	0,5	13,9	134	0,990	0,24
8	0,6	13,9	142	0,990	0,28
9	0,6	13,8	153	0,990	0,32
10	0,6	13,8	163	0,991	0,37
11	0,7	13,6	175	0,992	0,42
12	0,7	13,5	195	0,996	0,49
13	0,8	13,4	205	0,998	0,55
14	0,9	13,3	218	1,000	0,63
15	0,9	13,3	218	0,999	0,72
16	1	13	256	1,005	0,95
17	1,1	12,8	274	1,011	0,95
18	1,1	12,8	274	1,010	1,12
19	1,1	12,5	296	1,021	1,38
20	1,1	12,3	312	1,037	1,7
21	1,1	11,7	334	1,090	2,12
22	1,2	12,4	263	1,110	2,63
23	1,2	12,4	263	1,111	3,09
24	1,2	12,8	232	1,119	3,34
25	0,7	12,9	231	1,127	3,13
26	0,5	12,9	230	1,096	2,38
27	0,5	13,4	224	1,042	1,34
28	0,5	13,5	221	1,012	0,76
29	0,5	13,7	218	1,011	0,69
30	0,5	13,7	218	1,011	0,7

Tabla 38 Resultados de emisiones de la segunda prueba a 700 rpm con Extra, Chevrolet Optra.

<b>Gasolina Extra</b>					
<b>Segunda Prueba</b>					
<b>Ralentí normal a 700 rpm</b>					
<b>Tiempo</b>	<b>CO (% vol.)</b>	<b>CO<sub>2</sub> (% vol.)</b>	<b>HC (ppm)</b>	<b>λ</b>	<b>O<sub>2</sub> (% vol.)</b>
0	0,3	13,2	267	1,065	1,65
1	0,3	13,2	267	1,065	1,65
2	0,3	13,2	267	1,065	1,65
3	0,3	13,2	268	1,065	1,65
4	0,3	13,2	269	1,066	1,67
5	0,3	13,1	271	1,066	1,68
6	0,3	13,2	272	1,066	1,68
7	0,3	13,2	273	1,066	1,68
8	0,3	13,2	274	1,066	1,68
9	0,3	13,1	276	1,066	1,69
10	0,3	13,1	278	1,068	1,69
11	0,3	13,1	278	1,069	1,72
12	0,3	13,1	285	1,069	1,75
13	0,3	13,1	290	1,069	1,75
14	0,3	13	295	1,071	1,79
15	0,3	13	295	1,073	1,79
16	0,3	12,9	308	1,078	1,85
17	0,3	12,9	308	1,082	1,94
18	0,3	12,8	325	1,087	2,02
19	0,3	12,7	336	1,091	2,19
20	0,3	12,6	346	1,097	2,3
21	0,3	12,5	359	1,102	2,42
22	0,3	12,4	370	1,109	2,54
23	0,4	12,2	386	1,114	2,65
24	0,4	12,1	399	1,122	2,79
25	0,4	11,9	414	1,134	2,99
26	0,4	11,6	424	1,153	3,29
27	0,3	11,3	434	1,182	3,67
28	0,3	11,3	434	1,210	3,67
29	0,3	10,7	437	1,251	4,61
30	0,3	10,7	437	1,278	4,61

Tabla 39 Resultados de emisiones de la tercera prueba a 2500 rpm con Extra, Chevrolet Optra.

<b>Gasolina Extra</b>					
<b>Tercera Prueba</b>					
<b>Ralentí acelerado a 2500 rpm</b>					
<b>Tiempo</b>	<b>CO (% vol.)</b>	<b>CO<sub>2</sub> (% vol.)</b>	<b>HC (ppm vol.)</b>	<b>λ</b>	<b>O<sub>2</sub> (% vol.)</b>
0	0,3	12,7	172	1,118	2,53
1	0,3	12,7	173	1,113	2,44
2	0,3	12,6	174	1,114	2,45
3	0,3	12,4	174	1,125	2,63
4	0,3	12,4	176	1,138	2,63
5	0,3	12,4	181	1,143	2,94
6	0,3	12,3	185	1,143	2,94
7	0,3	12,3	190	1,138	2,85
8	0,3	12,2	195	1,141	2,89
9	0,3	12,1	235	1,155	3,13
10	0,3	11,7	252	1,174	3,4
11	0,3	11,5	254	1,185	3,55
12	0,3	11,5	255	1,188	3,59
13	0,3	11,4	256	1,189	3,59
14	0,3	11,4	257	1,202	3,78
15	0,3	11,2	259	1,229	4,17
16	0,3	11,1	263	1,256	4,57
17	0,3	11	269	1,267	4,74
18	0,3	10,9	273	1,276	4,86
19	0,3	10,7	278	1,294	5,09
20	0,3	10,8	277	1,308	5,3
21	0,2	10,9	273	1,308	5,31
22	0,2	10,9	274	1,303	5,24
23	0,2	10,9	280	1,301	5,22
24	0,2	10,9	277	1,301	5,25
25	0,2	11,2	267	1,289	5,12
26	0,2	11,4	261	1,271	4,87
27	0,2	11,7	255	1,248	4,55
28	0,2	11,8	251	1,229	4,25
29	0,2	11,8	247	1,217	4,04
30	0,2	11,7	243	1,218	4,04

Tabla 40 Resultados de emisiones de la tercera prueba a 700 rpm con Extra, Chevrolet Optra.

<b>Gasolina Extra</b>					
<b>Tercera Prueba</b>					
<b>Ralentí normal a 700 rpm</b>					
<b>Tiempo</b>	<b>CO (% vol.)</b>	<b>CO<sub>2</sub> (% vol.)</b>	<b>HC (ppm)</b>	<b>λ</b>	<b>O<sub>2</sub> (% vol.)</b>
<b>0</b>	0,3	12,9	260	1,104	2,36
<b>1</b>	0,3	12,9	263	1,108	2,44
<b>2</b>	0,3	12,8	266	1,111	2,49
<b>3</b>	0,3	12,8	268	1,111	2,5
<b>4</b>	0,3	12,7	271	1,113	2,54
<b>5</b>	0,3	12,6	276	1,120	2,64
<b>6</b>	0,3	12,4	280	1,133	2,84
<b>7</b>	0,2	12,2	286	1,151	3,11
<b>8</b>	0,2	12,1	290	1,169	3,11
<b>9</b>	0,2	12	293	1,183	3,63
<b>10</b>	0,3	12	293	1,188	3,74
<b>11</b>	0,3	12,1	290	1,176	3,71
<b>12</b>	0,3	12,2	285	1,173	3,56
<b>13</b>	0,3	12,4	275	1,156	3,3
<b>14</b>	0,3	12,5	265	1,140	3,04
<b>15</b>	0,3	12,6	248	1,127	2,74
<b>16</b>	0,3	12,7	241	1,120	2,79
<b>17</b>	0,3	12,6	237	1,119	2,63
<b>18</b>	0,3	12,6	236	1,123	2,63
<b>19</b>	0,4	12,5	238	1,127	2,78
<b>20</b>	0,4	12,4	240	1,132	2,88
<b>21</b>	0,4	12,2	244	1,136	2,97
<b>22</b>	0,4	12	247	1,147	3,13
<b>23</b>	0,4	11,7	252	1,168	3,41
<b>24</b>	0,4	11,4	259	1,198	3,41
<b>25</b>	0,3	10,9	269	1,244	4,36
<b>26</b>	0,3	10,5	277	1,295	5,01
<b>27</b>	0,2	10,1	288	1,352	5,65
<b>28</b>	0,2	11,3	286	1,382	6,24
<b>29</b>	0,2	11,3	205	1,384	6,63
<b>30</b>	0,2	11,9	171	1,366	6,63

Tabla 41 Resultados de emisiones de la primera prueba a 2500 rpm con Super, Chevrolet Optra.

<b>Gasolina Super</b>					
<b>Primera Prueba</b>					
<b>Ralentí acelerado a 2500 rpm</b>					
<b>Tiempo</b>	<b>CO (% vol.)</b>	<b>CO<sub>2</sub> (% vol.)</b>	<b>HC (ppm)</b>	<b>λ</b>	<b>O<sub>2</sub> (% vol.)</b>
0	0,3	12,4	171	1,124	2,57
1	0,3	12,4	171	1,124	2,57
2	0,3	12,3	170	1,131	2,69
3	0,3	12,2	168	1,142	2,69
4	0,3	12,2	169	1,147	2,86
5	0,3	12,3	171	1,143	2,94
6	0,3	12,3	173	1,137	2,89
7	0,3	12,2	175	1,137	2,78
8	0,3	12,1	176	1,149	2,77
9	0,3	11,9	177	1,166	2,96
10	0,3	11,9	177	1,175	3,22
11	0,3	11,9	178	1,174	3,37
12	0,3	11,9	180	1,171	3,3
13	0,3	11,7	183	1,177	3,3
14	0,3	11,6	184	1,196	3,37
15	0,2	11,5	184	1,218	3,97
16	0,2	11,5	185	1,225	3,97
17	0,3	11,6	185	1,221	4,09
18	0,3	11,7	187	1,198	3,96
19	0,3	11,6	192	1,193	3,63
20	0,3	11,5	196	1,209	3,63
21	0,2	11,2	202	1,240	3,86
22	0,2	11,2	206	1,258	4,28
23	0,2	11,4	211	1,251	4,51
24	0,2	11,5	212	1,231	4,24
25	0,2	11,9	211	1,198	4,24
26	0,2	12,1	204	1,170	3,32
27	0,2	12,1	190	1,173	3,32
28	0,2	11,8	178	1,169	3,01
29	0,2	11	162	1,214	3,16
30	0,1	10	144	1,245	3,69

Tabla 42 Resultados de emisiones de la primera prueba a 700 rpm con Super, Chevrolet Optra.

<b>Gasolina Super</b>					
<b>Primera Prueba</b>					
<b>Ralentí normal a 700 rpm</b>					
<b>Tiempo</b>	<b>CO (% vol.)</b>	<b>CO<sub>2</sub> (% vol.)</b>	<b>HC (ppm)</b>	<b>λ</b>	<b>O<sub>2</sub> (% vol.)</b>
0	0,3	12,7	367	1,089	2,16
1	0,3	12,7	372	1,089	2,16
2	0,3	12,6	381	1,093	2,16
3	0,3	12,6	387	1,094	2,23
4	0,3	12,6	393	1,094	2,26
5	0,3	12,6	397	1,091	2,26
6	0,3	12,7	400	1,089	2,22
7	0,3	12,6	404	1,088	2,18
8	0,3	12,6	414	1,090	2,21
9	0,3	12,6	414	1,092	2,21
10	0,3	12,6	421	1,094	2,25
11	0,3	12,5	426	1,097	2,3
12	0,3	12,5	432	1,102	2,35
13	0,3	12,44	436	1,102	2,54
14	0,3	12,2	439	1,116	2,54
15	0,3	12,1	443	1,125	2,68
16	0,3	12	447	1,135	2,83
17	0,3	11,6	461	1,151	3,19
18	0,3	11,3	470	1,169	3,45
19	0,3	11,3	470	1,190	3,45
20	0,3	10,9	482	1,224	4,28
21	0,3	10,6	487	1,231	4,28
22	0,3	10,1	490	1,280	4,85
23	0,3	9,8	477	1,331	5,48
24	0,3	11	268	1,347	6,59
25	0,3	11,6	180	1,362	6,53
26	0,3	11,7	179	1,331	6,6
27	0,3	11,7	178	1,258	6,03
28	0,3	12,3	176	1,169	4,78
29	0,3	12,5	172	1,121	2,54
30	0,3	12,5	164	1,113	2,54

Tabla 43 Resultados de emisiones de la segunda prueba a 2500 rpm con Super, Chevrolet Optra

<b>Gasolina Super</b>					
<b>Segunda Prueba</b>					
<b>Ralentí acelerado a 2500 rpm</b>					
<b>Tiempo</b>	<b>CO (% vol.)</b>	<b>CO<sub>2</sub> (% vol.)</b>	<b>HC (ppm)</b>	<b>λ</b>	<b>O<sub>2</sub> (% vol.)</b>
0	0,3	12,7	164	1,103	2,21
1	0,3	12,7	166	1,101	2,19
2	0,3	12,7	166	1,101	2,18
3	0,3	12,7	166	1,101	2,19
4	0,3	12,7	167	1,105	2,19
5	0,3	12,7	169	1,106	2,25
6	0,3	12,7	171	1,106	2,26
7	0,3	12,7	171	1,106	2,26
8	0,3	12,7	171	1,106	2,26
9	0,2	12,6	168	1,108	2,29
10	0,2	12,6	167	1,110	2,32
11	0,2	12,6	168	1,112	2,36
12	0,2	12,6	168	1,112	2,36
13	0,2	12,7	167	1,110	2,32
14	0,2	12,7	167	1,108	2,29
15	0,2	12,6	166	1,108	2,29
16	0,2	12,6	166	1,111	2,34
17	0,2	12,7	167	1,111	2,35
18	0,2	12,7	168	1,109	2,3
19	0,2	12,7	168	1,103	2,24
20	0,2	12,7	167	1,103	2,2
21	0,2	12,7	167	1,104	2,2
22	0,2	12,7	168	1,107	2,27
23	0,2	12,7	168	1,109	2,31
24	0,2	12,6	173	1,109	2,31
25	0,2	12,6	179	1,109	2,3
26	0,2	12,6	175	1,110	2,31
27	0,2	12,6	175	1,113	2,37
28	0,2	12,6	173	1,118	2,46
29	0,2	12,6	173	1,121	2,5
30	0,2	12,6	168	1,119	2,45

Tabla 44 Resultados de emisiones de la segunda prueba a 700 rpm con Super, Chevrolet Optra.

<b>Super</b>					
<b>Segunda Prueba</b>					
<b>Ralentí normal a 700 rpm</b>					
<b>Tiempo</b>	<b>CO (% vol.)</b>	<b>CO<sub>2</sub> (% vol.)</b>	<b>HC (ppm)</b>	<b>λ</b>	<b>O<sub>2</sub> (% vol.)</b>
0	0,3	12,9	270	1,079	1,88
1	0,3	12,9	273	1,076	1,84
2	0,3	12,8	277	1,077	1,85
3	0,3	12,8	282	1,079	1,89
4	0,3	12,8	288	1,082	1,97
5	0,3	12,8	294	1,084	2
6	0,3	12,8	296	1,084	2
7	0,3	12,8	299	1,084	2
8	0,3	12,7	306	1,084	2
9	0,3	12,7	312	1,087	2,05
10	0,3	12,6	320	1,092	2,15
11	0,3	12,6	327	1,096	2,23
12	0,3	12,6	337	1,098	2,28
13	0,3	12,5	346	1,098	2,29
14	0,3	12,5	358	1,098	2,300
15	0,3	12,4	366	1,101	2,36
16	0,3	12,3	375	1,106	2,47
17	0,3	12,2	379	1,113	2,59
18	0,3	12,2	379	1,119	2,71
19	0,3	11,9	387	1,132	2,84
20	0,3	11,6	387	1,145	3,02
21	0,3	11,6	396	1,161	3,3
22	0,3	11,3	409	1,188	3,72
23	0,3	10,5	445	1,233	4,23
24	0,3	10,5	445	1,273	4,87
25	0,3	10,1	461	1,327	5,5
26	0,3	9,9	453	1,386	6,07
27	0,3	11,3	258	1,362	6,33
28	0,3	11,9	176	1,327	6,05
29	0,3	12,1	174	1,264	5
30	0,3	12,1	174	1,181	3,52

Tabla 45 Resultados de emisiones de la tercera prueba a 2500 rpm con Super, Chevrolet Optra.

<b>Gasolina Super</b>					
<b>Tercera Prueba</b>					
<b>Ralentí acelerado a 2500 rpm</b>					
<b>Tiempo</b>	<b>CO (% vol)</b>	<b>CO<sub>2</sub> (% vol.)</b>	<b>HC (ppm)</b>	<b>λ</b>	<b>O<sub>2</sub> (% vol.)</b>
0	0,2	11,4	233	1,223	4,03
1	0,2	11,4	237	1,231	4,14
2	0,2	11,3	240	1,239	4,25
3	0,2	11,2	242	1,245	4,35
4	0,2	11,2	242	1,249	4,42
5	0,2	11,2	245	1,253	4,46
6	0,2	11,2	247	1,255	4,49
7	0,2	11,2	249	1,255	4,5
8	0,2	11,1	252	1,258	4,53
9	0,2	11,1	254	1,262	4,58
10	0,2	11,1	254	1,265	4,58
11	0,2	11,1	262	1,268	4,68
12	0,2	11,1	262	1,270	4,71
13	0,2	11,1	266	1,271	4,71
14	0,2	11,1	272	1,272	4,75
15	0,2	11,1	279	1,272	4,76
16	0,2	11,1	279	1,274	4,79
17	0,2	11,1	282	1,273	4,79
18	0,2	11,1	290	1,273	4,8
19	0,2	11,2	295	1,274	4,79
20	0,2	11,2	295	1,271	4,79
21	0,2	11,2	298	1,267	4,74
22	0,2	11,2	304	1,262	4,69
23	0,2	11,3	315	1,254	4,6
24	0,2	11,3	323	1,249	4,51
25	0,2	11,2	332	1,249	4,51
26	0,2	10,6	331	1,275	4,68
27	0,2	10,6	331	1,304	5,13
28	0,2	10,2	322	1,361	5,79
29	0,2	9,6	305	1,434	6,49
30	0,2	8,9	283	1,532	6,49

Tabla 46 Resultados de emisiones de la tercera prueba a 700 rpm con Super, Chevrolet Optra.

<b>Gasolina Super</b>					
<b>Tercera Prueba</b>					
<b>Ralentí normal a 700 rpm</b>					
<b>Tiempo</b>	<b>CO (% vol.)</b>	<b>CO<sub>2</sub> (% vol.)</b>	<b>HC (ppm)</b>	<b>λ</b>	<b>O<sub>2</sub> (% vol.)</b>
0	0,2	12,3	314	1,135	2,78
1	0,2	12,3	313	1,137	2,86
2	0,2	12,2	312	1,141	2,91
3	0,2	12,2	311	1,144	2,95
4	0,2	12,2	311	1,147	3,01
5	0,2	12,1	311	1,151	3,07
6	0,2	12	310	1,156	3,14
7	0,2	12	310	1,161	3,21
8	0,2	11,9	311	1,167	3,31
9	0,2	11,7	312	1,174	3,41
10	0,2	11,6	315	1,184	3,56
11	0,2	11,4	319	1,197	3,72
12	0,2	11,2	323	1,214	3,72
13	0,2	11,2	323	1,232	3,96
14	0,2	10,8	329	1,239	4,26
15	0,2	10,1	336	1,316	5,13
16	0,2	9,8	331	1,360	5,13
17	0,2	9,8	331	1,401	5,64
18	0,2	11,1	230	1,390	6,64
19	0,2	11,1	228	1,399	6,8
20	0,2	11,2	227	1,377	6,47
21	0,2	11,5	215	1,312	5,55
22	0,2	11,7	209	1,241	4,42
23	0,2	11,9	208	1,193	3,65
24	0,2	11,9	208	1,180	3,43
25	0,2	12	210	1,176	3,37
26	0,2	12	211	1,174	3,34
27	0,2	12	212	1,174	3,34
28	0,2	12	213	1,174	3,34
29	0,2	12	214	1,174	3,34
30	0,2	12	214	1,174	3,34

Tabla 47 Resultados de emisiones de la primera prueba a 2500 rpm con Biocombustible, Chevrolet Optra.

<b>Biocombustible</b>					
<b>Primera Prueba</b>					
<b>Ralentí acelerado a 2500 rpm</b>					
<b>Tiempo</b>	<b>CO (% vol.)</b>	<b>CO<sub>2</sub> (% vol.)</b>	<b>HC (ppm)</b>	<b>λ</b>	<b>O<sub>2</sub> (% vol.)</b>
0	0,3	12,8	170	1,088	1,96
1	0,3	12,8	177	1,090	2,02
2	0,3	12,8	177	1,092	2,04
3	0,3	12,8	178	1,092	2,05
4	0,3	12,7	180	1,093	2,05
5	0,3	12,7	185	1,097	2,12
6	0,3	12,6	191	1,020	2,21
7	0,3	12,6	200	1,106	2,29
8	0,3	12,1	210	1,113	2,35
9	0,3	11,8	224	1,119	2,44
10	0,3	11,7	237	1,129	2,59
11	0,3	11,7	255	1,142	2,84
12	0,3	11,6	267	1,163	3,18
13	0,3	11,4	281	1,189	3,58
14	0,3	11,2	284	1,218	4,02
15	0,3	11	279	1,243	4,37
16	0,3	11	273	1,254	4,53
17	0,3	11	263	1,254	4,53
18	0,3	11,1	251	1,253	4,53
19	0,2	11,3	234	1,247	4,45
20	0,2	11,3	231	1,235	4,26
21	0,2	11,4	238	1,222	4,09
22	0,2	11,4	249	1,222	4,09
23	0,3	11,4	269	1,213	4
24	0,3	11,3	285	1,212	3,95
25	0,3	10,9	303	1,230	4,17
26	0,3	10,5	312	1,271	4,69
27	0,3	9,8	319	1,336	5,42
28	0,3	9,3	312	1,417	6,25
29	0,3	8,4	290	1,530	7,17
30	0,3	7,6	254	1,677	8,14

Tabla 48 Resultados de emisiones de la primera prueba a 700 rpm con Biocombustible, Chevrolet Optra.

<b>Biocombustible</b>					
<b>Primera Prueba</b>					
<b>Ralentí normal a 700 rpm</b>					
<b>Tiempo</b>	<b>CO (% vol.)</b>	<b>CO<sub>2</sub> (% vol.)</b>	<b>HC (ppm)</b>	<b>λ</b>	<b>O<sub>2</sub> (% vol.)</b>
0	0,3	12,9	260	1,078	1,87
1	0,3	12,9	259	1,077	1,87
2	0,3	12,9	259	1,075	1,82
3	0,3	12,9	258	1,073	1,82
4	0,3	12,9	256	1,073	1,78
5	0,3	12,9	253	1,076	1,83
6	0,3	12,9	253	1,078	1,87
7	0,3	12,8	253	1,081	1,87
8	0,3	12,8	252	1,082	1,94
9	0,3	12,8	253	1,082	1,95
10	0,3	12,7	255	1,084	1,98
11	0,3	12,7	255	1,087	2,04
12	0,3	12,7	256	1,092	2,04
13	0,3	12,6	258	1,097	2,2
14	0,3	12,5	260	1,100	2,27
15	0,3	12,5	262	1,105	2,27
16	0,3	12,4	265	1,110	2,34
17	0,3	12,3	268	1,118	2,56
18	0,3	12,1	273	1,129	2,74
19	0,3	12	277	1,143	2,95
20	0,3	11,7	283	1,159	3,2
21	0,3	11,5	289	1,180	3,51
22	0,3	11,1	299	1,209	3,9
23	0,3	10,8	306	1,243	4,38
24	0,3	10,4	314	1,289	4,93
25	0,3	10,1	316	1,343	5,51
26	0,3	11,4	217	1,338	6,04
27	0,3	12	174	1,331	6,32
28	0,3	12,1	173	1,330	6,17
29	0,3	12,1	173	1,285	5,38
30	0,3	12,3	170	1,206	4,02

Tabla 49 Resultados de emisiones de la segunda prueba a 2500 rpm con Biocombustible,  
Chevrolet Optra.

<b>Biocombustible</b>					
<b>Segunda Prueba</b>					
<b>Ralentí acelerado a 2500 rpm</b>					
Tiempo	CO (% vol.)	CO <sub>2</sub> (% vol.)	HC (ppm)	λ	O <sub>2</sub> (% vol.)
0	0,3	13,3	159	1,064	1,58
1	0,3	13,3	158	1,060	1,51
2	0,3	13,3	157	1,063	1,56
3	0,3	13,2	154	1,068	1,65
4	0,3	13,2	153	1,073	1,73
5	0,3	13,2	152	1,076	1,73
6	0,3	13,2	152	1,077	1,79
7	0,3	13,2	151	1,078	1,83
8	0,3	13,1	150	1,080	1,85
9	0,3	13,1	151	1,079	1,85
10	0,3	13,1	151	1,079	1,85
11	0,3	13,1	151	1,080	1,85
12	0,3	13,1	151	1,081	1,88
13	0,3	13,1	151	1,084	1,93
14	0,3	13	151	1,085	1,93
15	0,3	13,1	153	1,085	1,95
16	0,3	13,1	153	1,085	1,95
17	0,3	13,1	153	1,084	1,92
18	0,3	13	153	1,086	1,96
19	0,3	13	153	1,092	2,05
20	0,3	13	154	1,095	2,11
21	0,3	13	156	1,095	2,11
22	0,3	13	157	1,095	2,11
23	0,3	12,9	157	1,095	2,11
24	0,3	12,9	158	1,098	2,11
25	0,3	12,9	161	1,101	2,22
26	0,3	12,9	162	1,103	2,22
27	0,3	12,8	164	1,104	2,28
28	0,3	12,8	165	1,107	2,32
29	0,3	12,8	168	1,111	2,38
30	0,3	12,7	171	1,114	2,45

Tabla 50 Resultados de emisiones de la segunda prueba a 700 rpm con Biocombustible, Chevrolet Optra.

<b>Biocombustible</b>					
<b>Segunda Prueba</b>					
<b>Ralentí normal a 700 rpm</b>					
<b>Tiempo</b>	<b>CO (% vol.)</b>	<b>CO<sub>2</sub> (% vol.)</b>	<b>HC (ppm vol.)</b>	<b>λ</b>	<b>O<sub>2</sub> (% vol.)</b>
0	0,3	13,3	284	1,064	1,68
1	0,3	13,2	284	1,067	1,69
2	0,3	13,2	285	1,069	1,78
3	0,3	13,2	285	1,071	1,78
4	0,3	13,2	286	1,071	1,81
5	0,3	13,2	286	1,071	1,82
6	0,3	13,2	287	1,069	1,8
7	0,3	13,2	287	1,069	1,79
8	0,3	13,2	286	1,069	1,78
9	0,3	13,2	286	1,069	1,78
10	0,3	13,1	287	1,071	1,79
11	0,3	13,1	287	1,075	1,9
12	0,3	13	288	1,079	1,98
13	0,3	12,9	288	1,085	2,08
14	0,3	12,8	289	1,091	2,08
15	0,3	12,8	290	1,098	2,31
16	0,4	12,6	292	1,105	2,43
17	0,4	12,6	292	1,110	2,53
18	0,4	12,5	294	1,111	2,53
19	0,4	12,4	296	1,119	2,6
20	0,4	12,3	299	1,126	2,67
21	0,4	12,1	303	1,139	2,99
22	0,4	11,8	310	1,160	3,3
23	0,4	11,5	318	1,189	3,73
24	0,3	11,1	329	1,226	3,73
25	0,3	10,7	337	1,267	4,24
26	0,3	10,3	345	1,314	4,79
27	0,3	10,2	339	1,351	5,36
28	0,3	11,7	215	1,330	5,85
29	0,3	12,4	163	1,304	6,11
30	0,3	12,5	162	1,256	5,91

Tabla 51 Resultados de emisiones de la segunda prueba a 2500 rpm con Biocombustible, Chevrolet Optra.

<b>Biocombustible</b>					
<b>Tercera Prueba</b>					
<b>Ralentí acelerado a 2500 rpm</b>					
<b>Tiempo</b>	<b>CO (% vol.)</b>	<b>CO<sub>2</sub> (% vol.)</b>	<b>HC (ppm)</b>	<b>λ</b>	<b>O<sub>2</sub> (% vol.)</b>
0	0,3	13,5	166	1,079	1,88
1	0,3	13,5	167	1,081	1,92
2	0,3	13,5	167	1,083	1,96
3	0,3	13,5	169	1,082	1,93
4	0,3	13,5	170	1,082	1,93
5	0,3	13,5	169	1,082	1,93
6	0,3	13,5	169	1,085	1,99
7	0,3	13,5	169	1,087	2,03
8	0,3	13,5	170	1,087	2,03
9	0,3	13,4	171	1,087	2,03
10	0,3	13,4	171	1,087	2,03
11	0,3	13,3	170	1,097	2,09
12	0,3	13,3	171	1,101	2,21
13	0,3	13,3	172	1,102	2,29
14	0,3	13,3	174	1,104	2,33
15	0,3	13,3	177	1,103	2,32
16	0,3	13,3	179	1,102	2,3
17	0,3	13,2	180	1,107	2,3
18	0,3	13,2	183	1,112	2,38
19	0,3	13,1	186	1,113	2,48
20	0,3	13,1	189	1,117	2,56
21	0,3	13,1	193	1,120	2,58
22	0,3	13	196	1,126	2,62
23	0,3	12,8	199	1,127	2,71
24	0,3	12,7	203	1,139	2,91
25	0,3	12,5	210	1,152	3,14
26	0,3	12,4	216	1,165	3,35
27	0,3	12,2	223	1,177	3,52
28	0,3	12,1	229	1,201	3,72
29	0,3	12	239	1,202	3,93
30	0,3	11,8	251	1,224	4,09

Tabla 52 Resultados de emisiones de la segunda prueba a 700 rpm con Biocombustible, Chevrolet Optra.

<b>Biocombustible</b>					
<b>Tercera Prueba</b>					
<b>Ralentí normal a 700 rpm</b>					
<b>Tiempo</b>	<b>CO (% vol.)</b>	<b>CO<sub>2</sub> (% vol.)</b>	<b>HC (ppm)</b>	<b>λ</b>	<b>O<sub>2</sub> (% vol.)</b>
0	0,3	13,6	211	1,060	1,59
1	0,3	13,7	208	1,059	1,56
2	0,3	13,7	207	1,058	1,53
3	0,3	13,7	205	1,057	1,51
4	0,3	13,6	205	1,058	1,54
5	0,3	13,6	205	1,060	1,57
6	0,3	13,6	206	1,063	1,63
7	0,3	13,6	207	1,063	1,64
8	0,3	13,5	208	1,064	1,65
9	0,3	13,5	210	1,064	1,65
10	0,3	13,5	212	1,066	1,7
11	0,3	13,4	212	1,070	1,76
12	0,3	13,4	217	1,074	1,84
13	0,3	13,3	220	1,076	1,89
14	0,3	13,3	224	1,079	1,94
15	0,3	13,2	228	1,081	1,98
16	0,3	13,1	234	1,085	2,07
17	0,4	13	242	1,091	2,19
18	0,4	12,9	250	1,109	2,35
19	0,4	12,6	262	1,110	2,54
20	0,4	12,4	274	1,124	2,77
21	0,4	12,1	290	1,142	3,06
22	0,4	11,8	305	1,167	3,45
23	0,4	11,8	305	1,193	3,93
24	0,3	10,9	338	1,248	4,51
25	0,3	10,5	350	1,297	5,12
26	0,3	10,3	344	1,341	5,73
27	0,3	11,9	225	1,327	6,13
28	0,3	12,6	176	1,310	6,09
29	0,3	12,7	175	1,269	5,34
30	0,3	12,8	174	1,130	4,06

## 4.2 ANÁLISIS ENERGÉTICO EN OPERACIÓN REAL EN PRUEBAS DE RUTA.

Para la experimentación del biocombustible, en este apartado se usó el vehículo Hyundai i10 2020.

### Fechas y horario de ejecución de las pruebas de ruta.

La fase de pruebas en el lugar escogido tuvo lugar los días 14 y 15 de septiembre de 2022, de acuerdo con el cronograma detallado en la Tabla 53. En la primera jornada, se llevaron a cabo las dos primeras pruebas utilizando gasolina extra, comenzando a las 15:22 y concluyendo a las 16:52, cubriendo una distancia total de 24.8 km por cada vuelta en el circuito.

Tabla 53 Horarios y fechas de las pruebas de rutas realizadas

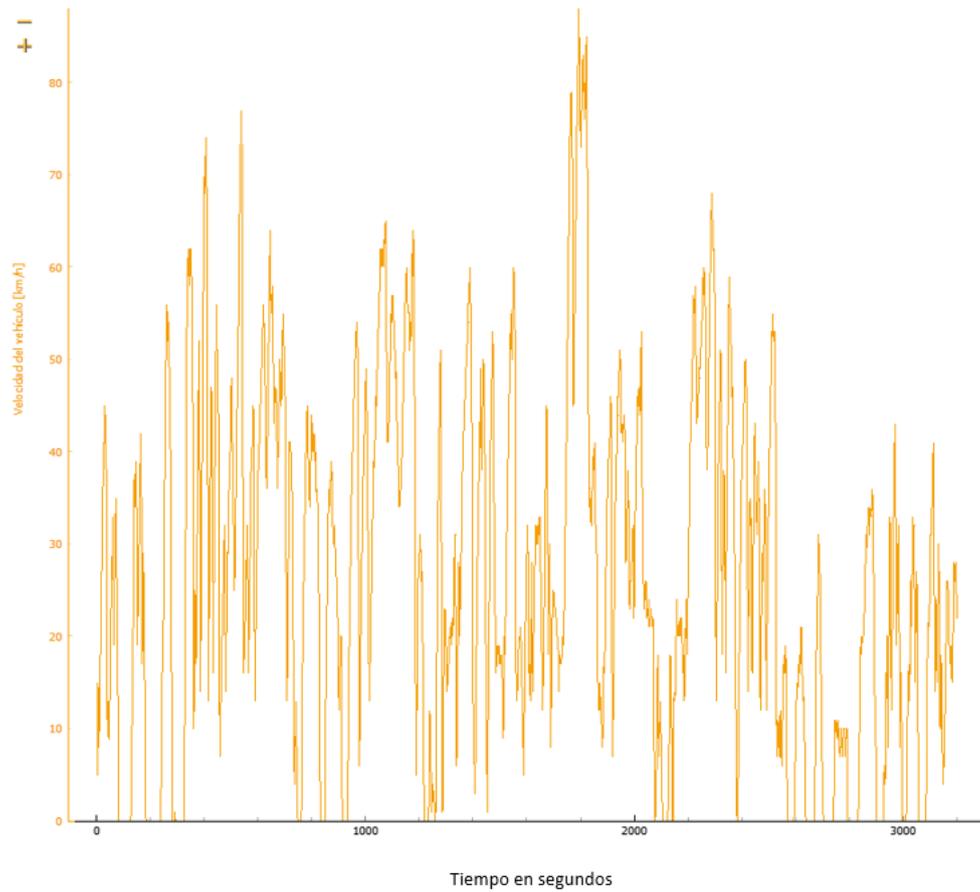
Fecha	Horario	Combustible	Tiempo recorrido
14/09/2022	15:22 – 16:07	Extra-1	45 min
14/09/2022	16:11 – 16:52	Extra-1	41 min
15/09/2022	10:58 – 11:38	Biocombustible 1	40 min
15/09/2022	11:40 – 12:27	Biocombustible 2	47 min
15/09/2022	17:08 – 17:40	Super 1	28 min
15/09/2022	17:40 – 18:02	Super 2	22 min

### Ciclos de conducción de las pruebas de ruta.

Uno de los elementos importantes a considerar al realizar pruebas en rutas es el itinerario seleccionado, dado que los ciclos de conducción transitorios engloban una amplia gama de velocidades, abarcando desde zonas urbanas hasta tramos en autopista. En el caso específico de la ruta elegida, el trayecto comprende inicialmente una sección urbana, seguida de dos segmentos en autopistas, para concluir regresando a la zona urbana. La Figura 54 ilustra la relación velocidad-tiempo, representando el ciclo de conducción del vehículo utilizando Gasolina Super. Se observa que inicia con velocidades reducidas debido al tráfico urbano,

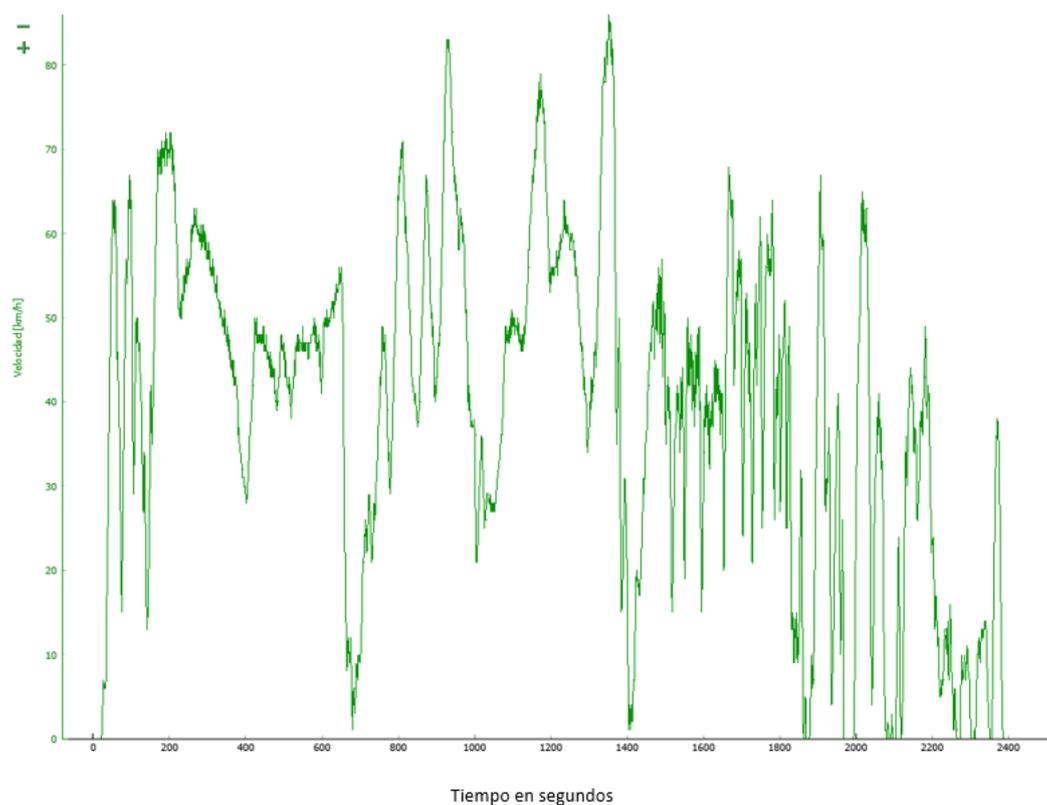
experimentando incrementos en los picos de velocidad al ingresar a la autopista, donde alcanza la velocidad máxima de 88 km/h, manteniendo una velocidad promedio de 35 km/h a lo largo de toda la ruta.

Figura 54 Ciclo de conducción transitorio (Software Asammdf) en la experimentación utilizando Gasolina Super.



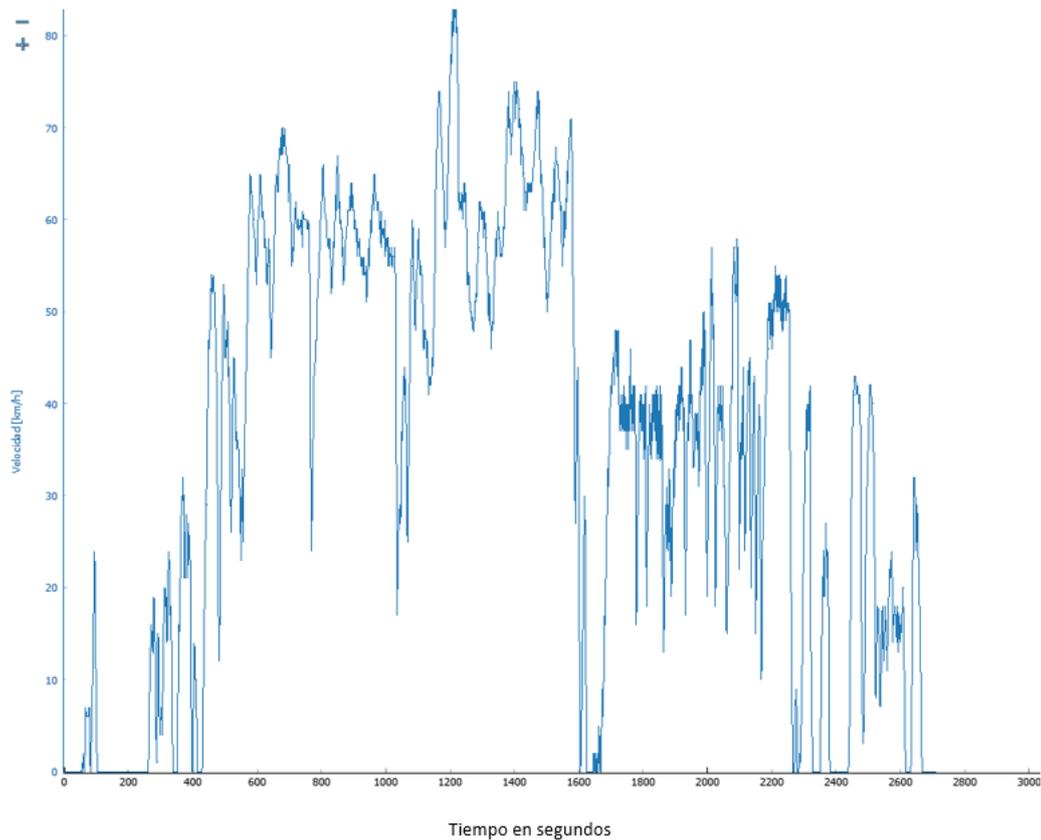
En consecuencia, la Figura 55 ilustra el ciclo de conducción del vehículo utilizando biocombustible, presentando picos de velocidad más elevados que el ciclo con Gasolina Super. Durante la ruta, alcanzó una velocidad máxima de 86 km/h, con una velocidad promedio de 42 km/h.

Figura 55 Ciclo de conducción transitorio (Software Asammdf) en la experimentación utilizando Biocombustible.



Para concluir, en la Figura 56 se muestra el patrón de conducción del vehículo con el uso de Gasolina Extra, destacando el pico de velocidad más elevado. Durante la ruta, alcanzó una velocidad máxima de 94 km/h, registrando una velocidad promedio de 44 km/h en toda la trayectoria, lo que lo posiciona como el combustible que logra la mayor velocidad en la ruta.

Figura 56 Ciclo de conducción transitorio (Software Asammdf) en la experimentación utilizando Gasolina Extra.



#### 4.2.1 Potencia Efectiva del Motor Durante la Experimentación.

Para determinar la potencia efectiva del motor, se requiere información sobre las rpm y el torque. Se obtuvo el valor del torque máximo del motor Kappa, que es de 120 Nm a 4000 rpm. Utilizando el software Asammdf, se tabularon los datos de revoluciones por minuto rpm y torque registrados en el CANedge. Posteriormente, estos datos fueron procesados en Excel y representados gráficamente en el software mencionado. De esta manera, se generaron curvas de rpm vs. tiempo y Torque vs. tiempo, permitiendo analizar visualmente el comportamiento de estas variables durante el uso del biocombustible.

Figura 57 rpm en función del tiempo (Software Asammdf) obtenida durante la experimentación con biocombustible.

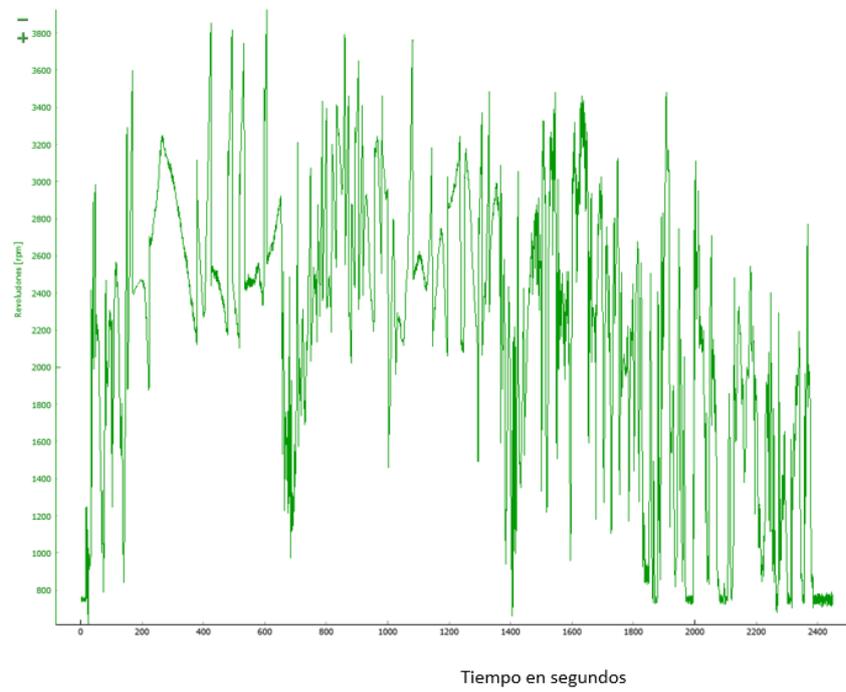
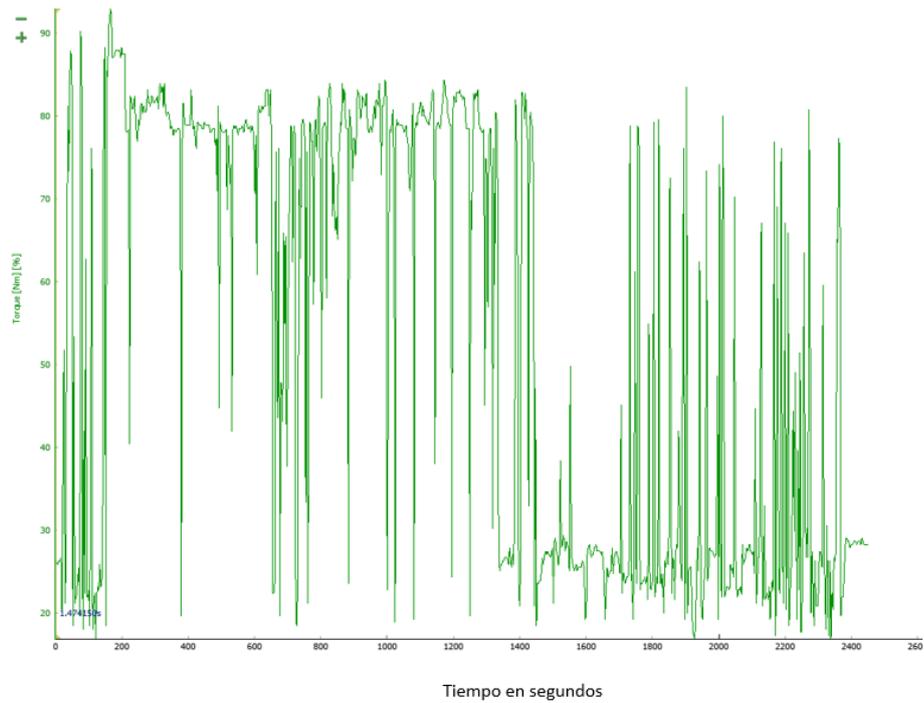


Figura 58 Torque en función del tiempo (Software Asammdf) obtenida durante la experimentación con biocombustible.



El cálculo de la potencia efectiva del motor se realiza mediante la Ecuación 2, utilizando los datos de revoluciones por minuto y torque recopilados durante las pruebas de ruta. Se han seleccionado y tabulado los 10 valores más elevados de cada combustible empleado en la experimentación, los cuales se detallan en las Tablas 54 y 55.

*Tabla 54 Valores máximos para las variables revolución, torque y potencia de cada combustible probado durante la primera serie de experimentos (obtenidos con el CANedge).*

<b>Super P1</b>			<b>Bioetanol P1</b>			<b>Extra P1</b>		
<b>n (rpm)</b>	<b>M (Nm)</b>	<b>P (W)</b>	<b>n (rpm)</b>	<b>M (Nm)</b>	<b>P (W)</b>	<b>n (rpm)</b>	<b>M (Nm)</b>	<b>P (W)</b>
4071,50	88,83	37,88	3926,00	85,66	35,22	3580,25	78,11	29,29
4045,00	88,25	37,38	3903,50	85,17	34,81	3565,25	77,79	29,04
4018,50	87,68	36,90	3893,50	84,95	34,64	3541,75	77,27	28,66
3992,00	87,10	36,41	3853,50	84,08	33,93	3493,00	76,21	27,88
3965,50	86,52	35,93	3833,25	83,63	33,57	3486,75	76,07	27,78
3939,00	85,94	35,45	3828,25	83,53	33,48	3482,50	75,98	27,71
3912,50	85,36	34,97	3817,25	83,29	33,29	3477,00	75,86	27,62
3886,00	84,79	34,50	3791,50	82,72	32,85	3463,00	75,56	27,40
3859,50	84,21	34,03	3779,25	82,46	32,63	3452,00	75,32	27,23
3833,00	83,63	33,57	3765,00	82,15	32,39	3440,25	75,06	27,04

*Tabla 55 Valores máximos para las variables revolución, torque y potencia de cada combustible probado durante la segunda serie de experimentos (obtenidos con el CANedge).*

<b>Super P2</b>			<b>Bioetanol P2</b>			<b>Extra P2</b>		
<b>n (rpm)</b>	<b>M (Nm)</b>	<b>P (kW)</b>	<b>n (rpm)</b>	<b>M (Nm)</b>	<b>P (kW)</b>	<b>n (rpm)</b>	<b>M (Nm)</b>	<b>P (kW)</b>
3989,75	87,05	36,37	3963,00	86,47	35,88	3852,00	84,04	33,90
3971,50	86,65	36,04	3913,25	85,38	34,99	3834,25	83,66	33,59
3952,25	86,23	35,69	3857,50	84,16	34,00	3810,00	83,13	33,17
3934,00	85,83	35,36	3824,50	83,44	33,42	3794,50	82,79	32,90
3916,75	85,46	35,05	3816,75	83,27	33,28	3781,00	82,49	32,66
3897,50	85,04	34,71	3799,75	82,90	32,99	3777,25	82,41	32,60
3879,25	84,64	34,38	3794,50	82,79	32,90	3764,00	82,12	32,37
3861,75	84,26	34,07	3779,25	82,46	32,63	3763,50	82,11	32,36
3842,50	83,84	33,73	3777,75	82,42	32,61	3762,00	82,08	32,34
3824,25	83,44	33,41	3774,00	82,34	32,54	3753,75	81,90	32,19

## **4.2.2 Consumo de combustible.**

### **Caudal de combustible.**

Se determina mediante el volumen de combustible que el motor consume en un instante específico, influido por variables del motor como el diámetro del cilindro, las revoluciones por minuto, el número de cilindros (en este caso, 4 cilindros en línea), la longitud de carrera del pistón y el número de tiempos del motor, expresado por la Ecuación 16.

Se determinará el caudal de combustible en función del tiempo al calcular el volumen de entrada del combustible a partir de la variación de revoluciones registradas mediante el CANedge.

### **Flujo másico del combustible.**

El flujo másico se determina mediante la Ecuación 5, que considera la densidad del biocombustible, con un valor promedio de  $768,5 \text{ kg/m}^3$  dentro del rango del biocombustible, y el caudal previamente calculado.

### **Consumo específico**

Se calcula mediante la Ecuación 3, que considera tanto el consumo de combustible como el flujo másico. Se elaboró las Tablas 56 y 57 con los valores correspondientes a las diez potencias más elevadas registradas durante las pruebas de ruta con los distintos combustibles, con el objetivo de comparar sus consumos.

Tabla 56 Valores máximos tabulados de potencia, flujo y consumo específico para cada combustible empleado en la primera experimentación (obtenidos con el CANedge)..

Super P1			Bioetanol P1			Extra P1		
P (kW)	m (kg/s)	Be (g/kWh)	P (kW)	m (kg/s)	Be (g/kWh)	P (kW)	m (kg/s)	Be (g/kWh)
37,88	0,00090387	85,91	35,22	0,00087157	89,096	29,29	0,00079482	97,70
37,38	0,00089799	86,47	34,81	0,00086658	89,610	29,04	0,000791485	98,11
36,90	0,00089211	87,04	34,64	0,00086436	89,840	28,66	0,000786268	98,76
36,41	0,00088622	87,62	33,93	0,00085548	90,772	27,88	0,000775446	100,14
35,93	0,00088034	88,20	33,57	0,00085098	91,252	27,78	0,000774058	100,32
35,45	0,00087446	88,80	33,48	0,00084987	91,371	27,71	0,000773115	100,44
34,97	0,00086857	89,40	33,29	0,00084743	91,634	27,62	0,000771894	100,60
34,50	0,00086269	90,01	32,85	0,00084171	92,257	27,40	0,000768786	101,01
34,03	0,00085681	90,63	32,63	0,00083899	92,556	27,23	0,000766344	101,33
33,57	0,00085093	91,25	32,39	0,00083583	92,906	27,04	0,000763735	101,68

Tabla 57 Valores máximos tabulados de potencia, flujo y consumo específico para cada combustible empleado en la segunda experimentación (obtenidos con el CANedge).

Super P2			Bioetanol P2			Extra P2		
P (kW)	m (kg/s)	Be (g/kWh)	P (kW)	m (kg/s)	Be (g/kWh)	P (kW)	m (kg/s)	Be (g/kWh)
36,37	0,00088572	87,67	35,88	0,00087979	88,26	33,90	0,00085514	90,81
36,04	0,00088167	88,08	34,99	0,00086874	89,39	33,59	0,00085120	91,23
35,69	0,00087740	88,50	34,00	0,00085636	90,68	33,17	0,00084582	91,81
35,36	0,00087335	88,91	33,42	0,00084904	91,46	32,90	0,00084238	92,18
35,05	0,00086952	89,31	33,28	0,00084732	91,65	32,66	0,00083938	92,51
34,71	0,00086524	89,75	32,99	0,00084354	92,06	32,60	0,00083855	92,60
34,38	0,00086119	90,17	32,90	0,00084238	92,18	32,37	0,00083561	92,93
34,07	0,00085731	90,58	32,63	0,00083899	92,56	32,36	0,00083550	92,94
33,73	0,00085303	91,03	32,61	0,00083866	92,59	32,34	0,00083516	92,98
33,41	0,00084898	91,47	32,54	0,00083783	92,68	32,19	0,00083333	93,18

### 4.2.3 Balance energético real.

#### Calor liberado por el combustible.

Para determinar la cantidad de calor liberado por el combustible, es necesario obtener el flujo másico del mismo, previamente calculado para determinar el consumo de combustible requerido por el vehículo. Además, se utiliza el poder calorífico inferior

de la mezcla E5 que es de 45217,7 kJ/kg. La relación se expresa mediante la Ecuación 6.

### Eficiencia Energética del sistema.

Para realizar el cálculo, se utilizó la potencia registrada en cada ruta a través del CANedge y el calor liberado por el combustible, obteniendo así la eficiencia energética de cada conjunto de datos según la Ecuación 7. La Tabla 58 presenta los valores máximos de potencia y torque para cada tipo de combustible, así como el consumo y el caudal promedio de combustible, la densidad de cada tipo de combustible y el flujo másico promedio. Se calculó un promedio de todos los datos de eficiencia obtenidos en cada ruta, ya que esto proporcionará una eficiencia real que incluye tanto potencias altas como bajas.

Tabla 58 Valores promedios tabulados para el cálculo de la eficiencia energética.

$M_{max}$ (Nm)	$P_{max}$ (kW)	Consumo ( $m^3$ )	Q ( $m^3/s$ )	$\rho_c$ ( $kg/m^3$ )	$\dot{m}_c$ (kg/s)	PCI (kJ/kg)	$\dot{Q}_c$ (kW)	$\eta_{ener}$ (%)
<b>SUPER</b>								
88,83	37,88	7,39	0,000000547	758	0,00042018	47124,48	85,91	21,54
<b>BIOCOMBUSTIBLE</b>								
85,66	35,22	11,23	0,000000637	768,5	0,000489250	45217,73	81,06	21,17
<b>EXTRA</b>								
84,04	33,90	10,19	0,000000584	779	0,00044850	45882,36	78,47	21,11

#### 4.2.4 Balance exergético real.

##### Exergía de los combustibles

La exergía de los combustibles representa la energía que ingresa al sistema y se deriva del calor liberado por el combustible durante su entrada al sistema, generando la explosión en conjunto con el carburante. Su cálculo se realiza mediante la Ecuación 8.

## Exergía del flujo de gases de escape.

La exergía del flujo de los gases de escape se determina mediante el promedio de los valores de los calores específicos, considerando las temperaturas de entrada y salida durante el funcionamiento del motor. Estas temperaturas se extrajeron del CANedge, y los coeficientes del calor específico del aire se calcularon utilizando fórmulas en Excel a través de la Ecuación 9.

## Eficiencia Exergética del sistema.

Para determinar la eficiencia exergética, se realiza un balance de exergía considerando que la energía de entrada al sistema proviene del combustible, mientras que la salida se compone del flujo de gases de escape y la energía transferida por conducción y convección. La exergía por transferencia de calor, denotada como  $E_{Xk}$ , se estima en un 35 % de la energía del combustible[182]. En la Tabla 59 se detallan las variables promedio involucradas en el cálculo de la eficiencia exergética mediante la Ecuación 11.

Tabla 59 Valores promedios tabulados para el cálculo de la eficiencia exergética.

$\dot{m}_a$ (kg/s)	$\dot{m}_g$ (kg/s)	T (K)	$T_0$ (K)	$E_{Xc}$ (kW)	$E_{Xg}$ (kW)	$E_{Xk}$ (kW)	$\eta_{exer}$ (%)
<b>SUPER</b>							
0,002411168	0,002831346	794	363,46	38,00	0,698	13,30	63,16
<b>BIOCOMBUSTIBLE</b>							
0,001403770	0,00164839	794	364,75	45,50	0,404	15,93	64,11
<b>EXTRA</b>							
0,00128685	0,00151110	795	364,57	41,16	0,372	14,40	64,10

## Análisis energético del combustible

Para obtener una mejor representación de los resultados del balance energético se presentan los valores de flujo energético en la Tabla 60, para los tres tipos de combustible utilizados en el análisis energético.

Tabla 60 Valores de flujo de energía de cada combustible experimentado

<b>FLUJO ENERGÉTICO (KW)</b>			
<b>Gasolina</b>	<b>Super</b>	<b>Biocombustible</b>	<b>Extra</b>
Combustible	85,91	81,06	78,47
Gases de escape y otras pérdidas	34,73	29,91	30,16
Pérdidas por conducción y convección	13,30	15,93	14,40
Potencia de eje	37,88	35,22	33,90

### 4.3 Resultados a los procesos termoquímicos aplicados a la cáscara de la vaina de cacao.

#### 4.3.1 Caracterización de las astillas de la biomasa.

Tabla 61 Resultados del análisis inmediato de las astillas provenientes de la cáscara de la vaina de cacao

<b>Análisis Inmediato</b>	<b>(%)</b>
Humedad	12,71
Volátiles	59,66
Carbono Fijo	18,18
Cenizas	9,45

Tabla 62 Resultados del análisis elemental de las astillas provenientes de la cáscara de la vaina de cacao

<b>Análisis Elemental</b>		<b>(%)</b>
Carbono	C	45,50
Hidrógeno	H	5,32
Nitrógeno	N	0,91
Azufre	S	0,13

Tabla 63 Poderes Caloríficos Superior e Inferior al 0% de Humedad

<b>Poder Calorífico</b>	<b>kcal/kg</b>
PCS Superior	4233,01
PCI Inferior	3869,452

Tabla 64 Poderes Caloríficos Superior e Inferior Humedad Recibida.

<b>Poder Calorífico</b>	<b>kcal/kg</b>
PCS Superior	3890,49
PCI Inferior	3,526,932

Tabla 65 Halógenos de las astillas de la cáscara de la vaina de cacao.

<b>Halógenos</b>	<b>mg/kg</b>
Fluor F	120,126
Cloro Cl	15,88

Tabla 66 Composición de las cenizas de las astillas de la cáscara de la vaina de cacao.

<b>Composición de las cenizas</b>	<b>(%, ppm).</b>
Na <sub>2</sub> O	0,4
MgO	6,28
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,52
SiO <sub>2</sub>	3,47
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	4,33
ClO	307 ppm
CaO	8,78
ZrO <sub>2</sub>	5,79 ppm
SO <sub>3</sub>	3,57
K <sub>2</sub> O	72,02
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,309
ZnO	875 ppm
CuO	228 ppm
MnO	340 ppm
Rb <sub>2</sub> O	776 ppm
SrO	598 ppm

Tabla 67 Temperatura de fusión de las cenizas de las astilla de la cáscara de la vaina de cacao.

<b>Temperatura de fusión de las cenizas</b>	<b>°C</b>
T <sup>a</sup> de deformación inicial	888
T <sup>a</sup> de reblandecimiento	1145
T <sup>a</sup> de hemisferio	1340
T <sup>a</sup> de fluidez	1420

Tabla 68 Formulación a óxidos más estables de las astillas de la cáscara de la vaina de cacao.

<b>Formula</b>	<b>Z</b>	<b>Concentración</b>
K <sub>2</sub> O	19	72,02%
CaO	20	8,78%
MgO	12	6,28%
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	15	4,33%
SO <sub>3</sub>	16	3,57%
SiO <sub>2</sub>	14	3,47%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13	0,52%
Na <sub>2</sub> O	11	0,40%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	26	0,31%
ZnO	30	875 ppm
Rb <sub>2</sub> O	37	776 ppm
SrO	38	598 ppm
MnO	25	340 ppm
Cl	17	307 ppm
CuO	29	228 ppm
ZrO <sub>2</sub>	40	5,79 ppm

Tabla 69 *Tabla de formulación a elementos de las astillas de la cáscara de la vaina de cacao.*

<b>Formula</b>	<b>Z</b>	<b>Concentración</b>
K	19	59.79%
Ca	20	6.28%
Mg	12	3.79%
P	15	1.89%
Si	14	1.62%
S	16	1.43%
Na	11	0.30%
Al	13	0.28%
Fe	26	0.22%
Rb	37	710 ppm
Zn	30	703 ppm
Sr	38	505 ppm
Cl	17	307 ppm
Mn	25	264 ppm
Cu	29	182 ppm
Zr	40	4.29 ppm

### 4.3.2 Resultados de Pirólisis

#### Pirólisis a 500°C.

Tabla 70 Porcentaje de los subproductos de la pirólisis a 500°C

Tiempo muestra min	Caudal – 1 ml/min	ml de X/ml de gas					
		H <sub>2</sub> %	O %	CO %	CH <sub>4</sub> %	N <sub>2</sub> %	CO <sub>2</sub> %
2	217,4	0,38	7,81	4,06	0,05	87,48	0,23
5	332,1	0,83	21,27	11,76	0,21	25,96	39,97
9	268,3	0,65	7,75	11,29	0,60	43,95	35,76
12	312,5	0,77	2,78	8,23	2,06	57,87	28,29
18	126,6	0,67	1,20	3,23	1,45	81,85	11,60
30	118,6	0,97	1,12	1,10	1,21	91,23	4,37
45	94,6	1,03	0,83	0,52	1,03	94,22	2,38
60	157,3	1,36	0,39	0,33	0,80	95,30	1,83

Tabla 71 Moles por litro de los subproductos de la pirólisis a 500°C

min intervalo	H <sub>2</sub> mol/l	O mol/l	CO mol/l	CH <sub>4</sub> mol/l	N <sub>2</sub> mol/l	CO <sub>2</sub> mol/l
2,00	0,02	0,32	0,17	0,00	3,64	0,01
5,00	0,03	0,89	0,49	0,01	1,08	1,66
9,00	0,03	0,32	0,47	0,03	1,83	1,49
12,00	0,03	0,12	0,34	0,09	2,41	1,18
18,00	0,03	0,05	0,13	0,06	3,41	0,48
30,00	0,04	0,05	0,05	0,05	3,80	0,18
45,00	0,04	0,03	0,02	0,04	3,92	0,10
60,00	0,06	0,02	0,01	0,03	3,97	0,08

Tabla 72 Moles de los subproductos de la pirólisis a 500°C

min intervalo	H <sub>2</sub> mol H <sub>2</sub>	O mol O	CO mol CO	CH <sub>4</sub> Mol CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> mol N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub> Mol CO <sub>2</sub>
2,00	0,01	0,22	0,11	0,00	2,42	0,01
5,00	0,05	1,19	0,66	0,01	1,45	2,23
9,00	0,08	0,91	1,32	0,07	5,14	4,19
12,00	0,05	0,18	0,52	0,13	3,66	1,79
18,00	0,06	0,11	0,29	0,13	7,27	1,03
30,00	0,12	0,13	0,13	0,14	10,78	0,52

45,00	0,30	0,24	0,15	0,30	27,75	0,70
60,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabla 73 Moles acumulados de los subproductos de la pirólisis a 500°C

	H <sub>2</sub>	CO	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>
min intervalo	mol acum	mol acum2	mol acum3	mol acum4	mol acum5
2,00	0,01	0,11	0,00	2,42	0,01
5,00	0,06	0,77	0,01	3,87	2,24
9,00	0,13	2,09	0,08	9,01	6,42
12,00	0,18	2,61	0,21	12,67	8,21
18,00	0,24	2,90	0,34	19,95	9,24
30,00	0,36	3,03	0,49	30,73	9,76
45,00	0,66	3,18	0,79	58,48	10,46
60,00	0,66	3,18	0,79	58,48	10,46

Tabla 74 Fracciones molares de los subproductos de la pirólisis a 500°C

H <sub>2</sub>	CO	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>
FM %	FM % 2	FM % 3	FM % 4	FM % 5
0,89	4,32	1,07	79,49	14,22

Tabla 75 Poder calorífico de los subproductos de la pirólisis a 500°C

Poder Calorífico				
H <sub>2</sub>	CO	CH <sub>4</sub>	Total	Total
kcal/m <sup>3</sup> N	kcal/m <sup>3</sup> N <sub>2</sub>	kcal/m <sup>3</sup> N <sub>3</sub>	kcal/m <sup>3</sup> N <sub>4</sub>	MJ/m <sup>3</sup> N
27,28	130,55	101,87	259,70	1,09

Tabla 76 Potencia de la pirólisis a 500°C

Potencia		
Caudal promedio	Potencia	Potencia
ml/min	kcal/min	watt hues
201,43	0,05	3,65

## Pirólisis a 600°C

Tabla 77 Porcentaje de los subproductos de la pirólisis a 600°C

Tiempo muestra min	Caudal - 1 ml/min	ml de X/ml de gas					
		H <sub>2</sub> %	O %	CO %	CH <sub>4</sub> %	N <sub>2</sub> %	CO <sub>2</sub> %
2	337,1	1,01	1,80	9,81	0,90	56,24	30,25
5	300,0	1,98	1,40	12,43	2,79	42,58	38,83
9	377,4	2,76	1,07	11,48	4,50	44,26	35,93
12	111,5	3,19	3,21	6,65	4,43	62,15	20,37
18	104,2	4,12	0,43	4,18	3,30	76,51	11,47
30	134,9	4,57	0,53	2,62	2,52	82,80	6,96
45	98,4	4,94	0,60	1,60	1,87	86,38	4,61
60	105,9	5,08	0,39	0,94	1,24	89,14	3,22

Tabla 78 Moles por litro de los subproductos de la pirólisis a 600°C

min intervalo	H <sub>2</sub>	O	CO	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>
	mol/l	mol/l	mol/l	mol/l	mol/l	mol/l
2,00	0,04	0,07	0,41	0,04	2,34	1,26
5,00	0,08	0,06	0,52	0,12	1,77	1,62
9,00	0,12	0,04	0,48	0,19	1,84	1,50
12,00	0,13	0,13	0,28	0,18	2,59	0,85
18,00	0,17	0,02	0,17	0,14	3,18	0,48
30,00	0,19	0,02	0,11	0,10	3,45	0,29
45,00	0,21	0,03	0,07	0,08	3,60	0,19
60,00	0,21	0,02	0,04	0,05	3,71	0,13

Tabla 79 Moles de los subproductos de la pirólisis a 600°C

min intervalo	H <sub>2</sub>	O	CO	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>
	mol H <sub>2</sub>	mol O	mol CO	Mol CH <sub>4</sub>	mol N <sub>2</sub>	Mol CO <sub>2</sub>
2,00	0,01	0,02	0,12	0,01	0,70	0,38
5,00	0,12	0,09	0,78	0,18	2,67	2,44
9,00	0,10	0,04	0,43	0,17	1,64	1,33
12,00	0,17	0,17	0,35	0,23	3,23	1,06
18,00	0,42	0,04	0,42	0,33	7,73	1,16
30,00	0,45	0,05	0,26	0,25	8,14	0,68
45,00	0,65	0,08	0,21	0,25	11,43	0,61
60,00	0,91	0,07	0,17	0,22	15,95	0,58

Tabla 80 Moles acumulados de los subproductos de la pirólisis a 600°C

	<b>H<sub>2</sub></b>	<b>CO</b>	<b>CH<sub>4</sub></b>	<b>N<sub>2</sub></b>	<b>CO<sub>2</sub></b>
<b>min intervalo</b>	<b>mol acum</b>	<b>mol acum2</b>	<b>mol acum3</b>	<b>mol acum4</b>	<b>mol acum5</b>
2,00	0,01	0,12	0,01	0,70	0,38
5,00	0,14	0,90	0,19	3,38	2,82
9,00	0,24	1,33	0,35	5,02	4,15
12,00	0,41	1,67	0,58	8,25	5,21
18,00	0,82	2,10	0,92	15,99	6,37
30,00	1,27	2,36	1,16	24,12	7,05
45,00	1,92	2,57	1,41	35,55	7,66
60,00	2,83	2,74	1,63	51,51	8,24

Tabla 81 Fracciones molares de los subproductos de la pirólisis a 600°C

<b>H<sub>2</sub></b>	<b>CO</b>	<b>CH<sub>4</sub></b>	<b>N<sub>2</sub></b>	<b>CO<sub>2</sub></b>
FM %	FM % 2	FM % 3	FM % 4	FM % 5
4,44	2,96	1,92	81,61	9,07

Tabla 82 Poder calorífico de los subproductos de la pirólisis a 600°C

<b>Poder Calorífico</b>				
<b>H<sub>2</sub></b>	<b>CO</b>	<b>CH<sub>4</sub></b>	<b>Total</b>	<b>Total</b>
kcal/m <sup>3</sup> N	kcal/m <sup>3</sup> N <sub>2</sub>	kcal/m <sup>3</sup> N <sub>3</sub>	kcal/m <sup>3</sup> N <sub>4</sub>	MJ/m <sup>3</sup> N
135,35	89,26	182,64	407,26	1,70

Tabla 83 Potencia de la pirólisis a 600°C

<b>Potencia</b>		
<b>Caudal promedio</b>	<b>Potencia</b>	<b>Potencia</b>
ml/min	kcal/min	watt hues
165,47	0,07	4,70



Tabla 87 Moles acumulados de los subproductos de la pirólisis a 700°C

	<b>H<sub>2</sub></b>	<b>CO</b>	<b>CH<sub>4</sub></b>	<b>N<sub>2</sub></b>	<b>CO<sub>2</sub></b>
<b>min intervalo</b>	<b>mol acum</b>	<b>mol acum2</b>	<b>mol acum3</b>	<b>mol acum4</b>	<b>mol acum5</b>
2,00	0,10	0,52	0,06	1,49	0,06
5,00	0,36	1,05	0,33	2,20	1,50
9,00	0,90	1,55	0,73	4,36	2,64
12,00	1,75	2,09	1,37	9,13	3,57
18,00	2,95	2,62	2,06	19,43	4,46
30,00	4,38	3,05	2,52	35,02	5,13
45,00	5,78	3,41	2,82	52,36	5,72
60,00	5,78	3,41	2,82	52,36	5,72

Tabla 88 Fracciones molares de los subproductos de la pirólisis a 700°C

<b>H<sub>2</sub></b>	<b>CO</b>	<b>CH<sub>4</sub></b>	<b>N<sub>2</sub></b>	<b>CO<sub>2</sub></b>
FM %	FM % 2	FM % 3	FM % 4	FM % 5
8,25	4,87	4,02	74,70	8,16

Tabla 89 Poder calorífico de los subproductos de la pirólisis a 700°C

<b>Poder Calorífico</b>				
<b>H<sub>2</sub></b>	<b>CO</b>	<b>CH<sub>4</sub></b>	<b>Total</b>	<b>Total</b>
kcal/m <sup>3</sup> N	kcal/m <sup>3</sup> N <sub>2</sub>	kcal/m <sup>3</sup> N <sub>3</sub>	kcal/m <sup>3</sup> N <sub>4</sub>	MJ/m <sup>3</sup> N
251,52	147,05	382,26	780,83	3,27

Tabla 90 Potencia de la pirólisis a 700°C

<b>Potencia</b>		
<b>Caudal promedio</b>	<b>Potencia</b>	<b>Potencia</b>
ml/min	kcal/min	watt hues
160,30	0,13	8,73

### 4.3.3 Resultados de gasificación

#### Gasificación a 500°C

Tabla 91 Porcentaje de los subproductos de la gasificación a 500°C

Tiempo muestra min	Caudal - 1 ml/min	ml de X/ml de gas					
		H <sub>2</sub> %	O	CO	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>
1	60,6	0,22	2,95	0,30	0,02	94,48	2,03
3	67,9	0,13	3,16	2,00	0,05	84,75	9,91
7	87,5	0,12	2,20	5,05	0,12	73,54	18,96
12	87,4	0,13	0,89	8,05	0,28	63,29	27,36
20	137,3	0,14	0,42	8,48	0,34	61,03	29,60
29	75,4	0,58	0,83	6,36	0,29	66,46	25,47
38	60,6	0,22	2,95	0,30	0,02	94,48	2,03
48	67,9	0,13	3,16	2,00	0,05	84,75	9,91
56	87,5	0,12	2,20	5,05	0,12	73,54	18,96

Tabla 92 Moles por litro de los subproductos de la gasificación a 500°C

min intervalo	H <sub>2</sub> mol/l	O mol/l	CO mol/l	CH <sub>4</sub> mol/l	N <sub>2</sub> mol/l	CO <sub>2</sub> mol/l
1	0,01	0,12	0,01	0,00	3,93	0,08
3	0,01	0,13	0,08	0,00	3,53	0,41
7	0,00	0,09	0,21	0,01	3,06	0,79
12	0,01	0,04	0,34	0,01	2,63	1,14
20	0,01	0,02	0,35	0,01	2,54	1,23
29	0,02	0,03	0,26	0,01	2,77	1,06
38	0,01	0,12	0,01	0,00	3,93	0,08
48	0,01	0,13	0,08	0,00	3,53	0,41
56	0,00	0,09	0,21	0,01	3,06	0,79

Tabla 93 Moles por litro de las relaciones de los subproductos de la gasificación a 500°C

min intervalo	CO/CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> /CO	H <sub>2</sub> /CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> /CH <sub>4</sub>
1	0,15	0,72	0,11	9,80
3	0,20	0,06	0,01	2,72
7	0,27	0,02	0,01	0,96
12	0,29	0,02	0,00	0,47
20	0,29	0,02	0,00	0,41
29	0,25	0,09	0,02	1,98
38	0,15	0,72	0,11	9,80
48	0,20	0,06	0,01	2,72
56	0,27	0,02	0,01	0,96

Tabla 94 Moles de los subproductos de la gasificación a 500°C

	H <sub>2</sub>	O	CO	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>
min intervalo	mol H <sub>2</sub>	mol O	mol CO	Mol CH <sub>4</sub>	mol N <sub>2</sub>	Mol CO <sub>2</sub>
1	0,00	0,02	0,00	0,00	0,53	0,01
3	0,00	0,11	0,07	0,00	3,09	0,36
7	0,01	0,18	0,40	0,01	5,89	1,52
12	0,02	0,16	1,47	0,05	11,57	5,00
20	0,02	0,06	1,12	0,04	8,04	3,90
29	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
38	0,00	0,02	0,00	0,00	0,53	0,01
48	0,00	0,11	0,07	0,00	3,09	0,36
56	0,01	0,18	0,40	0,01	5,89	1,52

Tabla 95 Moles acumulados de los subproductos de la gasificación a 500°C

	H <sub>2</sub>	CO	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>
min intervalo	mol acum	mol acum2	mol acum3	mol acum4	mol acum5	mol acum
1	0,00	0,00	0,00	0,53	0,01	0,00
3	0,01	0,07	0,00	3,62	0,37	0,01
7	0,02	0,48	0,01	9,51	1,89	0,02
12	0,04	1,95	0,06	21,08	6,89	0,04
20	0,06	3,07	0,11	29,12	10,79	0,06
29	0,06	3,07	0,11	29,12	10,79	0,06
38	0,00	0,00	0,00	0,53	0,01	0,00
48	0,01	0,07	0,00	3,62	0,37	0,01
56	0,02	0,48	0,01	9,51	1,89	0,02

Tabla 96 Fracciones molares de los subproductos de la gasificación a 500°C

H <sub>2</sub>	CO	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>
FM %	FM % 2	FM % 3	FM % 4	FM % 5
0,13	7,11	0,25	67,49	25,01

Tabla 97 Poder calorífico de los subproductos de la gasificación a 500°C

Poder Calorífico				
H <sub>2</sub>	CO	CH <sub>4</sub>	Total	Total
kcal/m <sup>3</sup> N	kcal/m <sup>3</sup> N <sub>2</sub>	kcal/m <sup>3</sup> N <sub>3</sub>	kcal/m <sup>3</sup> N <sub>4</sub>	MJ/m <sup>3</sup> N
4,09	214,72	23,71	242,51	1,01

Tabla 98 Potencia de la gasificación a 500°C

Potencia		
Caudal promedio	Potencia	Potencia
ml/min	kcal/min	watt hues
91,09	0,02	1,54

## Gasificación a 600°C

Tabla 99 Porcentaje de los subproductos de la gasificación a 600°C

Tiempo muestra	Caudal - 1	ml de X/ml	ml de X/ml	ml de X/ml	ml de X/ml	ml de X/ml	ml de X/ml
		de gas	de gas	de gas	de gas	de gas	de gas
		H <sub>2</sub>	O	CO	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>
<b>min</b>	<b>ml/min</b>	<b>%</b>					
1	600,0	6,31	0,50	5,17	3,30	67,99	16,73
3	461,5	1,63	1,20	10,26	0,93	54,59	31,38
7	461,5	1,95	1,65	13,28	3,06	38,34	41,73
12	115,3	6,43	1,07	7,69	6,09	57,21	21,51
20	97,9	0,13	0,28	4,13	1,78	77,32	16,36
29	131,3	3,81	0,72	12,80	6,14	37,35	39,18
38	90,1	0,13	0,12	4,02	1,06	78,52	16,16
48	88,6	0,09	39,64	3,94	0,72	39,14	16,47
56	89,4	3,90	0,14	3,69	0,54	75,35	16,38

Tabla 100 Moles por litro de los subproductos de la gasificación a 500°C

	H <sub>2</sub>	O	CO	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>
<b>min</b>	<b>mol/l</b>	<b>mol/l</b>	<b>mol/l</b>	<b>mol/l</b>	<b>mol/l</b>	<b>mol/l</b>
<b>intervalo</b>	<b>mol/l</b>	<b>mol/l</b>	<b>mol/l</b>	<b>mol/l</b>	<b>mol/l</b>	<b>mol/l</b>
1	0,26	0,02	0,22	0,14	2,83	0,70
3	0,07	0,05	0,43	0,04	2,27	1,31
7	0,08	0,07	0,55	0,13	1,60	1,74
12	0,27	0,04	0,32	0,25	2,38	0,90
20	0,01	0,01	0,17	0,07	3,22	0,68
29	0,16	0,03	0,53	0,26	1,55	1,63
38	0,01	0,01	0,17	0,04	3,27	0,67
48	0,00	1,65	0,16	0,03	1,63	0,69
56	0,16	0,01	0,15	0,02	3,14	0,68

Tabla 101 Moles por litro de las relaciones de los subproductos de la gasificación a 600°C

<b>Min</b>	<b>CO/CO<sub>2</sub></b>	<b>H<sub>2</sub>/CO</b>	<b>H<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub></b>	<b>H<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub></b>
<b>intervalo</b>				
1	0,31	1,22	0,38	1,91
3	0,33	0,16	0,05	1,75
7	0,32	0,15	0,05	0,64
12	0,36	0,84	0,30	1,06
20	0,25	0,03	0,01	0,07
29	0,33	0,30	0,10	0,62
38	0,25	0,03	0,01	0,12
48	0,24	0,02	0,01	0,13
56	0,23	1,06	0,24	7,17

Tabla 102 Moles de los subproductos de la gasificación a 600°C

	<b>H<sub>2</sub></b>	<b>O</b>	<b>CO</b>	<b>CH<sub>4</sub></b>	<b>N<sub>2</sub></b>	<b>CO<sub>2</sub></b>
<b>min intervalo</b>	<b>mol H<sub>2</sub></b>	<b>mol O</b>	<b>mol CO</b>	<b>Mol CH<sub>4</sub></b>	<b>mol N<sub>2</sub></b>	<b>Mol CO<sub>2</sub></b>
1	0,12	0,01	0,10	0,06	1,31	0,32
3	0,09	0,07	0,59	0,05	3,15	1,81
7	0,07	0,06	0,45	0,10	1,29	1,40
12	0,31	0,05	0,38	0,30	2,80	1,05
20	0,01	0,03	0,45	0,19	8,45	1,79
29	0,41	0,08	1,39	0,67	4,06	4,26
38	0,02	0,02	0,56	0,15	11,00	2,26
48	0,02	7,08	0,70	0,13	6,99	2,94
56	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabla 103 Moles acumulados de los subproductos de la gasificación a 600°C

	<b>H<sub>2</sub></b>	<b>CO</b>	<b>CH<sub>4</sub></b>	<b>N<sub>2</sub></b>	<b>CO<sub>2</sub></b>	<b>H<sub>2</sub></b>
<b>min intervalo</b>	<b>mol acum</b>	<b>mol acum2</b>	<b>mol acum3</b>	<b>mol acum4</b>	<b>mol acum5</b>	<b>mol acum</b>
1	0,12	0,10	0,06	1,31	0,32	0,12
3	0,22	0,69	0,12	4,45	2,13	0,22
7	0,28	1,14	0,22	5,74	3,53	0,28
12	0,60	1,51	0,52	8,54	4,58	0,60
20	0,61	1,96	0,71	16,99	6,37	0,61
29	1,02	3,36	1,38	21,05	10,63	1,02
38	1,04	3,92	1,53	32,05	12,90	1,04
48	1,06	4,62	1,66	39,04	15,84	1,06
56	1,06	4,62	1,66	39,04	15,84	1,06

Tabla 104 Fracciones molares de los subproductos de la gasificación a 600°C

<b>H<sub>2</sub></b>	<b>CO</b>	<b>CH<sub>4</sub></b>	<b>N<sub>2</sub></b>	<b>CO<sub>2</sub></b>
FM %	FM % 2	FM % 3	FM % 4	FM % 5
1,70	7,43	2,66	62,75	25,46

Tabla 105 Poder calorífico de los subproductos de la gasificación a 600°C

<b>Poder Calorífico</b>				
<b>H<sub>2</sub></b>	<b>CO</b>	<b>CH<sub>4</sub></b>	<b>Total</b>	<b>Total</b>
kcal/m <sup>3</sup> N	kcal/m <sup>3</sup> N <sub>2</sub>	kcal/m <sup>3</sup> N <sub>3</sub>	kcal/m <sup>3</sup> N <sub>4</sub>	MJ/m <sup>3</sup> N
51,87	224,36	252,95	529,17	2,21

Tabla 106 Potencia de la gasificación a 600°C

<b>Potencia</b>		
<b>Caudal promedio</b>	<b>Potencia</b>	<b>Potencia</b>
ml/min	kcal/min	watt hues
191,95	0,10	7,09

## Gasificación a 700°C

Tabla 107 Porcentaje de los subproductos de la gasificación a 700°C

Tiempo muestra min	Caudal - 1 ml/min	ml de X/ml de gas					
		H <sub>2</sub>	O	CO	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>
3	413,79	16,58	1,94	13,44	3,20	27,38	37,47
7	182,09	19,87	2,31	13,04	3,78	41,22	19,79
13	109,58	16,36	0,95	14,62	3,28	51,14	13,64
23	105,17	10,22	1,85	11,47	1,70	63,63	11,14
35	129,68	7,21	0,86	10,57	0,77	69,28	11,31
45	92,21	6,20	0,63	11,00	0,53	69,12	12,53
57	76,95	5,69	0,36	11,76	0,32	69,29	12,57

Tabla 108 Moles por litro de los subproductos de la gasificación a 700°C

min intervalo	H <sub>2</sub> mol/l	O mol/l	CO mol/l	CH <sub>4</sub> mol/l	N <sub>2</sub> mol/l	CO <sub>2</sub> mol/l
3	72,62	3,00	0,69	0,08	0,56	0,13
7	58,78	7,00	0,83	0,10	0,54	0,16
13	48,86	13,00	0,68	0,04	0,61	0,14
23	36,37	23,00	0,43	0,08	0,48	0,07
35	30,72	35,00	0,30	0,04	0,44	0,03
45	30,88	45,00	0,26	0,03	0,46	0,02
57	30,71	57,00	0,24	0,02	0,49	0,01

Tabla 109 Moles por litro de las relaciones de los subproductos de la gasificación a 700°C

min intervalo	CO/CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> /CO	H <sub>2</sub> /CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> /CH <sub>4</sub>
3	0,36	1,23	0,44	5,19
7	0,66	1,52	1,00	5,26
13	1,07	1,12	1,20	4,98
23	1,03	0,89	0,92	6,02
35	0,93	0,68	0,64	9,32
45	0,88	0,56	0,50	11,78
57	0,94	0,48	0,45	17,92

Tabla 110 Moles de los subproductos de la gasificación a 700°C

	<b>H<sub>2</sub></b>	<b>O</b>	<b>CO</b>	<b>CH<sub>4</sub></b>	<b>N<sub>2</sub></b>	<b>CO<sub>2</sub></b>
<b>min intervalo</b>	<b>mol H<sub>2</sub></b>	<b>mol O</b>	<b>mol CO</b>	<b>Mol CH<sub>4</sub></b>	<b>mol N<sub>2</sub></b>	<b>Mol CO<sub>2</sub></b>
3	0,38	0,04	0,31	0,07	0,62	0,85
7	0,63	0,07	0,42	0,12	1,32	0,63
13	0,93	0,05	0,83	0,19	2,91	0,78
23	1,27	0,23	1,42	0,21	7,90	1,38
35	0,97	0,12	1,42	0,10	9,31	1,52
45	0,89	0,09	1,58	0,08	9,96	1,81
57	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabla 111 Moles acumulados de los subproductos de la gasificación a 700°C

	<b>H<sub>2</sub></b>	<b>CO</b>	<b>CH<sub>4</sub></b>	<b>N<sub>2</sub></b>	<b>CO<sub>2</sub></b>	<b>H<sub>2</sub></b>
<b>min intervalo</b>	<b>mol acum</b>	<b>mol acum2</b>	<b>mol acum3</b>	<b>mol acum4</b>	<b>mol acum5</b>	<b>mol acum</b>
3	0,38	0,31	0,07	0,62	0,85	0,38
7	1,01	0,72	0,19	1,94	1,48	1,01
13	1,94	1,55	0,38	4,85	2,26	1,94
23	3,21	2,98	0,59	12,75	3,64	3,21
35	4,18	4,40	0,69	22,05	5,16	4,18
45	5,07	5,98	0,77	32,02	6,97	5,07
57	5,07	5,98	0,77	32,02	6,97	5,07

Tabla 112 Fracciones molares de los subproductos de la gasificación a 700°C

<b>H<sub>2</sub></b>	<b>CO</b>	<b>CH<sub>4</sub></b>	<b>N<sub>2</sub></b>	<b>CO<sub>2</sub></b>
FM %	FM % 2	FM % 3	FM % 4	FM % 5
9,98	11,77	1,52	63,01	13,72

Tabla 113 Poder calorífico de los subproductos de la gasificación a 700°C

<b>Poder Calorífico</b>				
<b>H<sub>2</sub></b>	<b>CO</b>	<b>CH<sub>4</sub></b>	<b>Total</b>	<b>Total</b>
kcal/m <sup>3</sup> N	kcal/m <sup>3</sup> N <sub>2</sub>	kcal/m <sup>3</sup> N <sub>3</sub>	kcal/m <sup>3</sup> N <sub>4</sub>	MJ/m <sup>3</sup> N
304,52	355,53	144,07	804,12	3,36

Tabla 114 Potencia de la gasificación a 500°C

<b>Potencia</b>		
<b>Caudal promedio</b>	<b>Potencia</b>	<b>Potencia</b>
ml/min	kcal/min	watt hues
158,50	0,13	8,89

## **5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.**

El estudio de Arteaga-Estrella (2013) sobre el desperdicio de mucílago del cacao en el cantón Naranjal de la provincia del Guayas, Ecuador, reveló datos importantes. Según sus hallazgos, el 81% de los agricultores en la zona cultivaban cacao en sus parcelas. Asimismo, todos los agricultores encuestados (100%) admitieron no tener conocimiento sobre la disposición adecuada del mucílago y otros desperdicios generados durante la producción de cacao[183]. Estos resultados resaltan la necesidad de explorar y promover diferentes usos para el mucílago, como su aplicación en la industria alimentaria, cosmética, y específicamente en este estudio, su aprovechamiento en la producción de energía.

Con estos antecedentes, la discusión de los resultados se ha estructurado en dos partes. En primer lugar, se presentarán y analizarán los resultados obtenidos de la experimentación aplicada a la pulpa mucilaginoso. Posteriormente, se abordarán los resultados derivados de los procesos aplicados a la cáscara de la vaina del cacao.

### **5.1 Discusión de los resultados de la experimentación aplicada a la pulpa mucilaginoso.**

En el marco del proceso bioquímico para la obtención de bioetanol, es fundamental realizar la etapa de hidrólisis previa a la fermentación, seguida por una secuencia de procedimientos que conducen a la formación del biocombustible. Este enfoque secuencial no solo asegura la eficiencia en la conversión de sustratos específicos, sino que también establece los cimientos para la exitosa producción de bioetanol[184]. Es importante señalar que, en el caso de la pulpa mucilaginoso derivada de la refinación del cacao, no se requiere hidrólisis, dado que es un líquido azucarado con un contenido de humedad del 88%. Además, contiene un 11% de sacarosa, un tipo de azúcar que se fermenta posteriormente para obtener el bioetanol, como se detalla en la tabla 4.

Experiencias similares, como la llevada a cabo por Tejada et al. (2010), utilizaron cáscaras de piña y naranja como materia prima para la producción de biocombustible,

obteniendo rendimientos del 84,07% y 69,35%, con porcentajes de sacarosa de 0,883% y 2,788%, respectivamente[185]. Estos resultados resaltan la importancia de llevar a cabo una hidrólisis previa a la fermentación en ciertos sustratos, a diferencia del mucílago, cuyas propiedades son propicias para un proceso de fermentación directa, lo cual constituye un ahorro importante de tiempo y recursos en el tratamiento de la materia prima para la transformación a bioetanol.

Tabla 115 Comparación de humedad y % de azúcares del mucílago del cacao con otra biomasa[185]

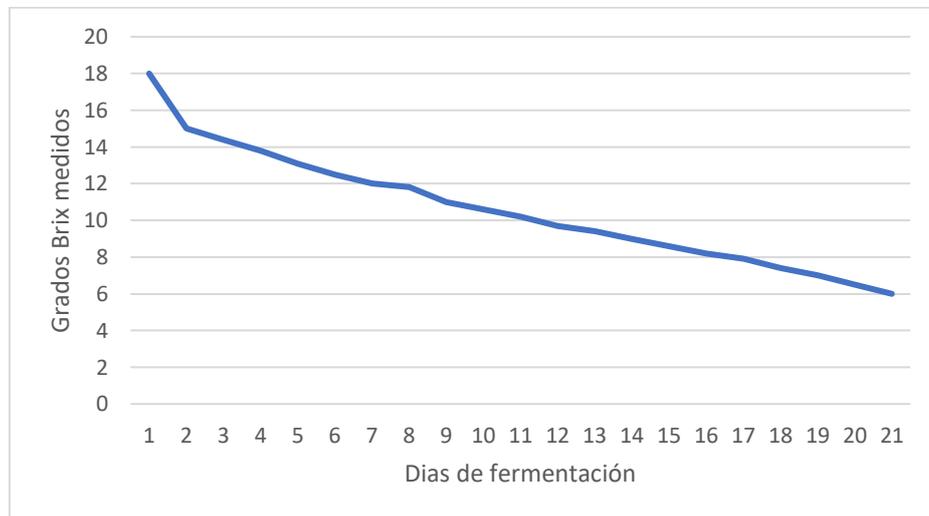
<b>Biomasa</b>	<b>% de Humedad</b>	<b>% de sacarosa</b>
Cáscaras de piña	84.07	0.883
Cáscaras de naranja	69.35	2,788
Mucílago del caco	88	11

En la Tabla 115 resulta relevante resaltar los porcentajes de azúcar presentes en las tres fuentes de recursos biomásicos. Mientras que el mucílago del cacao exhibe un contenido de azúcares (sacarosa) 11%, las cáscaras de piña y naranja muestran porcentajes de 0,883% y 2,788%, respectivamente. La notable cantidad de azúcares en el mucílago se convierte en un indicador crucial que justifica la omisión del proceso de hidrólisis. Este procedimiento, que implica la liberación de azúcares a partir de compuestos más complejos mediante la adición de agua y la ruptura de enlaces químicos, no es necesario debido a la importante cantidad de azúcares ya presentes en el mucílago.

En la experimentación con mucilago de cacao se usó la levadura *Saccharomyces cerevisiae* en concentración de 0,05% ya que de acuerdo a la literatura es el microorganismo más utilizado para la producción de bioetanol a partir de materias primas que contienen azúcar, debido a su capacidad de degradar la sacarosa en hexosas[186]. Las células de *Saccharomyces cerevisiae* requieren pequeñas cantidades de oxígeno para la síntesis de ácidos grasos y esteroides durante la producción de bioetanol, por lo que la aireación fue parámetro de control importante del proceso. La Figura 59 muestra los resultados de los Grados Brix medidos durante los 21 días de fermentación del mucílago. La elección de este período se fundamenta en la observación del comportamiento de los grados Brix,

evidenciando que aún persistía la degradación de azúcares hasta el día 15, momento en el cual comenzaron a estabilizarse.

Figura 59 Concentración de azúcares por día proceso de Fermentación.

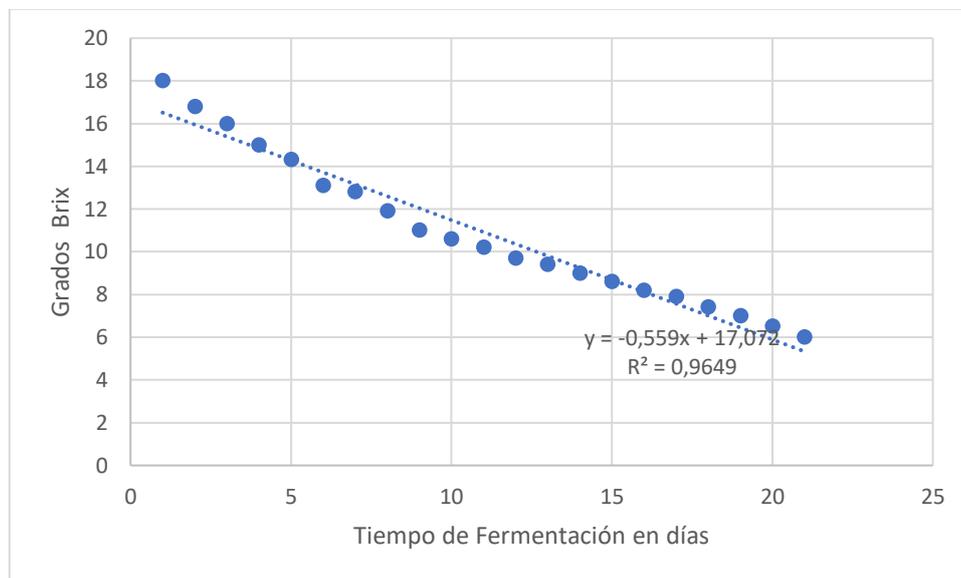


En el primer día, se evidencia un elevado contenido de azúcares representado por el 18% de grados Brix. Este valor inicial sugiere una concentración significativa de materia prima para la producción de bioetanol. A medida que avanza la fermentación (días 2-21), se observa una reducción constante en los grados Brix. Esta disminución refleja el consumo gradual de azúcares por parte de las levaduras presentes en el mucílago, indicando una actividad fermentativa eficiente en la transformación de azúcares en productos finales como el bioetanol. A lo largo del proceso, la reducción progresiva de los grados Brix sugiere una eficiencia continua en la fermentación. Sin embargo, tras un período de tiempo, los valores de grados Brix parecen estabilizarse (días 15-21), indicando posiblemente la fase final de la fermentación o una disminución en la velocidad de consumo de azúcares.

Estos resultados sugieren que el mucílago de cacao puede ser una fuente efectiva de azúcares para la fermentación y producción de bioetanol. La estabilización de los grados Brix puede indicar la finalización del proceso de fermentación o un equilibrio entre la producción y el consumo de azúcares.

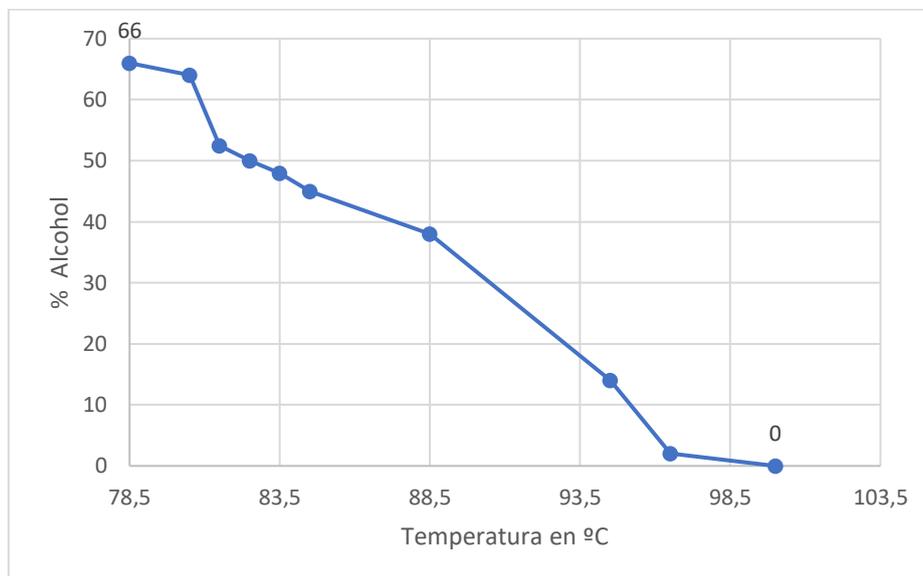
Guigou et al. (2011), al concluir su investigación sobre la producción de etanol a partir de sorgo dulce, identificaron una relación lineal entre la concentración total de azúcar en el jugo y los grados Brix. Esta relación lineal puede emplearse para estimar el rendimiento potencial de etanol a partir de la materia prima[187]. En el estudio del mucílago del cacao, corroboramos esta afirmación al observar una clara relación lineal en los grados Brix medidos durante el proceso de fermentación, como se ilustra en la Figura 60.

Figura 60 Relación lineal entre Grados Brix medidos y días de fermentación del mucílago



La Figura 61 Muestra la evolución del porcentaje de alcohol con la temperatura en el proceso de fermentación llevada a cabo con la levadura *Saccharomyces cerevisiae* al 0,05%. Se implementó el proceso de primera destilación a diversas temperaturas, y tras ajustes, se identificó que la temperatura óptima para la destilación fraccionada, donde se alcanzó el mayor porcentaje de alcohol, fue de 78,5°C, logrando un rendimiento del 66% V/V de alcohol. La segunda destilación se ejecutó a la misma temperatura, y la concentración resultante de la solución fue del 92% V/V de alcohol.

Figura 61 Variación del porcentaje de alcohol en la solución fermentada en función de diferentes temperaturas de destilación.



En una investigación reciente, Etalema Desta et al. (2023) exploraron el potencial de la biomasa del almidón de anchota (*Coccinia abyssinica*) como biocombustible. En su experimento, llevaron a cabo una primera destilación a 78,5°C de la solución fermentada utilizando la levadura *Saccharomyces cerevisiae*, logrando un porcentaje de concentración de alcohol del 25% V/V. Los resultados obtenidos sugieren que, tras los tratamientos bioquímicos de hidrólisis, fermentación y destilación, esta biomasa podría ser utilizada como biocombustible, según pruebas de combustión básicas realizadas por los autores[188]

En comparación, en la experimentación con la pulpa mucilaginosa del cacao, alcanzamos un importante 66% V/V en la primera destilación. Este resultado resalta las propiedades superiores de la pulpa mucilaginosa del cacao como candidata a biocombustible, incluso sin necesidad de someterla al proceso de hidrólisis. Estas características la posicionan como una opción prometedora en el panorama de los biocombustibles en comparación con la biomasa estudiada por Etalema Desta et al. 2023.

Balladares et al. (2016) llevaron a cabo una caracterización físico-química de las sudoraciones del cacao en la costa ecuatoriana. Después de recolectar muestras representativas y someterlas a procesos de pasteurización, obtuvieron un contenido de grados Brix en el mucílago de  $19,6 \pm 1,6$ . Este estudio llegó a la conclusión significativa de que el material (mucílago) podría ser empleado como materia prima para la producción de bioetanol[189]. En la experimentación realizada, al medir el grado Brix de la materia prima sin pasteurizar, encontramos un valor de 18, que, en comparación con el estudio de Balladares et al., estaría dentro de los parámetros considerando el margen de  $\pm 1,6$ . Es relevante señalar que la pasteurización podría influir en estos resultados.

En la primera fase de destilación fraccionada del mucílago, tras su caracterización como potencial biocombustible, se logró obtener un 66% V/V de bioetanol. A pesar de este rendimiento, es crucial tener en cuenta que en países de la Unión Europea se usan concentraciones de 98,8% V/V, en Estados Unidos 99% V/V y en Brasil 99,6% V/V, de concentraciones permitidas para biocombustibles[190]. Jankovic et al. (2024) señalan, en su estudio sobre la separación de bioetanol mediante un nuevo proceso de destilación, la complejidad inherente a la obtención de bioetanol a través de procesos biológicos como la fermentación. Este proceso se vuelve un desafío cuando las temperaturas deben ser moderadas para mantener vivos a los microorganismos. Los investigadores proponen técnicas alternativas para este proceso en desarrollo, aunque actualmente se encuentre en etapa de simulación[191].

Arenas Grimaldo et al. (2024), en su investigación sobre la secuencia de destilación para la purificación de bioetanol obtenido del bagazo de sotol, implementaron un esquema extractivo de destilación con etilenglicol como agente disolvente, logrando una pureza del etanol del 99,91% V/V[192]. En contraste, en la experimentación con el mucílago del cacao, se llevaron a cabo dos fases de destilación fraccionada, alcanzando un 92% V/V de pureza de etanol. Aunque este resultado está considerablemente por debajo del estudio de referencia, abre la puerta a nuevas investigaciones en técnicas de destilación avanzadas con el uso de disolventes, con el potencial de mejorar las concentraciones de bioetanol en la biomasa seleccionada en el experimento.

En el contexto de la experimentación con el mucílago, se llevaron a cabo dos fases de destilación fraccionada, logrando un significativo 92% V/V de etanol. Aunque esta concentración es alta, no cumple con los estándares para ser utilizado como carburante puro (mezcla E100) en motores de combustión interna en los países mencionados. Sin embargo, es relevante destacar que puede ser utilizado en mezclas, como la E5, que es la opción utilizada por la nafta Ecopaís en Ecuador.

Una manera de incrementar el consumo de biocombustibles consiste en aumentar gradualmente el porcentaje de bioetanol, lo que permite realizar modificaciones mínimas en los vehículos. En España al igual que Ecuador, al igual que en otros países, la utilización de E5 está autorizada solo como una etapa inicial durante un periodo breve, como parte de un plan previo antes de implementar completamente el uso de una mezcla de bioetanol al 10%[193]. La tabla 116 presenta una comparación entre la mezcla E5, un biocombustible obtenido a partir de una combinación de 5% de bioetanol extraído del mucílago del cacao, producto de la experimentación y un 95% de gasolina extra, con las naftas gasolina super 92 octanos, y gasolina extra 85 octanos, disponibles en el mercado ecuatoriano.

Tabla 116 Comparación de los combustibles comerciales en Ecuador con la mezcla E5 realizada con Bioetanol producto del mucílago del cacao.

ENSAYO	EXTRA	SUPER	Biocombustible E5	UNIDAD	NORMA MÉTODO
# de Octano (RON)	85	92	85.8	----	NTE INEN 2102
Poder Calorífico inferior	45.882,3	47.124,4	45.217,7	J/kg	ASTM D4809-18
Temperatura 10%	70	50	54.1	°C	ASTM D86-15
Temperatura 50%	120	90	107	°C	ASTM D86-15
Temperatura 90%	189	190	164	°C	ASTM D86-15
Punto Final	220	218	210	°C	ASTM D86-15
Residuo	2	1.1	1.01	%	ASTM D86-15
Presión de vapor Ried	60	58	56,01	kPa	ASTM D323-15a
Corrosión a la lámina de cobre	1a	1a	1a	-----	ASTM D130-12
Contenido de azufre	0.065	0.065	0.059	%	ASTM D4292-16
Contenido de gomas	3	4	3	Mg/100 ml	ASTM D381-12

La Tabla 71 presenta los resultados de la caracterización de los combustibles comerciales en Ecuador, así como del biocombustible E5, obtenido de la mezcla que consiste en un 5% de bioetanol proveniente del mucílago del cacao y un 95% de gasolina extra 85 octanos RON. Se destaca que el biocombustible cumple plenamente con la norma INEN 935, que establece los requisitos mínimos para las gasolinas utilizadas en el país. Esta observación es importante, ya que, en caso de una producción a gran escala, el mucílago podría contribuir a la elaboración de la gasolina ecopaís, que es parte de la mezcla E5. En Ecuador, la base de la E5 es la caña de azúcar, y en este contexto, el mucílago podría desempeñar un papel fundamental en este proceso de producción.

El biocombustible derivado de la experimentación presenta mejoras significativas en todos los parámetros en comparación con la gasolina extra convencional. Mientras el grado octano de la gasolina extra se sitúa en 85, el bioetanol obtenido alcanza un importante nivel de 85,9. Este aumento en el grado octano del biocombustible es particularmente destacado, ya que, según el estudio de Olugbenga (2023) sobre el uso de bioetanol para mejorar las propiedades de la

gasolina nigeriana, el bioetanol puro alcanza una clasificación de 104 octanos RON, superando incluso la calidad antidetonante de la gasolina super, que se muestra en la Tabla 71 con una clasificación de 92 octanos RON[194].

En el contexto específico del biocombustible E5 derivado del mucílago del cacao, Abdellatief et al. (2023) realizaron un estudio sobre tecnologías energéticas bajas en carbono para producir gasolina de alto octanaje. Comenzando con una mezcla E0 con un grado octano de 65,7 RON, al avanzar a una mezcla E5, observaron un significativo aumento en el grado octano, alcanzando los 69,4 RON[195]. Este hallazgo respalda la tendencia de aumento en el grado octano que se observó en los combustibles utilizados en la presente experimentación, donde el E0 representa la gasolina extra convencional con 85 a 85,9 octanos RON. Este resultado se alinea con diversos estudios revisados en la literatura científica.

En la tabla 71, se evidencia que el poder calorífico inferior del biocombustible E5 es menor al de las gasolinas extra y super, lo cual era esperado debido a que el bioetanol por sí solo tiene un menor poder calorífico que las naftas convencionales. Esta observación se respalda con el estudio de Ge et al (2022), enfocado en la evaluación de biocombustibles celulósicos derivados de residuos agrícolas. En dicho estudio, se determinó que el poder calorífico inferior del bioetanol es de 27,9 KJ/Kg, mientras que para la mezcla E5 fue de 44,5 kJ/kg.

Adicionalmente, en la mezcla E10, el poder calorífico inferior fue de 42,5 kJ/kg[196], indicando una tendencia a la disminución del Poder Calorífico Inferior de la mezcla a medida que se incrementa el porcentaje de bioetanol utilizado en el biocombustible. Aunque el mencionado estudio no especifica el cultivo del que proviene la biomasa, el biocombustible E5 obtenido del mucílago del cacao, en su caracterización, mostró un poder calorífico inferior de 45217,7 kJ/kg. A pesar de existir una diferencia razonable con respecto a los resultados del estudio mencionado, las variaciones entre los poderes caloríficos inferiores del biocombustible E5 utilizado en la experimentación y los combustibles comerciales de uso en Ecuador no son significativas. Esto sugiere la idoneidad del uso del biocombustible E5 en condiciones reales de operación en motores de combustión interna.

En su estudio sobre la producción de bioetanol a partir de una mezcla de productos agrícolas, Mansouri et al. (2016) llevaron a cabo una caracterización exhaustiva del bioetanol obtenido de una biomasa compuesta por varios jugos dátil mech degla y uva, con un contenido inicial de aproximadamente 15,95°Brix. Utilizando la levadura *Saccharomyces cerevisiae* en el proceso de fermentación, lograron obtener un bioetanol con un 99% V/V de pureza. Este enfoque de investigación se alinea con el presente estudio, donde se caracteriza el bioetanol obtenido de las mezclas E0 y E5, similar a la metodología aplicada en el caso del mucílago del cacao. La mezcla E0 inicialmente presenta un octanaje de 94 RON, y tras la caracterización de la mezcla E5, se observa un aumento significativo del octanaje, alcanzando los 96,40 RON[197]. Estos resultados corroboran la tendencia identificada en la experimentación realizada con el biocombustible E5 obtenido del mucílago del cacao, donde se observa un notable incremento en el octanaje de las mezclas E5, destacando la influencia positiva de la incorporación de bioetanol en la calidad del combustible.

Como se ha destacado anteriormente, la mezcla E5, derivada del bioetanol obtenido del mucílago del cacao, cumple rigurosamente con todos los parámetros establecidos por la norma INEN 935. Este cumplimiento asegura su idoneidad como combustible comercial para su uso en vehículos automotores en Ecuador. La Tabla 72 presenta una comparación detallada de varios factores contemplados en la mencionada norma, contrastando los resultados obtenidos en este estudio con los de Mansouri et al. (2016). No se observan diferencias significativas entre los biocombustibles comparados, resaltando la consistencia y calidad del biocombustible E5 producto del bioetanol del mucílago del cacao, en relación con estándares internacionales.

Tabla 117 Comparación de características de mezclas E5 [197]

ENSAYO	MUCÍLAGO DEL CACAO	JUGOS DE UVA	UNIDAD
Punto Final	210	171	°C
Residuo	1.01	0.99	%
Presión de vapor Ried	56,01	77	kPa
Corrosión a la lámina de cobre	1 <sup>a</sup>	1 <sup>a</sup>	-----
Contenido de azufre	0,059	0,015	%
Contenido de gomas	3	3	Mg/10'0ml

Schifter, I et al. (2011), en su investigación sobre el comportamiento de la combustión y las emisiones de mezclas de etanol y gasolina en un motor de cilindro único, llevó a cabo la caracterización de la mezcla E6[198]. La Tabla 73 detalla la temperatura de evaporación del biocombustible E5, obtenido a partir del mucílago del cacao, en comparación con las propiedades del biocombustible E6 según el estudio mencionado.

Tabla 118 Comparación de temperaturas de evaporación de mezclas E5 y E6[198]

ENSAYO	E5 MUCÍLAGO DEL CACAO	E6 PROMEDIO
Temperatura 10°	54,1	61,3
Temperatura 50°	107	109,6
Temperatura 90°	164	161,2

La Tabla 118 revela que las temperaturas de evaporación a 10,50 y 90 °C en la caracterización de la mezcla E5, derivada del mucílago del cacao, muestran similitudes notables con el biocombustible E6, del estudio de Schifter, et al. (2011). Esta consistencia fortalece la confiabilidad de los datos obtenidos en la experimentación.

La investigación incluyó pruebas estáticas a 700 y 2500 rpm en los vehículos Hyundai i10 2021 y Chevrolet Optra 2006. Se llevaron a cabo tres pruebas con los

combustibles convencionales de comercialización y el biocombustible E5 derivado del tratamiento bioquímico del mucílago del cacao, de las tres pruebas se calculó un promedio, los resultados de este promedio se presentan a continuación,

### **Monóxido de Carbono CO.**

En las emisiones de monóxido de carbono CO a 700 y 2500 rpm, en la experimentación en los vehículos escogidos para la investigación entrego en promedio los siguientes resultados:

Tabla 119 Resultado de promedio de emisiones 700 rpm de CO Hyundai i10 2021

<b>Promedio General CO (% vol.)</b>			
<b>Ralentí acelerado a 700 rpm</b>			
<b>Tiempo</b>	<b>Extra</b>	<b>Super</b>	<b>Biocombustible</b>
0	0,7	0	0
1	0,7	0	0
2	0,7	0	0
3	0,7	0	0
4	0,8	0	0
5	0,8	0	0
6	0,8	0	0
7	0,8	0	0
8	0,8	0	0,1
9	0,8	0	0,1
10	0,6	0	0,1
11	0,6	0	0,1
12	0,7	0	0
13	0,8	0,1	0
14	0,8	0,1	0
15	0,8	0,1	0
16	0,8	0,1	0
17	0,8	0,1	0
18	0,8	0,1	0,1
19	0,8	0,1	0,2
20	0,9	0,1	0,3
21	0,9	0,1	0,4
22	0,9	0	0,5
23	0,7	0	0,5
24	0,6	0	0,5
25	0,7	0	0,6
26	0,7	0	0,7
27	0,8	0	0,8
28	0,9	0	0,9
29	0,9	0	0,9
30	1,1	0	0,9

Figura 62 Promedio de emisiones de CO 700 rpm Hyundai i10 2021

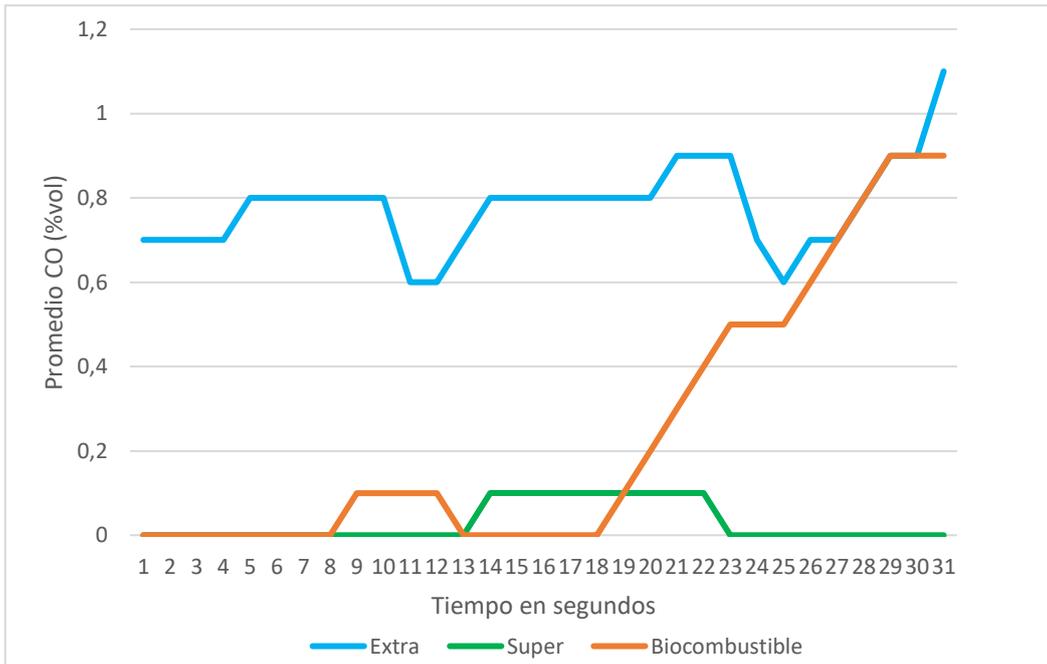


Tabla 120 Resultado de promedio de emisiones 700 rpm de CO Chevrolet Optra 2006

<b>Promedio General CO (% vol.)</b>			
<b>Ralentí acelerado a 700 rpm</b>			
<b>Tiempo</b>	<b>Extra</b>	<b>Super</b>	<b>Biocombustible</b>
0	0,3	0,3	0,3
1	0,3	0,3	0,3
2	0,3	0,3	0,3
3	0,3	0,3	0,3
4	0,3	0,3	0,3
5	0,3	0,3	0,3
6	0,3	0,3	0,3
7	0,3	0,3	0,3
8	0,3	0,3	0,3
9	0,3	0,3	0,3
10	0,3	0,3	0,3
11	0,3	0,3	0,3
12	0,3	0,3	0,3
13	0,3	0,3	0,3
14	0,3	0,3	0,3
15	0,3	0,3	0,3
16	0,3	0,3	0,3
17	0,3	0,3	0,4
18	0,3	0,3	0,4
19	0,3	0,3	0,4
20	0,3	0,3	0,4
21	0,3	0,3	0,4
22	0,3	0,3	0,4
23	0,4	0,3	0,4
24	0,4	0,3	0,3
25	0,4	0,3	0,3
26	0,4	0,3	0,3
27	0,3	0,3	0,3
28	0,3	0,3	0,3
29	0,3	0,3	0,3
30	0,3	0,3	0,3

Figura 63 Emisiones 700 rpm de CO Chevrolet Optra 2006

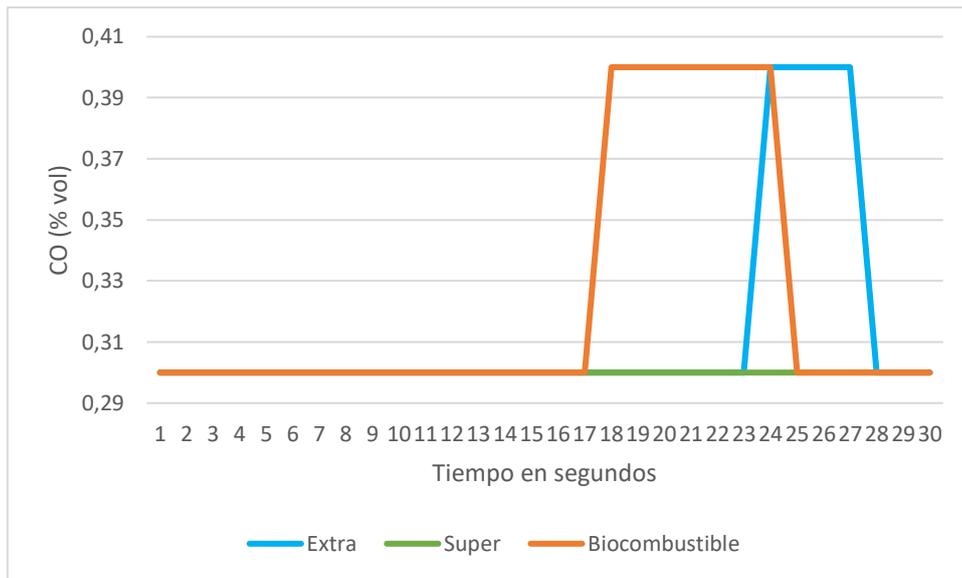


Tabla 121 Resultado de promedio de emisiones 2500 rpm de CO Hyundai i10 2021

<b>Promedio General CO (% vol.)</b>			
<b>Ralentí acelerado a 2500 rpm</b>			
<b>Tiempo</b>	<b>Extra</b>	<b>Super</b>	<b>Biocombustible</b>
0	1,2	0	0,6
1	1,1	0,1	0,6
2	1,1	0,1	0,6
3	1,2	0,1	0,5
4	1,2	0,1	0,5
5	1,2	0,1	0,4
6	1,3	0,1	0,4
7	1,3	0,1	0,4
8	1,4	0	0,3
9	1,4	0	0,3
10	1,4	0	0,3
11	1,4	0	0,3
12	1,4	0,1	0,3
13	1,5	0,1	0,3
14	1,7	0,1	0,3
15	1,7	0,1	0,3
16	1,9	0,1	0,3
17	2	0,1	0,3
18	2	0,1	0,3
19	2	0,1	0,3
20	1,9	0,1	0,3
21	1,9	0,1	0,3
22	1,9	0,1	0,3
23	1,6	0,1	0,2
24	1,5	0,1	0,2
25	0,9	0,1	0,2
26	0,7	0,1	0,2
27	0,7	0,1	0,1
28	0,7	0,1	0,1
29	0,7	0,1	0,2
30	0,7	0,1	0,2

Figura 64 Promedio de emisiones de CO 2500 rpm Hyundai i10 2021

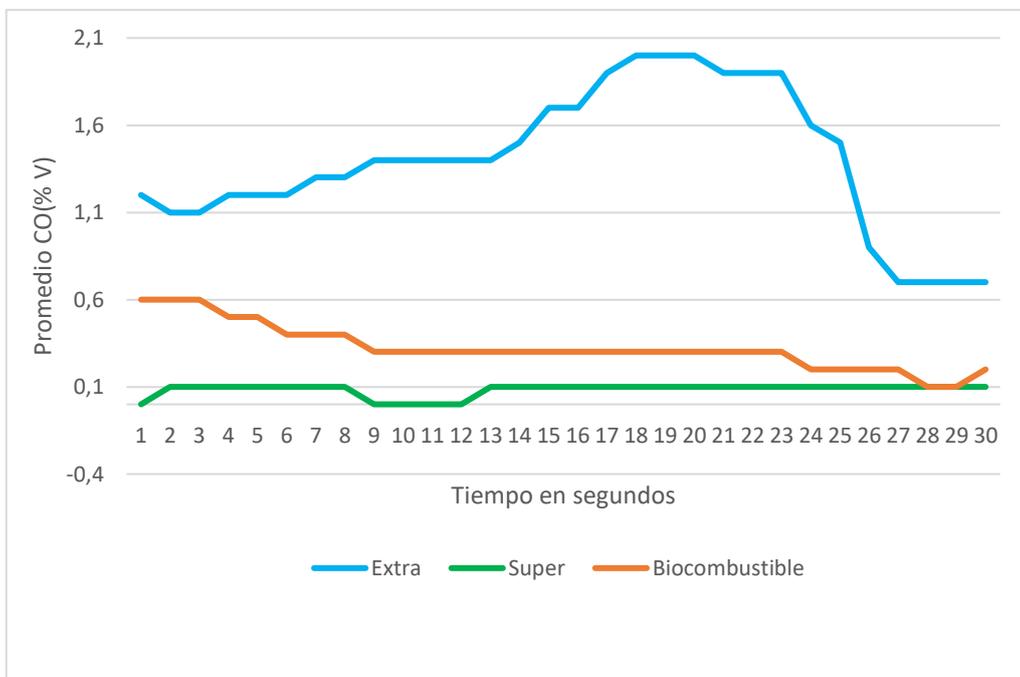
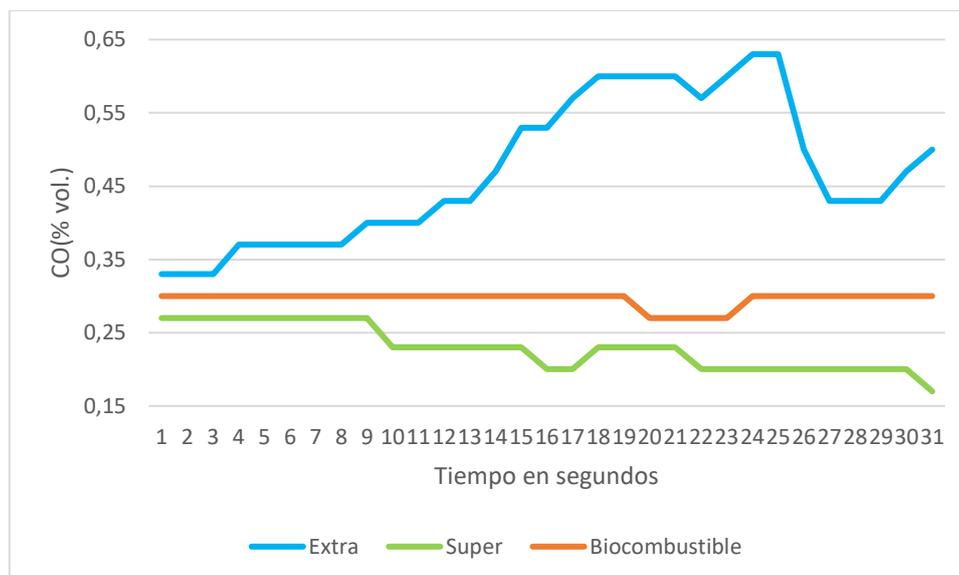


Tabla 122 Resultado de promedio de emisiones 2500 rpm de CO Chevrolet Optra 2006

<b>Promedio General CO (% vol.)</b>			
<b>Ralentí acelerado a 2500 rpm</b>			
<b>Tiempo</b>	<b>Extra</b>	<b>Super</b>	<b>Biocombustible</b>
0	0,33	0,27	0,3
1	0,33	0,27	0,3
2	0,33	0,27	0,3
3	0,37	0,27	0,3
4	0,37	0,27	0,3
5	0,37	0,27	0,3
6	0,37	0,27	0,3
7	0,37	0,27	0,3
8	0,4	0,27	0,3
9	0,4	0,23	0,3
10	0,4	0,23	0,3
11	0,43	0,23	0,3
12	0,43	0,23	0,3
13	0,47	0,23	0,3
14	0,53	0,23	0,3
15	0,53	0,2	0,3
16	0,57	0,2	0,3
17	0,6	0,23	0,3
18	0,6	0,23	0,3
19	0,6	0,23	0,27
20	0,6	0,23	0,27
21	0,57	0,2	0,27
22	0,6	0,2	0,27
23	0,63	0,2	0,3
24	0,63	0,2	0,3
25	0,5	0,2	0,3
26	0,43	0,2	0,3
27	0,43	0,2	0,3
28	0,43	0,2	0,3
29	0,47	0,2	0,3
30	0,5	0,17	0,3

Figura 65 Emisiones 2500 rpm de CO Chevrolet Optra 2006



En las Tablas 119 y 120 y Figuras 62 y 63, que presentan las mediciones realizadas tanto al Chevrolet Optra 2006 como al Hyundai i10 2021 durante el ralentí a 700 rpm, se observa una marcada dispersión en los datos. Estos resultados, caracterizados por su variabilidad, no permiten derivar conclusiones significativas sobre las tendencias de las emisiones de Monóxido de Carbono (CO) en estos vehículos a bajas revoluciones. Sin embargo, al contrastar estos datos con las Tablas 121 y 122 junto con las Figuras 64 y 65 correspondientes a mediciones efectuadas a 2500 rpm, se evidencian claramente las tendencias de los combustibles evaluados.

En el vehículo Hyundai i10, el Biocombustible E5 muestra consistentemente las emisiones más bajas de CO en comparación con la gasolina Extra en la mayoría de los intervalos de tiempo. A medida que avanza el tiempo de prueba, se observa una tendencia a la disminución de las emisiones de CO para todos los combustibles, siendo el Biocombustible el que mantiene las emisiones más bajas, casi acercándose a las emisiones de la gasolina Super de 92 octanos RON, que es de mejor calidad que los otros combustibles comparados en la investigación.

En el Chevrolet Optra 2006, similar al Hyundai i10 2021, el Biocombustible también exhibe emisiones más bajas de CO en comparación con Extra en la

mayoría de los intervalos de tiempo. A medida que avanza el tiempo de prueba, se observa una tendencia general a la disminución de las emisiones de CO para todos los combustibles, con el Biocombustible manteniendo emisiones más bajas, casi acercándose a las emisiones de la gasolina super, de mejor calidad.

Aunque los modelos y años de los vehículos son diferentes, la adopción de Biocombustible muestra una clara tendencia a reducir las emisiones de CO en ambos casos aproximadamente al 3%. Esta consistencia respalda la eficacia del Biocombustible como una opción más sostenible en términos de emisiones de gases contaminantes.

En el estudio de Kothare et al. (2023) sobre la mejora del rendimiento y la reducción de emisiones de CO y HC en un motor de encendido por chispa con relación de compresión variable, utilizando n-pentanol como aditivo de combustible, se llevaron a cabo pruebas estáticas con diversos combustibles en un motor Crompton Greaves, Modelo MK-25 Gasolina de cuatro tiempos, monocilíndrico, refrigerado por aire, con una potencia de 2,5 kW, relación de compresión (C.R.) de 2,5–9, velocidad de 3000 rpm y cilindrada de 256 cc. Durante las pruebas con la mezcla E5, el promedio de monóxido de carbono (CO) fue registrado en un 2,5% V[199].

Comparativamente, se encontraron resultados similares en la investigación del biocombustible obtenido del mucílago del cacao, donde el promedio de emisiones de CO en las pruebas estáticas se situó en el 3%. Es importante destacar que la comparación se realizó con un estudio que no especifica el origen del bioetanol utilizado para obtener el 5% de la mezcla E5. No obstante, se precisa que las propiedades de la gasolina Petrol de la India, utilizada en el estudio de Kothare et al. 2023, es de 96 octanos RON, mientras que en la experimentación con el biocombustible del mucílago del cacao se empleó una gasolina de 85 octanos RON. La ligera diferencia del 0,5% entre ambos estudios se atribuye a las distintas características de la gasolina utilizada en cada experimento.

### **Emisiones de Hidrocarburos HC.**

Las emisiones de hidrocarburos (HC) a 700 y 2500 rpm durante la experimentación con los vehículos obtuvieron los siguientes resultados promedio:

*Tabla 123 Resultado de promedio de emisiones 700 rpm de HC Hyundai i10 2021*

<b>Promedio General HC ppm</b>			
<b>Ralentí acelerado a 700 rpm</b>			
<b>Tiempo</b>	<b>Extra</b>	<b>Super</b>	<b>Biocombustible</b>
<b>0</b>	232	47	51
<b>1</b>	235	47	51
<b>2</b>	235	47	53
<b>3</b>	236	47	53
<b>4</b>	237	49	53
<b>5</b>	240	50	55
<b>6</b>	244	50	55
<b>7</b>	248	51	55
<b>8</b>	250	53	56
<b>9</b>	253	54	57
<b>10</b>	256	54	57
<b>11</b>	262	55	57
<b>12</b>	266	55	59
<b>13</b>	267	57	59
<b>14</b>	265	57	59
<b>15</b>	267	59	62
<b>16</b>	265	60	62
<b>17</b>	261	60	63
<b>18</b>	256	62	64
<b>19</b>	246	62	65
<b>20</b>	243	63	66
<b>21</b>	244	64	68
<b>22</b>	234	65	75
<b>23</b>	231	67	76
<b>24</b>	234	69	79
<b>25</b>	234	70	81
<b>26</b>	232	70	79
<b>27</b>	232	72	77
<b>28</b>	234	73	76
<b>29</b>	233	75	75
<b>30</b>	218	75	75

Figura 66 Emisiones 700 rpm de HC Hyundai i10 2021

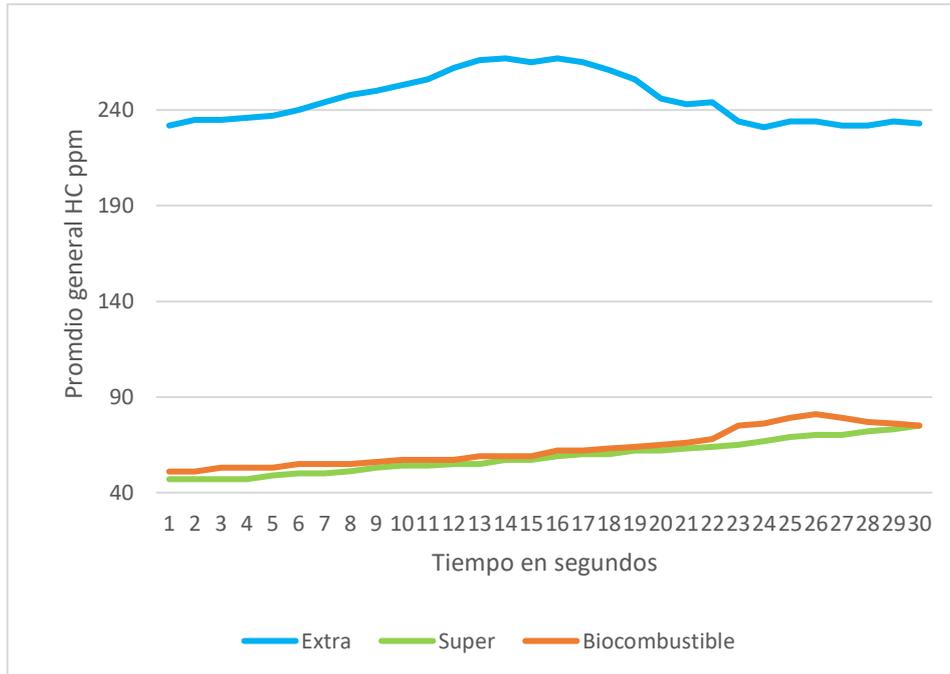


Tabla 124 Resultado de promedio de emisiones 700 rpm de Chevrolet Optra 2006

<b>Promedio General HC ppm</b>			
<b>Ralentí acelerado a 700 rpm</b>			
<b>Tiempo</b>	<b>Extra</b>	<b>Super</b>	<b>Biocombustible</b>
0	265	317	252
1	266	319	250
2	267	323	250
3	268	327	249
4	270	331	249
5	273	334	248
6	275	335	249
7	277	338	249
8	279	344	249
9	281	346	250
10	283	352	251
11	283	357	251
12	285	364	254
13	283	368	255
14	285	375	258
15	279	382	260
16	286	384	264
17	287	390	267
18	295	360	272
19	303	362	278
20	307	365	285
21	321	366	294
22	329	369	305
23	341	377	310
24	352	307	327
25	366	284	334
26	375	281	302
27	385	216	246
28	386	188	188
29	360	187	170
30	348	184	169

Figura 67 Emisiones 700 rpm de HC Chevrolet Optra 2006

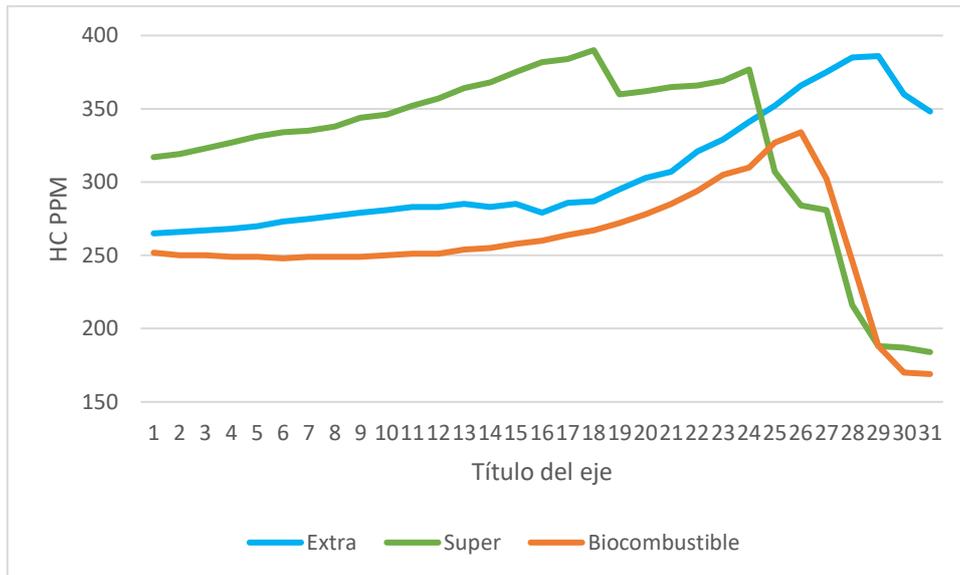


Tabla 125 Resultado de promedio de emisiones 2500 rpm de HC Hyundai i10 2021

<b>Promedio General HC ppm</b>			
<b>Ralentí acelerado a 2500 rpm</b>			
<b>Tiempo</b>	<b>Extra</b>	<b>Super</b>	<b>Biocombustible</b>
<b>0</b>	217	81	64
<b>1</b>	226	81	66
<b>2</b>	228	82	65
<b>3</b>	241	82	64
<b>4</b>	246	82	64
<b>5</b>	267	82	65
<b>6</b>	283	83	65
<b>7</b>	292	83	65
<b>8</b>	318	83	66
<b>9</b>	338	82	65
<b>10</b>	358	83	64
<b>11</b>	377	85	64
<b>12</b>	385	83	63
<b>13</b>	397	83	63
<b>14</b>	431	83	62
<b>15</b>	438	81	62
<b>16</b>	453	81	62
<b>17</b>	467	80	60
<b>18</b>	460	79	59
<b>19</b>	469	79	58
<b>20</b>	480	79	57
<b>21</b>	495	81	57
<b>22</b>	419	81	56
<b>23</b>	416	82	56
<b>24</b>	381	81	54
<b>25</b>	371	78	53
<b>26</b>	365	75	53
<b>27</b>	356	73	50
<b>28</b>	352	71	48
<b>29</b>	350	69	47
<b>30</b>	330	70	47

Figura 68 Emisiones 2500 rpm de HC Hyundai i10 2021

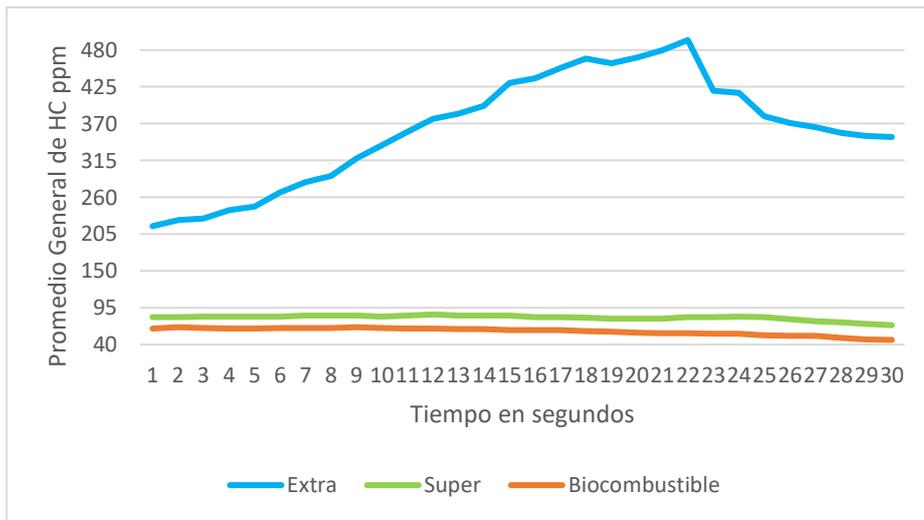
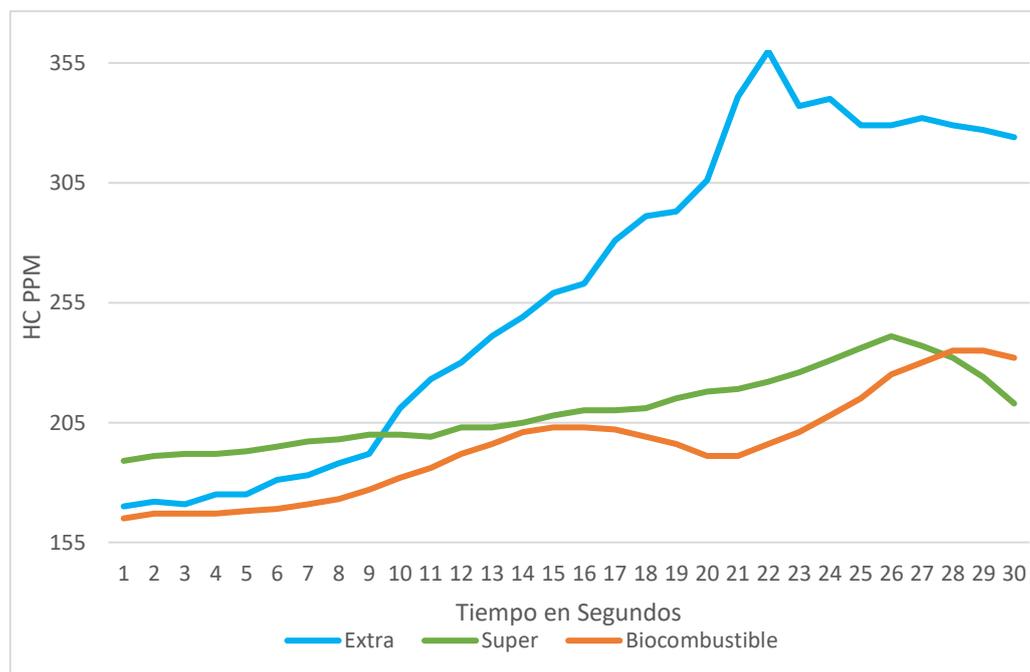


Tabla 126 Resultado de promedio de emisiones 2500 rpm de Chevrolet Optra 2006

<b>Promedio General HC ppm</b>			
<b>Ralentí acelerado a 2500 rpm</b>			
<b>Tiempo</b>	<b>Extra</b>	<b>Super</b>	<b>Biocombustible</b>
0	170	189	165
1	172	191	167
2	171	192	167
3	175	192	167
4	175	193	168
5	181	195	169
6	183	197	171
7	188	198	173
8	192	200	177
9	211	200	182
10	223	199	186
11	230	203	192
12	241	203	196
13	249	205	201
14	259	208	203
15	263	210	203
16	281	210	202
17	291	211	199
18	293	215	196
19	306	218	191
20	341	219	191
21	360	222	196
22	337	226	201
23	340	231	208
24	329	236	215
25	329	241	225
26	332	237	230
27	329	232	235
28	327	224	235
29	324	213	232
30	323	198	225

Figura 69 Emisiones 2500 rpm de HC Chevrolet Optra 2006



En el análisis comparativo de los resultados de emisiones de hidrocarburos (HC) entre los combustibles Extra, Super y biocombustible, se observan tendencias notables en los dos vehículos evaluados a diferentes velocidades del motor (700 rpm y 2500 rpm).

En el Hyundai i10 2021, a 700 rpm, se evidencia que el biocombustible presenta consistentemente valores más bajos de emisiones de HC en comparación de la gasolina Extra y comportamientos similares a los de la gasolina Super. Por otro lado, en el Chevrolet Optra 2006, también a 700 rpm, el biocombustible tiende a mostrar emisiones más bajas de HC frente a la extra, aunque las diferencias son menos pronunciadas que en el Hyundai i10.

Al aumentar la velocidad del motor a 2500 rpm, las diferencias entre los combustibles se acentúan. En el Chevrolet Optra 2006, el biocombustible sigue presentando valores inferiores de emisiones de HC en comparación con los combustibles convencionales, mientras que en el Hyundai i10 2021, las variaciones entre los combustibles son más notorias, siguiendo tendencias similares que a los 700 rpm.

Dhande et al. (2021) investigaron la extracción de bioetanol a partir de residuos de frutos de granada mediante un proceso de fermentación con *Saccharomyces cerevisiae* y destilación fraccionada, similar al utilizado para obtener bioetanol del mucílago del cacao. Este estudio abordó los efectos de las mezclas de biocombustibles en el rendimiento de un motor de un solo cilindro y analizó las variaciones en las emisiones de hidrocarburos (HC) en comparación con la gasolina pura (E0). Los resultados indicaron que las emisiones de HC disminuyen en comparación con el combustible puro, señalando que a medida que aumenta el contenido de etanol, la mezcla se vuelve más homogénea, promoviendo una combustión completa y resultando en niveles más bajos de hidrocarburos. Estas reducciones fueron particularmente significativas a velocidades más bajas, durante el período de superposición[200]. Los datos de emisiones de HC obtenidos de la mezcla E5 en el Chevrolet Optra 2006 y el Hyundai i10 de la investigación reflejaron un comportamiento similar al observado en el estudio citado, corroborando la influencia del contenido de etanol en las emisiones. Además, se destaca que a 700 rpm se registraron emisiones inferiores en comparación con 2500 rpm, en los dos vehículos de la experimentación coincidiendo con las tendencias identificadas en la literatura mencionada.

### **Variación de la Relación Estequiométrica (Lambda)**

Se presentan los datos y análisis de la relación estequiométrica (Lambda) los motores de los vehículos disponibles para la experimentación, a 700 y 2500 rpm con los combustibles convencionales, gasolina super y extra, así como también con el biocombustible E5.

Tabla 127 Lambda a 700 rpm Hyundai i10 2021

<b>Promedio General Lambda</b>			
<b>Ralentí acelerado a 700 rpm</b>			
<b>Tiempo</b>	<b>Extra</b>	<b>Super</b>	<b>Biocombustible</b>
0	0,994	1,309	0,999
1	0,994	1,308	0,999
2	0,994	1,307	0,999
3	0,994	1,306	0,999
4	0,994	1,306	0,999
5	0,995	1,305	0,999
6	0,995	1,305	0,999
7	0,995	1,305	0,999
8	0,995	1,306	0,999
9	0,996	1,307	0,999
10	0,997	1,308	1
11	0,998	1,308	1
12	0,998	1,309	1
13	0,999	1,311	1,001
14	0,999	1,312	1,002
15	1,001	1,316	1,002
16	1,002	1,32	1,003
17	1,004	1,321	1,004
18	1,007	1,326	1,005
19	1,008	1,332	1,006
20	1,01	1,347	1,007
21	1,014	1,36	1,009
22	1,019	1,373	1,012
23	1,025	1,381	1,016
24	1,03	1,392	1,018
25	1,035	1,4	1,022
26	1,038	1,405	1,024
27	1,037	1,391	1,023
28	1,025	1,366	1,021
29	1,019	1,333	1,017
30	0,997	1,301	1,009

Figura 70 Lambda a 700 rpm Hyundai i10 2021

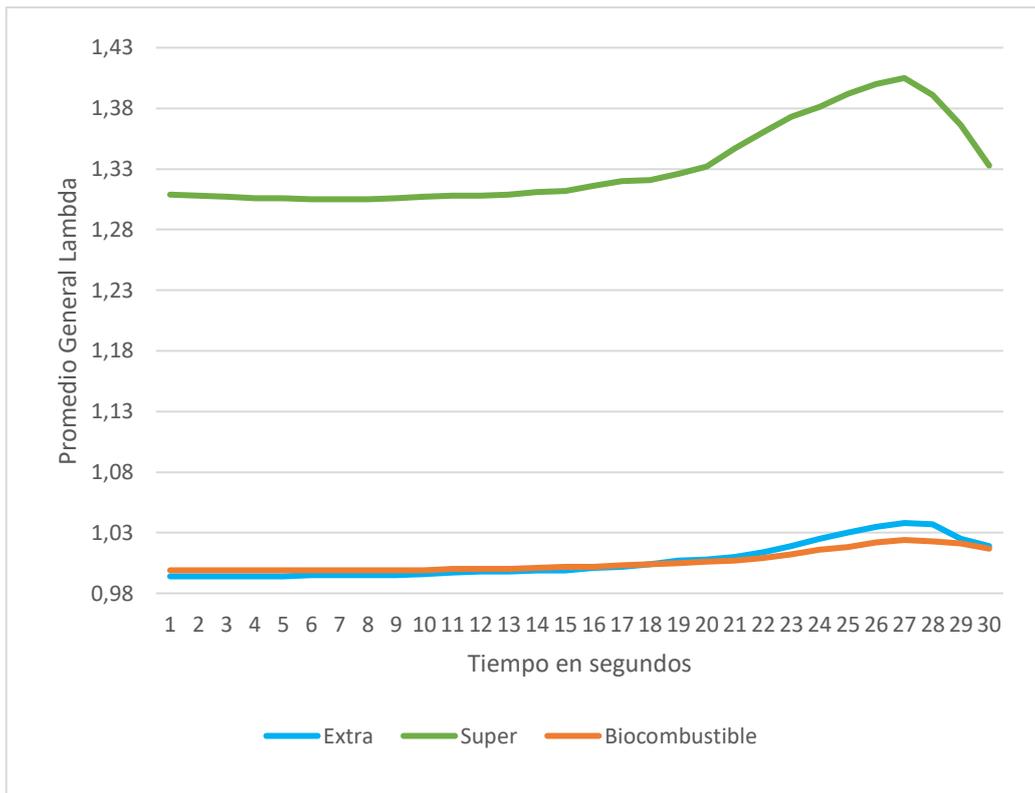


Tabla 128 Lambda a 700 rpm Chevrolet Optra 2006

<b>Promedio General Lambda</b>			
<b>Ralentí acelerado a 700 rpm</b>			
<b>Tiempo</b>	<b>Extra</b>	<b>Super</b>	<b>Biocombustible</b>
<b>0</b>	1,078	1,101	1,067
<b>1</b>	1,079	1,101	1,068
<b>2</b>	1,08	1,104	1,067
<b>3</b>	1,08	1,106	1,067
<b>4</b>	1,082	1,108	1,067
<b>5</b>	1,084	1,109	1,069
<b>6</b>	1,088	1,11	1,07
<b>7</b>	1,094	1,111	1,071
<b>8</b>	1,1	1,114	1,072
<b>9</b>	1,105	1,118	1,072
<b>10</b>	1,108	1,123	1,074
<b>11</b>	1,105	1,13	1,077
<b>12</b>	1,104	1,138	1,082
<b>13</b>	1,098	1,144	1,086
<b>14</b>	1,094	1,151	1,09
<b>15</b>	1,091	1,181	1,095
<b>16</b>	1,092	1,2	1,1
<b>17</b>	1,094	1,222	1,106
<b>18</b>	1,099	1,226	1,116
<b>19</b>	1,103	1,24	1,124
<b>20</b>	1,108	1,249	1,136
<b>21</b>	1,113	1,235	1,154
<b>22</b>	1,122	1,236	1,179
<b>23</b>	1,132	1,252	1,208
<b>24</b>	1,147	1,267	1,254
<b>25</b>	1,171	1,288	1,302
<b>26</b>	1,2	1,297	1,331
<b>27</b>	1,239	1,265	1,336
<b>28</b>	1,269	1,223	1,323
<b>29</b>	1,295	1,186	1,286
<b>30</b>	1,307	1,156	1,197

Figura 71 Lambda a 700 rpm Chevrolet Optra 2006

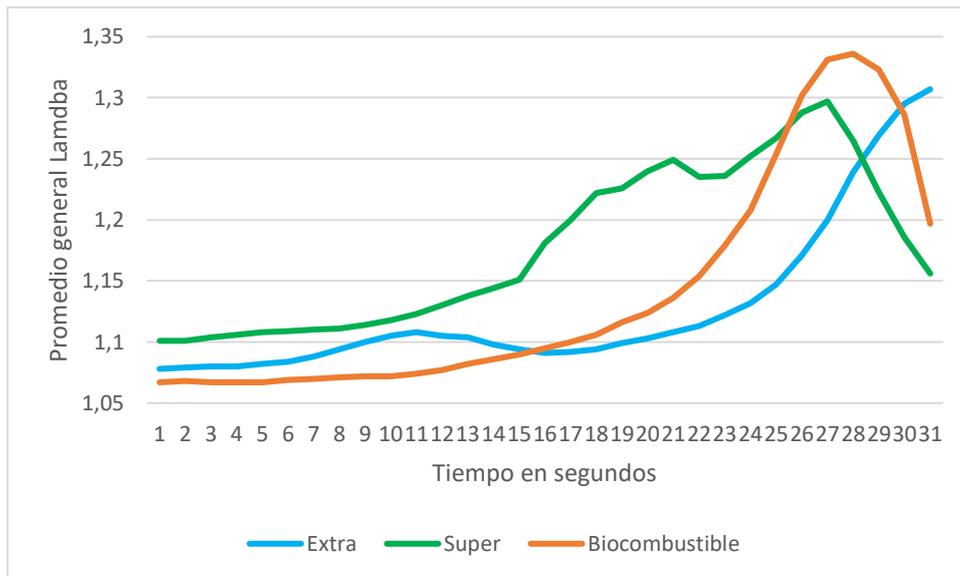


Tabla 129 Lambda a 2500 rpm Hyundai i 10 2021

<b>Promedio General Lambda</b>			
<b>Ralentí acelerado a 2500 rpm</b>			
<b>Tiempo</b>	<b>Extra</b>	<b>Super</b>	<b>Biocombustible</b>
0	0,987	1,256	0,992
1	0,987	1,257	0,992
2	0,987	1,259	0,993
3	0,987	1,26	0,994
4	0,987	1,261	0,995
5	0,987	1,265	0,995
6	0,991	1,271	0,996
7	0,988	1,28	0,998
8	0,989	1,291	0,998
9	0,989	1,301	0,999
10	0,99	1,311	1
11	0,991	1,318	1,001
12	0,991	1,321	1,002
13	0,992	1,314	1,004
14	0,994	1,3	1,006
15	0,995	1,287	1,009
16	0,999	1,289	1,014
17	1,003	1,299	1,019
18	1,007	1,313	1,026
19	1,012	1,322	1,039
20	1,021	1,325	1,044
21	1,034	1,325	1,054
22	1,055	1,315	1,065
23	1,062	1,307	1,079
24	1,071	1,307	1,096
25	1,078	1,317	1,12
26	1,074	1,33	1,149
27	1,065	1,351	1,186
28	1,06	1,372	1,228
29	1,07	1,394	1,292
30	1,09	1,415	1,382

Figura 72 Lambda a 2500 rpm Hyundai i 10 2021

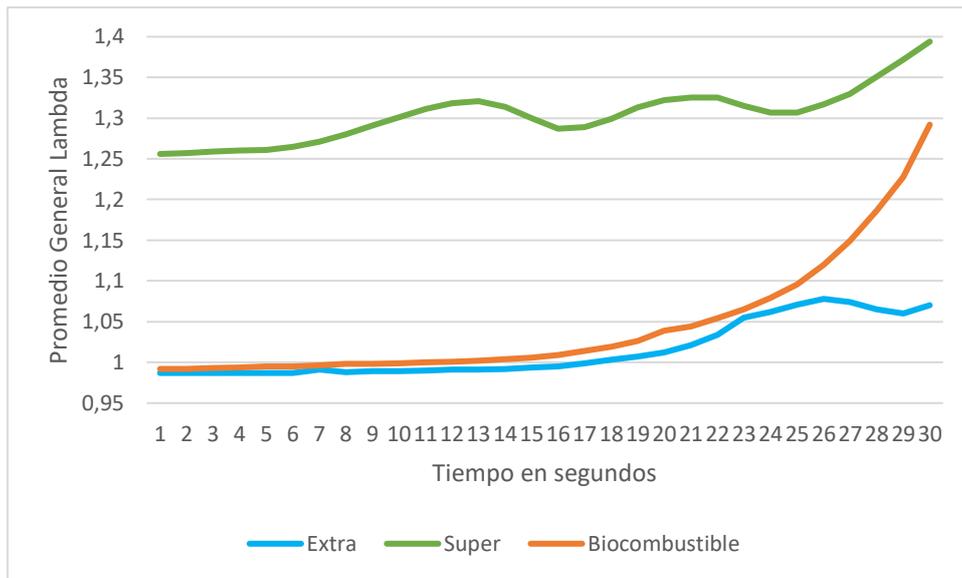
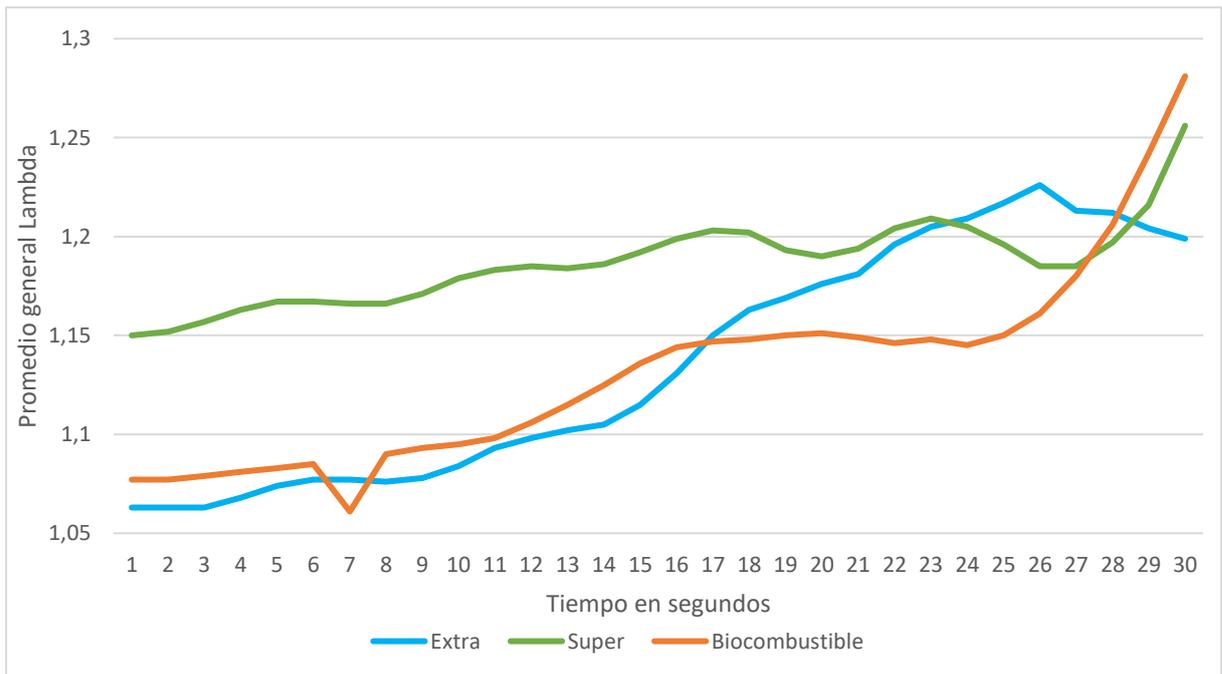


Tabla 130 Lambda a 2500 rpm Chevrolet Optra 2006

<b>Promedio General Lambda</b>			
<b>Ralentí acelerado a 2500 rpm</b>			
<b>Tiempo</b>	<b>Extra</b>	<b>Super</b>	<b>Biocombustible</b>
0	1,063	1,15	1,077
1	1,063	1,152	1,077
2	1,063	1,157	1,079
3	1,068	1,163	1,081
4	1,074	1,167	1,083
5	1,077	1,167	1,085
6	1,077	1,166	1,061
7	1,076	1,166	1,09
8	1,078	1,171	1,093
9	1,084	1,179	1,095
10	1,093	1,183	1,098
11	1,098	1,185	1,106
12	1,102	1,184	1,115
13	1,105	1,186	1,125
14	1,115	1,192	1,136
15	1,131	1,199	1,144
16	1,15	1,203	1,147
17	1,163	1,202	1,148
18	1,169	1,193	1,15
19	1,176	1,19	1,151
20	1,181	1,194	1,149
21	1,196	1,204	1,146
22	1,205	1,209	1,148
23	1,209	1,205	1,145
24	1,217	1,196	1,15
25	1,226	1,185	1,161
26	1,213	1,185	1,18
27	1,212	1,197	1,206
28	1,204	1,216	1,242
29	1,199	1,256	1,281
30	1,196	1,299	1,338

Figura 73 Lambda a 2500 rpm Chevrolet Optra 2006



Al comparar las tendencias de la relación estequiométrica (Lambda) en ambos vehículos a 700 rpm, se observa que el Hyundai i10 2021 presenta valores promedio consistentes y muy cercanos a 1 para todos los combustibles, indicando una combustión estequiométrica. En cambio, el Chevrolet Optra 2006 muestra valores ligeramente por encima de 1 en todas las variantes de combustible, sugiriendo una ligera tendencia hacia una mezcla más pobre en comparación con el Hyundai.

Al analizar las tendencias a 2500 rpm, se evidencia que, para el Hyundai i10 2021, el biocombustible tiende a incrementar la relación estequiométrica en comparación con el combustible extra. En el caso del Chevrolet Optra 2006, se observa un aumento general en los valores de Lambda a mayores rpm, siendo más notorio con el biocombustible. Esto podría señalar una mayor proporción de aire en la mezcla y un comportamiento de combustión más homogéneo a velocidades más altas.

Los resultados revelan un comportamiento consistente en todas las curvas: Lambda se aproxima a 1 en el caso del biocombustible, mientras que se mantiene significativamente elevado para la gasolina Extra. Esta tendencia indica una

combustión más eficiente con el biocombustible, incluso en el vehículo Hyundai i10 a diferentes velocidades. Cabe destacar que el valor de Lambda del biocombustible se aproxima al de la gasolina Súper, la cual, como se mencionó en apartados previos, presenta una mayor eficiencia.

Salazar (2018), en su investigación sobre el comportamiento de mezclas de gasolina y etanol en un motor de encendido por chispa y sus efectos en las emisiones, concluye que varias combinaciones de naftas con bioetanol, incluida la E5, presentan una variación en la relación estequiométrica lambda cercana a 1. Este valor indica que las relaciones aire-combustible, al utilizar biocombustibles, se acercan a la óptima[201]. Resultados similares se obtienen en la experimentación con la mezcla E5 derivada del mucílago del cacao, especialmente en el Hyundai i10 modelo 2021. Sin embargo, en el Chevrolet Optra 2006 con todos los combustibles, se observan valores superiores a los esperados, los cuales serán analizados en comparación con la normativa ecuatoriana.

### **Dióxido de carbono CO<sub>2</sub>.**

En el análisis de emisiones de CO<sub>2</sub>, se examinará la cantidad de dióxido de carbono emitida por los vehículos Hyundai i10 2021 y Chevrolet Optra 2006 en condiciones de ralentí acelerado a 700 rpm y 2500 rpm. Se evaluarán las variaciones en las emisiones de CO<sub>2</sub> para diferentes tipos de combustibles, incluyendo Extra, Super y Biocombustible, a lo largo de un periodo de prueba de 30 segundos. El análisis se centrará en identificar tendencias, patrones y posibles discrepancias en las emisiones de CO<sub>2</sub> entre los dos vehículos y los diferentes tipos de combustibles utilizados.

Tabla 131 Emisiones de CO<sub>2</sub> a 700 rpm Hyundai i10 2021

<b>Promedio General CO<sub>2</sub></b>			
<b>Ralentí acelerado a 700 rpm</b>			
<b>Tiempo</b>	<b>Extra</b>	<b>Super</b>	<b>Biocombustible</b>
0	14,5	11,5	13,6
1	14,5	11,5	13,6
2	14,53	11,4	13,93
3	14,53	11,4	13,93
4	14,53	11,53	13,93
5	14,5	11,57	14,23
6	14,5	11,57	14,27
7	14,5	11,57	14,27
8	14,5	11,43	14,6
9	14,53	11,4	14,6
10	14,53	11,5	14,6
11	14,5	11,5	14,6
12	14,47	11,47	14,9
13	14,47	11,47	14,9
14	14,47	11,43	14,8
15	14,4	11,4	14,77
16	14,4	11,37	14,7
17	14,37	11,37	14,67
18	14,37	11,33	14,57
19	14,3	11,27	14,5
20	14,23	11,1	14,37
21	14,13	10,93	14,27
22	14,1	10,8	14,17
23	14,03	10,9	13,97
24	13,87	11,03	13,9
25	13,77	11,07	13,77
26	13,8	11,1	13,67
27	13,7	11,3	13,83
28	13,63	11,4	13,97
29	13,67	11,6	14,17
30	13,33	11,7	14,33

Figura 74 CO<sub>2</sub> a 700 rpm Hyundai i10 2021

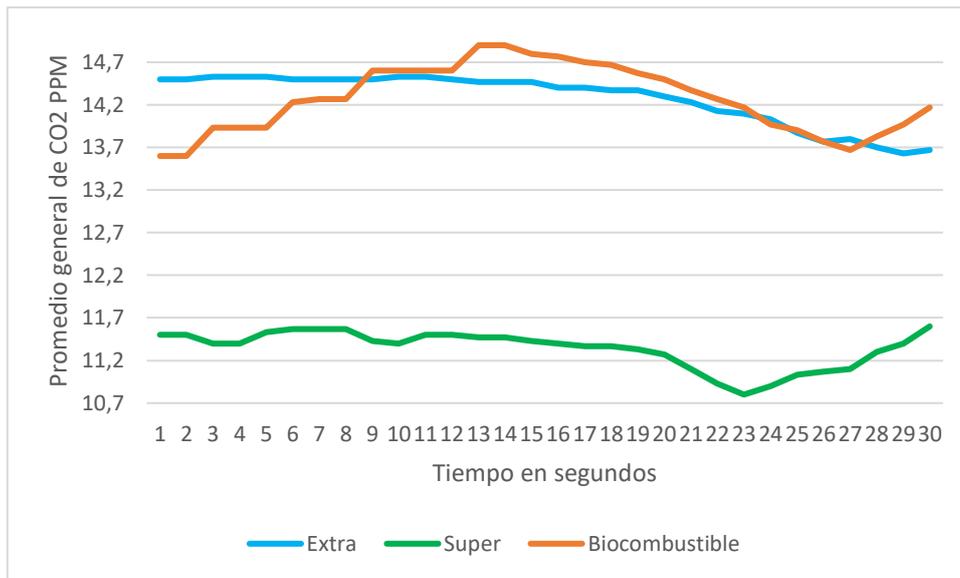


Tabla 132 Emisiones CO<sub>2</sub> a 700 rpm Chevrolet Optra 2006

<b>Promedio General CO<sub>2</sub></b>			
<b>Ralentí acelerado a 700 rpm</b>			
<b>Tiempo</b>	<b>Extra</b>	<b>Super</b>	<b>Biocombustible</b>
0	13,1	12,63	13,27
1	13,1	12,63	13,27
2	13,07	12,53	13,27
3	13,07	12,53	13,27
4	13,03	12,53	13,23
5	12,93	12,5	13,23
6	12,93	12,5	13,23
7	12,87	12,47	13,2
8	12,83	12,4	13,17
9	12,73	12,33	13,17
10	12,73	12,27	13,1
11	12,77	12,17	13,07
12	12,8	12,1	13,03
13	12,87	12,05	12,93
14	12,83	11,83	12,87
15	12,87	11,53	12,83
16	12,83	11,37	12,7
17	12,77	11,2	12,63
18	12,73	11,53	12,5
19	12,63	11,43	12,33
20	12,57	11,23	12,13
21	12,4	11,23	11,9
22	12,27	11,03	11,57
23	12,03	10,73	11,37
24	11,87	11,13	10,8
25	11,57	11,23	10,43
26	11,23	11,2	10,67
27	10,9	11,67	11,37
28	11,23	12,07	12,13
29	10,9	12,2	12,4
30	11,1	12,2	12,53

Figura 75 Emisiones de CO<sub>2</sub> a 700 rpm Chevrolet Optra 2006

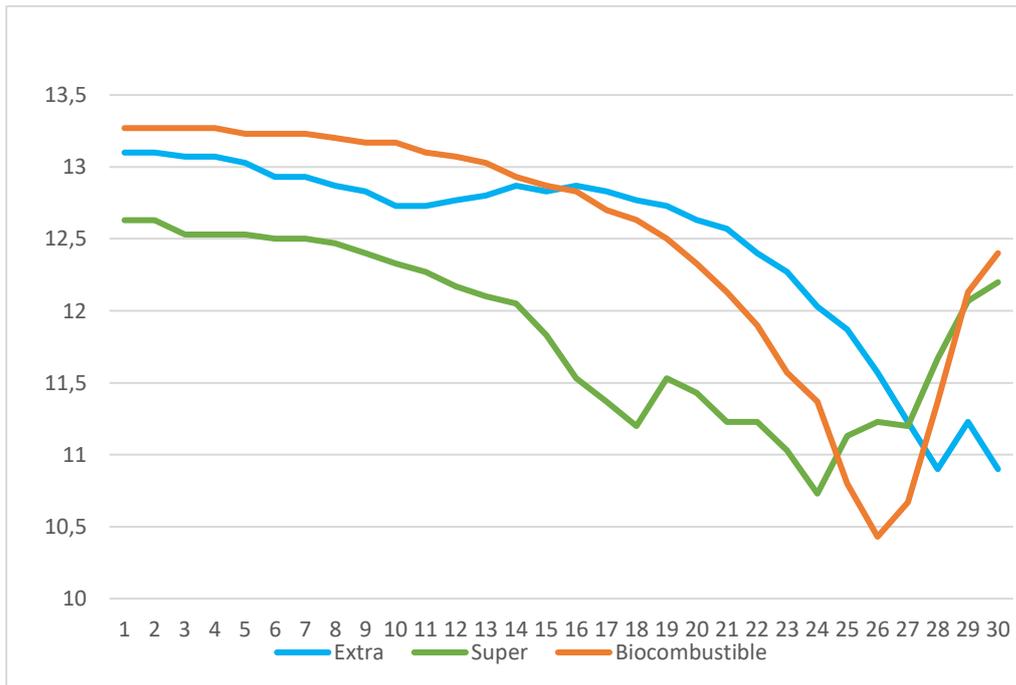


Tabla 133 Emisiones de CO<sub>2</sub> a 2500 rpm Hyundai I10 2021

<b>Promedio General CO<sub>2</sub></b>			
<b>Ralentí acelerado a 2500 rpm</b>			
<b>Tiempo</b>	<b>Extra</b>	<b>Super</b>	<b>Biocombustible</b>
0	14,43	11,97	13,9
1	14,4	11,97	13,93
2	14,4	11,97	14
3	14,4	11,93	14
4	14,4	11,93	13,97
5	14,37	11,87	13,97
6	14,33	11,8	13,97
7	14,33	11,7	13,97
8	14,3	11,63	13,97
9	14,33	11,63	14
10	14,3	11,6	13,93
11	14,23	11,6	13,87
12	14,23	11,57	13,87
13	14,17	11,57	13,83
14	14,1	11,57	13,77
15	14,03	11,67	13,7
16	13,93	11,63	13,6
17	13,87	11,53	13,47
18	13,83	11,4	13,2
19	13,67	11,4	13,2
20	13,57	11,43	13,2
21	13,4	11,43	13,13
22	13,57	11,5	13,1
23	13,53	11,53	13,03
24	13,63	11,47	12,97
25	13,6	11,37	12,77
26	13,53	11,17	12,5
27	13,57	11,07	12,2
28	13,43	10,9	11,9
29	13,47	10,73	11,5
30	12,9	10,6	11,13

Figura 76 Emisiones de CO<sub>2</sub> a 2500 rpm Hyundai I10 2021

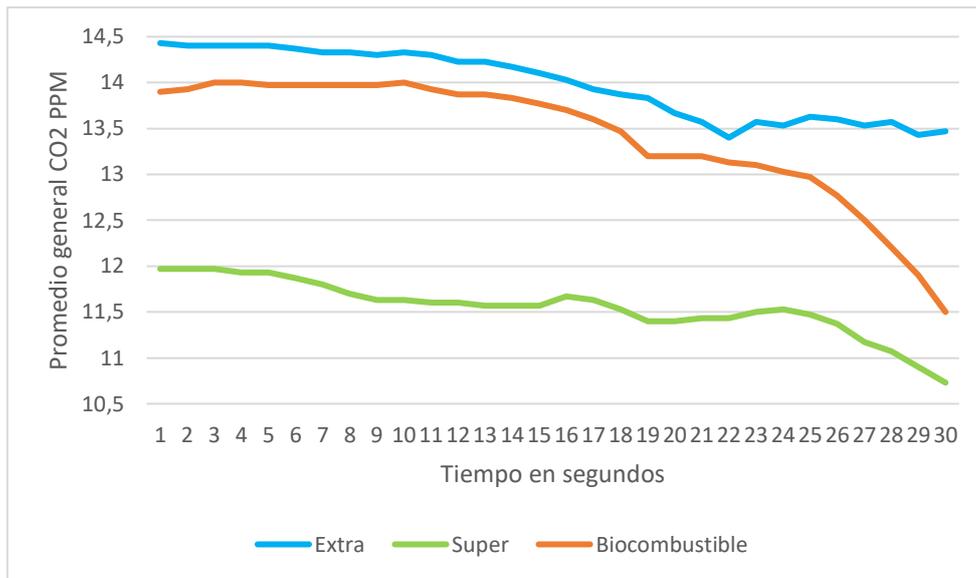
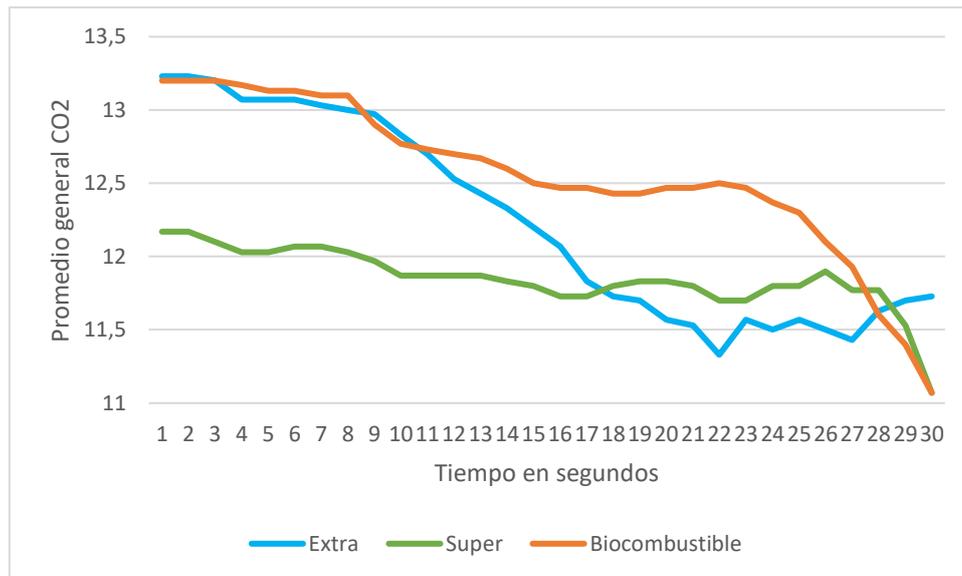


Tabla 134 Emisiones de CO<sub>2</sub> a 2500 rpm Chevrolet Optra 2006

<b>Promedio General CO<sub>2</sub></b>			
<b>Ralentí acelerado a 2500 rpm</b>			
<b>Tiempo</b>	<b>Extra</b>	<b>Super</b>	<b>Biocombustible</b>
0	13,23	12,17	13,2
1	13,23	12,17	13,2
2	13,2	12,1	13,2
3	13,07	12,03	13,17
4	13,07	12,03	13,13
5	13,07	12,07	13,13
6	13,03	12,07	13,1
7	13	12,03	13,1
8	12,97	11,97	12,9
9	12,83	11,87	12,77
10	12,7	11,87	12,73
11	12,53	11,87	12,7
12	12,43	11,87	12,67
13	12,33	11,83	12,6
14	12,2	11,8	12,5
15	12,07	11,73	12,47
16	11,83	11,73	12,47
17	11,73	11,8	12,43
18	11,7	11,83	12,43
19	11,57	11,83	12,47
20	11,53	11,8	12,47
21	11,33	11,7	12,5
22	11,57	11,7	12,47
23	11,5	11,8	12,37
24	11,57	11,8	12,3
25	11,5	11,9	12,1
26	11,43	11,77	11,93
27	11,63	11,77	11,6
28	11,7	11,53	11,4
29	11,73	11,07	11,07
30	11,67	10,5	10,7

Figura 77 Emisiones de CO<sub>2</sub> a 2500 rpm Chevrolet Optra 2006



En las pruebas de emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) a 700 rpm, tanto en el Hyundai i10 2021 como en el Chevrolet Optra 2006, se observa que el Biocombustible E5 tiende a mostrar valores promedio ligeramente superiores en comparación con los combustibles Extra y Super. Este patrón es consistente en ambas marcas de vehículos.

En las pruebas a 2500 rpm, se observa que el Biocombustible E5 tiene mayores valores promedio de emisiones en comparación con la gasolina Extra. En ambos vehículos, se acerca casi al promedio de emisiones de la gasolina Super, sugiriendo que a mayores rpm, las emisiones de CO<sub>2</sub> con el biocombustible tienden a aumentar, alcanzando niveles comparables a los de combustibles de mayor calidad.

Iodice et al. (2018), en la investigación sobre las mezclas de gasolina con etanol y su impacto en el consumo de combustible y las emisiones de motores de encendido por chispa en condiciones de funcionamiento en frío, señalaron que las emisiones de CO<sub>2</sub> en motores reales han sido escasamente investigadas. El estudio concluye que la incorporación de etanol a la gasolina genera una tendencia al alza en las emisiones de este contaminante. Esta elevación se atribuye a la oxidación completa del carbono en el combustible, destacando el mayor calor latente de vaporización del etanol como responsable del aumento en la producción de CO<sub>2</sub>[202]. Los resultados del estudio, llevado a cabo en condiciones de funcionamiento en frío, se corroboran con los datos

a 700 rpm de los dos vehículos en la experimentación, revelando un incremento en las emisiones de CO<sub>2</sub>.

En el análisis comparativo de Hoang et al. (2019) sobre las características de rendimiento y emisiones en un motor de motocicleta de 4 tiempos utilizando biocombustibles y combustibles convencionales, se examinan las mezclas E5, E10 y gasolina de 95 octanos RON. El estudio revela que, en comparación con E5 y la gasolina de 95 octanos RON, el E10 presenta incrementos en las emisiones de CO<sub>2</sub> y E5 mayores emisiones que el combustible convencional analizado[203]. Es importante señalar que estos resultados, obtenidos con las mezclas base E5 y E10 junto con gasolina de 95 octanos RON, se extrapolan al estudio con E5 derivado del mucílago del cacao. A 700 y 2500 rpm, se observan emisiones superiores en comparación con la gasolina extra, aunque no alcanzan los niveles de la gasolina super de 92 octanos RON, que debido a su mejor combustión resulta en menores emisiones, todos estos estudios se encuentran en concordancia con la investigación realizada por Hiesh et al. (2002), quien investigó sobre el rendimiento del motores y emisiones contaminantes utilizando combustibles mezclados con etanol y gasolina, en sus conclusiones sobre el CO<sub>2</sub>, concluyendo que las as emisiones aumentan debido a la mejora de la combustión[204], siendo una tendencia general en todos los estudios comparados a la experimentación realizada con el biocombustible E5.

### **Oxígeno O<sub>2</sub> en las emisiones.**

A continuación, se exponen los análisis de los resultados, detallando los promedios de contenido de oxígeno (O<sub>2</sub>) en los dos combustibles comerciales seleccionados y en la mezcla E5, obtenida del biocombustible a partir del mucílago del cacao.

Tabla 135 O<sub>2</sub> a 700 rpm Hyundai i10 2021

<b>Promedio General O<sub>2</sub></b>			
<b>Ralentí acelerado a 700 rpm</b>			
<b>Tiempo</b>	<b>Extra</b>	<b>Super</b>	<b>Biocombustible</b>
0	0	5,1	0
1	0	5,1	0
2	0	5,1	0
3	0	5	0
4	0	5	0
5	0	5	0
6	0	5	0
7	0	5	0
8	0	5	0,1
9	0	5	0
10	0,1	5,1	0
11	0,1	5,1	0
12	0,1	5,1	0
13	0,1	5,1	0
14	0,1	5,1	0,1
15	0,2	5,1	0,1
16	0,2	5,2	0,1
17	0,2	5,2	0,1
18	0,3	5,3	0,1
19	0,3	5,3	0,2
20	0,4	5,4	0,2
21	0,5	5,6	0,3
22	0,6	5,7	0,3
23	0,7	5,9	0,4
24	0,8	6,2	0,5
25	1	6,3	0,6
26	1,1	6,4	0,6
27	1,1	6,3	0,6
28	1	6	0,6
29	0,8	5,7	0,5
30	0,5	5,4	0,5

Figura 78 O<sub>2</sub> a 700 rpm Hyundai i10 2021

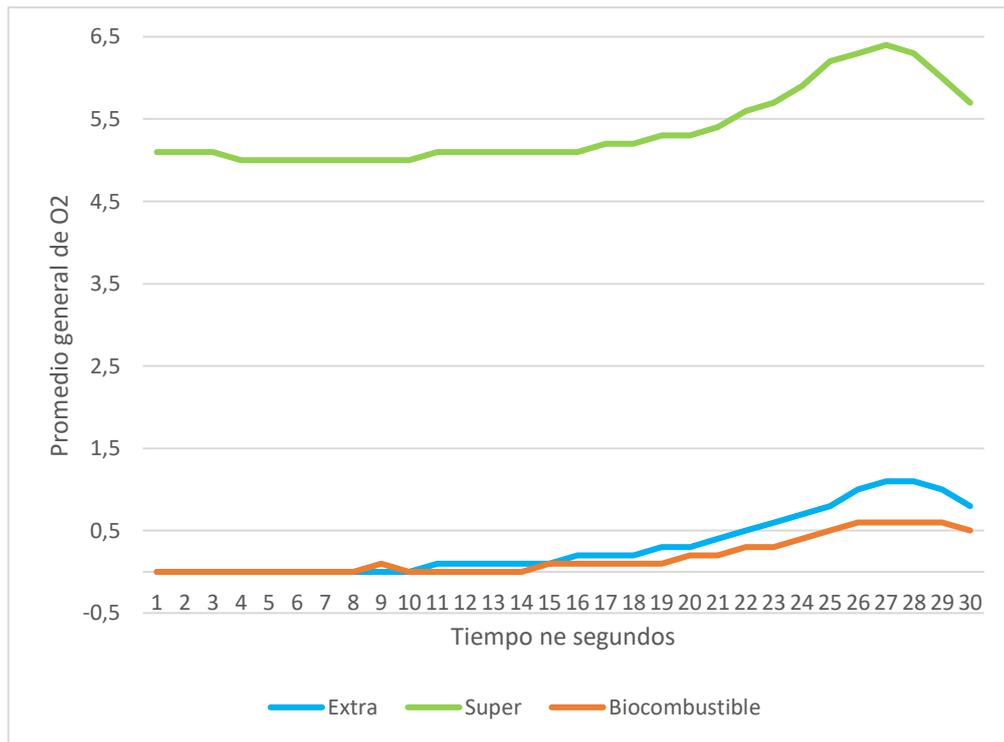


Tabla 136 O<sub>2</sub> a 700 rpm Chevrolet Optra 2006

<b>Promedio General O<sub>2</sub></b>			
<b>Ralentí acelerado a 700 rpm</b>			
<b>Tiempo</b>	<b>Extra</b>	<b>Super</b>	<b>Biocombustible</b>
0	1,9	2,3	1,7
1	1,9	2,3	1,7
2	1,9	2,3	1,7
3	1,9	2,4	1,7
4	2	2,4	1,7
5	2	2,4	1,7
6	2,1	2,5	1,8
7	2,2	2,5	1,8
8	2,2	2,5	1,8
9	2,3	2,6	1,8
10	2,4	2,7	1,8
11	2,4	2,8	1,9
12	2,4	2,8	2
13	2,3	2,9	2,1
14	2,2	3	2,1
15	2,1	3,4	2,2
16	2,2	3,5	2,3
17	2,2	3,8	2,4
18	2,3	4,3	2,5
19	2,4	4,4	2,7
20	2,5	4,6	2,9
21	2,6	4,4	3,2
22	2,7	4,3	3,6
23	2,9	4,5	4
24	3	5	4,4
25	3,4	5,1	5
26	3,9	5,3	5,5
27	4,3	5,2	5,9
28	4,7	4,7	6
29	5,3	3,6	5,6
30	5,3	3,1	4,7

Figura 79 O<sub>2</sub> a 700 rpm Chevrolet Optra 2006

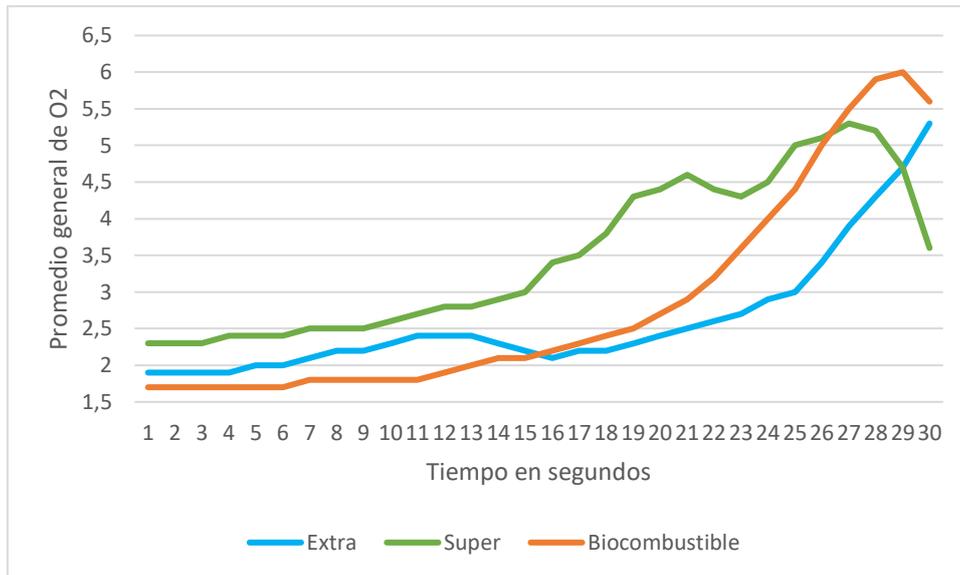


Tabla 137 O<sub>2</sub> a 2500 rpm Hyundai i10 2021

<b>Promedio General O<sub>2</sub></b>			
<b>Ralentí acelerado a 2500 rpm</b>			
<b>Tiempo</b>	<b>Extra</b>	<b>Super</b>	<b>Biocombustible</b>
0	0	4,4	0
1	0	4,4	0
2	0	4,4	0
3	0	4,4	0
4	0,1	4,5	0
5	0,1	4,5	0
6	0,1	4,6	0
7	0,1	4,6	0,1
8	0,1	4,8	0,1
9	0,1	4,9	0,1
10	0,2	5,1	0,1
11	0,2	5,2	0,1
12	0,2	5,3	0,2
13	0,2	5,2	0,2
14	0,3	5	0,3
15	0,4	5	0,3
16	0,4	4,8	0,4
17	0,5	4,8	0,5
18	0,5	5,1	0,7
19	0,7	5,2	0,8
20	0,8	5,3	1
21	1	5,3	1,2
22	1,2	5,2	1,2
23	1,4	5,1	1,6
24	1,5	5	1,9
25	1,5	5,1	2,2
26	1,3	5,3	2,7
27	1	5,5	3,2
28	0,9	5,8	3,7
29	0,9	6	4,4
30	1	6,2	4,8

Figura 80 O<sub>2</sub> a 2500 rpm Hyundai i10 2021

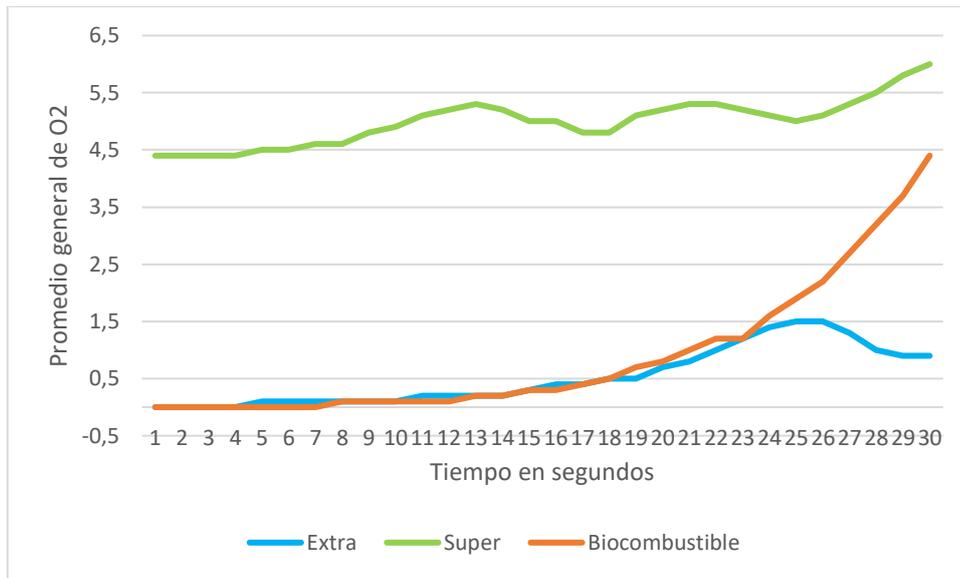


Tabla 138 O<sub>2</sub> a 2500 rpm Chevrolet Optra 2006

<b>Promedio General O<sub>2</sub></b>			
<b>Ralentí acelerado a 2500 rpm</b>			
<b>Tiempo</b>	<b>Extra</b>	<b>Super</b>	<b>Biocombustible</b>
0	1,5	2,9	1,8
1	1,5	3	1,8
2	1,5	3	1,9
3	1,6	3,1	1,9
4	1,6	3,2	1,9
5	1,7	3,2	1,9
6	1,7	3,2	2
7	1,7	3,2	2,1
8	1,7	3,2	2,1
9	1,8	3,3	2,1
10	2	3,4	2,2
11	2	3,5	2,3
12	2,1	3,5	2,4
13	2,1	3,4	2,6
14	2,3	3,5	2,8
15	2,5	3,7	2,9
16	2,8	3,7	2,9
17	2,9	3,7	2,9
18	3	3,7	3
19	3,1	3,6	3
20	3,1	3,5	3
21	3,1	3,6	2,9
22	3,1	3,7	2,9
23	3,2	3,8	2,9
24	3,3	3,7	3
25	3,4	3,7	3,2
26	3,2	3,4	3,4
27	3,5	3,6	3,7
28	3,6	3,8	4,1
29	3,5	4,1	4,5
30	3,5	4,2	4,9

Figura 81 O<sub>2</sub> a 2500 rpm Chevrolet Optra 2006.



A 700 rpm en el Hyundai I10 2021, el biocombustible E5 muestra valores de O<sub>2</sub> cercanos a cero, mientras que los combustibles convencionales Extra y Super presentan valores en torno a 5%. Esto indica una posible reducción en las emisiones de oxígeno con el biocombustible. En el Chevrolet Optra 2006, se observa una tendencia similar, donde el biocombustible E5 tiene valores bajos de O<sub>2</sub>, sugiriendo una mayor eficiencia en la combustión.

A 2500 rpm en ambas pruebas, el biocombustible E5 muestra valores de O<sub>2</sub> significativamente menores en comparación con los combustibles convencionales. Esto podría sugerir una mayor eficiencia de combustión y una menor generación de oxígeno residual, en general, estos resultados sugieren que el biocombustible E5 (cuyo bioetanol fue obtenido del mucílago del cacao) tiene un impacto positivo en la reducción de las emisiones de oxígeno en comparación con los combustibles convencionales, especialmente a mayores rpm.

Mobin et al. (2021), en el artículo de revisión sobre la aplicación de bioetanol/biodiesel en motores de inyección directa y su impacto medioambiental, tras realizar una minuciosa búsqueda en la literatura científica existente, destaca que la presencia de alcoholes en las mezclas de combustibles conlleva a una reducción significativa de las emisiones de diversos gases, incluido el O<sub>2</sub>[205]. Esto

se debe a mejoras sustanciales en el proceso de combustión, respaldando así los hallazgos obtenidos en la experimentación con el biocombustible E5 en el estudio.

### **Análisis de resultados en función de la Normativa Ambiental Ecuatoriana INEN 2204.**

En esta sección, se examinan detalladamente los resultados obtenidos y se contrastan con los estándares establecidos por la normativa ambiental INEN 2204, titulada "Gestión ambiental, aire, vehículos automotores. Límites permitidos de emisiones producidas por fuentes móviles terrestres que utilizan gasolina"[169]. El objetivo es evaluar la viabilidad del biocombustible en relación con los parámetros definidos por las regulaciones del país, considerando la experimentación llevada a cabo en los vehículos seleccionados según su año de fabricación.

Las mediciones de emisiones de monóxido de carbono CO a 700 rpm revelan niveles inicialmente bajos que experimentan una disminución progresiva con el transcurso de los segundos. Por otro lado, al operar a 2500 rpm, se observa un aumento moderado en dichas emisiones. Es crucial destacar que ambas tasas de emisión de CO, tanto a 700 rpm como a 2500 rpm, son notablemente reducidas en comparación con el combustible Extra y se asemejan a las emisiones del combustible Super. Además, es relevante señalar que estos valores se sitúan dentro de los límites establecidos por la normativa INEN 2204.

Los resultados indican una disminución de los valores de emisiones de hidrocarburos HC en el ralentí a 700 rpm en comparación con las emisiones a 2500 rpm. Este fenómeno se atribuye a la reducción progresiva de las emisiones de partes por millón (ppm) de HC con la duración del ralentí. Contrariamente, al acelerar el vehículo, se registra un ligero aumento en las emisiones de HC. Es fundamental destacar que los valores obtenidos se consideran adecuados, ya que se sitúan dentro de los límites establecidos por la normativa INEN 2204.

Los valores de lambda durante el ralentí demuestran que se mantienen dentro de los rangos establecidos, aunque en una ocasión se elevó momentáneamente por encima del nivel especificado, pero rápidamente se estabilizó. En comparación con

las lecturas a 2500 rpm, se destaca, que durante el ralentí, la regulación de lambda se ajusta de manera más eficiente a los rangos establecidos. Es relevante señalar que superó con éxito las pruebas.

En comparación con el combustible Extra, el biocombustible presenta un ligero incremento en las emisiones de CO, un aumento en las emisiones de CO<sub>2</sub>. Por otro lado, se destaca una notable disminución en las emisiones de HC, junto con un incremento en los valores de lambda. Además, se observa una reducción en las emisiones de O<sub>2</sub>. Es importante resaltar que estos resultados cumplen con los parámetros establecidos por las normas INEN 2204

En base a los resultados experimentales y su comparación con la norma INEN 2204, se puede concluir que el biocombustible E5 cumple satisfactoriamente con los parámetros establecidos para las emisiones de CO, HC, CO<sub>2</sub> y O<sub>2</sub> en ambos vehículos estudiados, tanto a 700 rpm como a 2500 rpm.

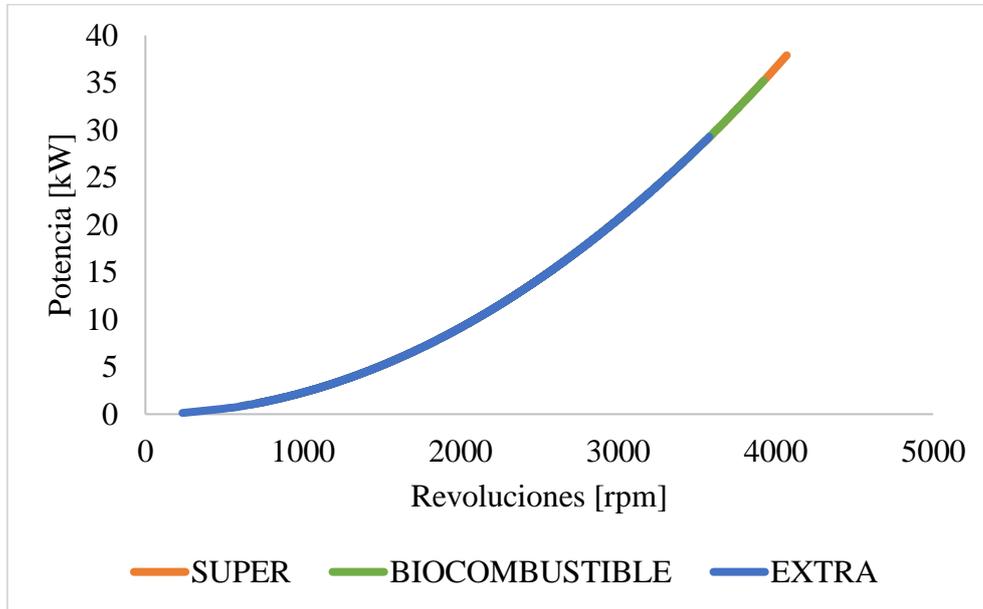
En general, el biocombustible E5 se perfila como una alternativa viable y responsable con el medio ambiente, al cumplir con los estándares de emisiones vehiculares establecidos por la norma INEN 2204.

### **Resultados del análisis energético.**

Los resultados presentados en este análisis se derivan de la experimentación llevada a cabo en la ruta seleccionada, utilizando diversos tipos de combustibles en el vehículo Hyundai i10 2021. Estos ensayos han proporcionado la información detallada que se presenta a continuación.

## Potencia efectiva del motor

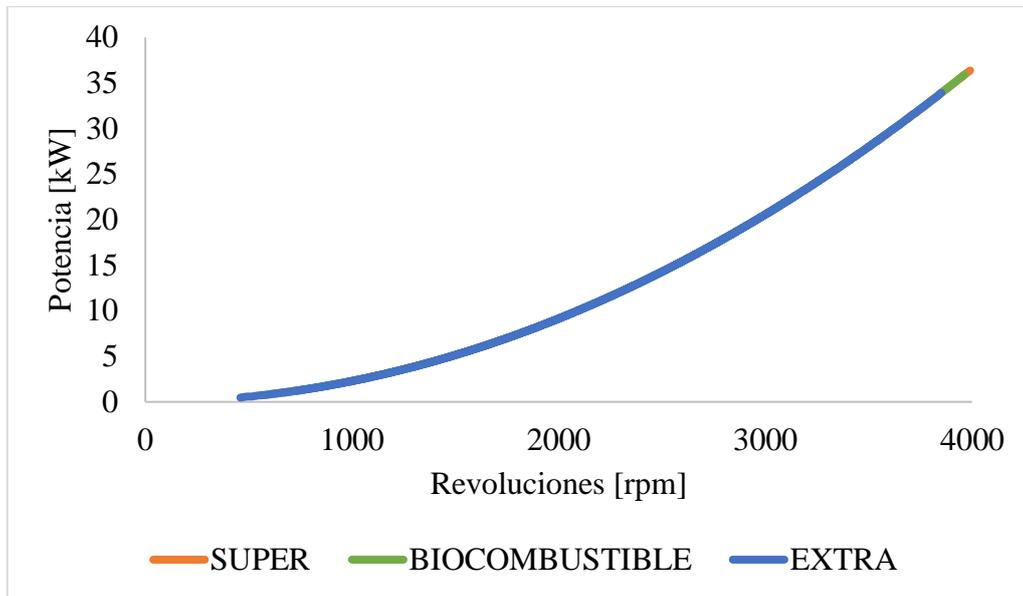
Figura 82 Representación gráfica de la curva de potencia generada por los diferentes combustibles evaluados durante la primera prueba.



La Figura 82 representa la curva de potencia en kW vs rpm del biocombustible en la primera prueba muestra un comportamiento positivo. Se observa un aumento constante de la potencia efectiva del motor a medida que aumenta la velocidad de giro rpm. Este comportamiento se ajusta a lo esperado, ya que, a mayor rpm el motor tiene mayor capacidad para generar potencia.

La potencia inicial del biocombustible en la primera prueba fue de 0,87 kW a 616 rpm en ralentí, mientras que su potencia máxima alcanzó 35,22 kW a 3926 rpm. Estos valores superan a los del combustible Extra, que alcanzó una potencia máxima de 29,29 kW a 3580 rpm. Aunque el combustible Super tuvo una potencia máxima ligeramente superior (37,88 kW a 4071 rpm), la diferencia es mínima. En resumen, el biocombustible ha demostrado un buen desempeño en términos de potencia, similar al combustible Super y superior al Extra.

Figura 83 Representación gráfica de la curva de potencia generada por los diferentes combustibles evaluados durante la segunda prueba.



La figura 83 representa la segunda prueba, la mezcla E5 presentó una potencia inicial de 0,63 kW a 564 rpm en ralentí y una potencia máxima de 35,88 kW a 3963 rpm. Estos valores superaron a los del combustible Extra, que alcanzó una potencia máxima de 33,90 kW a 3852 rpm. Aunque el combustible Super tuvo una potencia máxima ligeramente superior (36,37 kW a 3990 rpm), la diferencia es mínima.

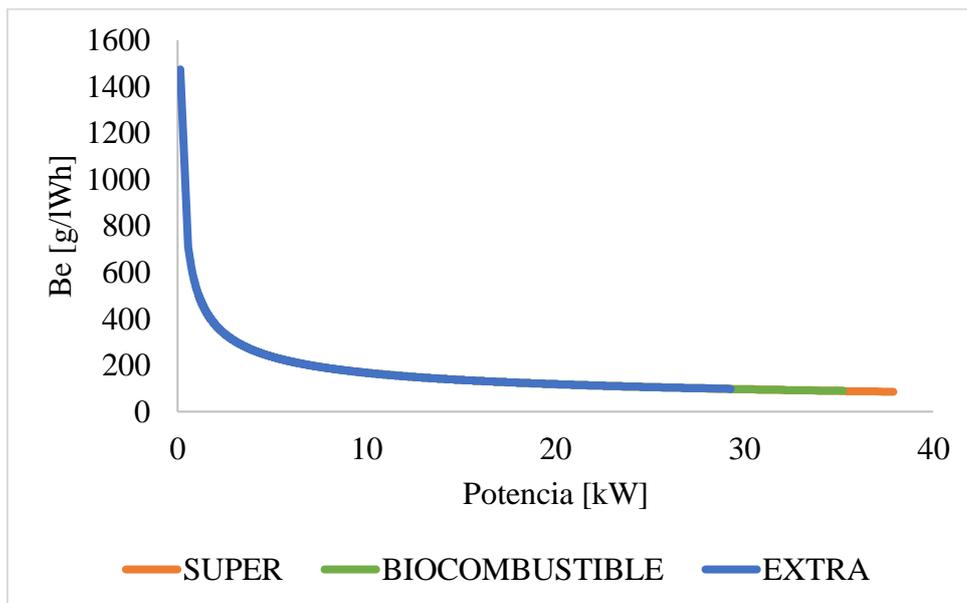
En el estudio sobre la optimización de los parámetros de rendimiento y emisiones en un motor utilizando mezclas de gasolina y etanol, Najafi et al (2015) experimentaron con diversas proporciones de bioetanol, desde E5 hasta E15, aumentando gradualmente el contenido de etanol en un 2,5%. Los resultados indicaron que el incremento en el porcentaje de bioetanol en la mezcla con gasolina resultó en un ligero aumento de la potencia del motor en todas las velocidades evaluadas, este aumento de potencia se atribuyó al incremento en la presión media efectiva indicada para mezclas con mayores contenidos de etanol. Dado que el calor de evaporación del etanol es mayor que el de la gasolina, se logra un enfriamiento más efectivo de la carga de aire y combustible, lo que resulta en una mayor densidad de carga y, por ende, en una potencia de salida superior.

A medida que se incrementa la concentración de bioetanol, se observa un aumento en la densidad de la mezcla y en la eficiencia volumétrica del motor,

generando un aumento adicional en la potencia. Aunque la adición de etanol a la gasolina reduce su poder calorífico, el aumento en la potencia obtenida se explica por los beneficios del etanol como combustible oxigenado, favoreciendo una combustión más completa[206]. Estos hallazgos son consistentes con los resultados obtenidos en la experimentación con el biocombustible E5 del presente estudio, evidenciando un incremento de potencia en comparación con su contraparte de gasolina base (extra 85 octanos RON), lo que respalda la similitud con el estudio comparativo realizado por Najafi et al (2015).

### Consumo de combustible.

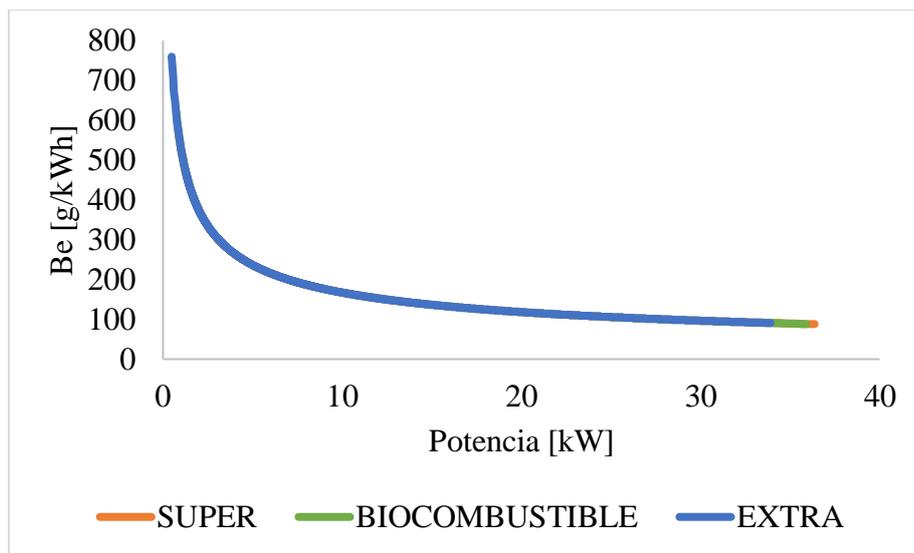
Figura 84 Relación entre el consumo específico de combustible y la potencia para cada tipo de combustible durante la primera prueba.



La figura 84 ilustra la curva de consumo frente a la potencia que representa la cantidad de gramos de combustible que el vehículo consume en relación con sus demandas de potencia. En dicha figura, la curva exhibe una tendencia descendente a medida que la potencia del automóvil aumenta, esto se debe a que, a altas revoluciones, la inercia generada por el motor contribuye a la reducción periódica del consumo de combustible. Se observa que el consumo alcanza aproximadamente 570 g/kWh en el punto de menor potencia, correspondiente al ralentí del motor. Esta curva contrasta

con las curvas de los combustibles super y extra, que muestran consumos máximos de 500,06 g/kWh y 710 g/kWh, respectivamente. Se evidencia una leve disparidad entre el uso del combustible super y el biocombustible empleado.

Figura 85 Relación entre el consumo específico de combustible y la potencia para cada tipo de combustible durante la segunda prueba



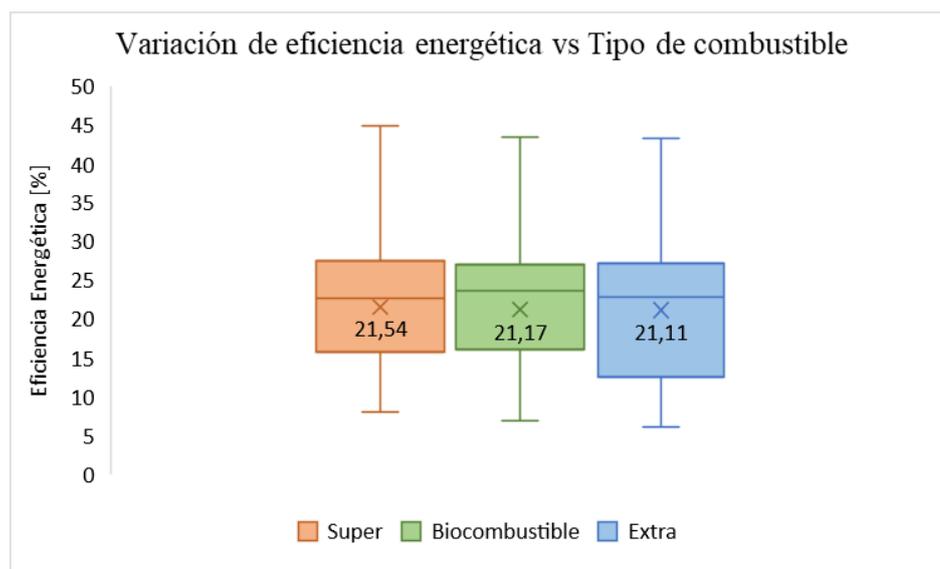
La Figura 85 muestra la segunda fase de la experimentación con el biocombustible E5, se observa una variabilidad en los datos del consumo específico del combustible, con un pico de consumo de 619,65 g/kWh registrado a baja potencia y revoluciones del motor, según se muestra en la Figura 85. Esta variación se atribuye principalmente a las condiciones climáticas, que generan un aire menos denso, afectando la relación aire-combustible. En comparación, el combustible super exhibe un consumo específico de 567,38 g/kWh, mientras que el combustible extra presenta un valor significativamente mayor de 759,18 g/kWh, marcando una diferencia con los resultados obtenidos en la primera prueba.

El biocombustible, en este caso, muestra un consumo superior al de la gasolina Super y Extra. Este hallazgo, en el contexto de este estudio, sugiere que los combustibles que contienen etanol, como la mezcla E5 utilizada, presentan valores más altos en términos de consumo en comparación con otras gasolinas comerciales.

Jhan S et al (2020), en el análisis del consumo de combustible y emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en un vehículo propulsado por bioetanol, gasolina e hidrógeno, identificaron una relación directa entre el incremento del consumo de combustible con bioetanol. Este fenómeno se atribuye al menor poder calorífico del bioetanol en comparación con la gasolina pura[207]. Estos hallazgos respaldan los resultados obtenidos en la experimentación con el biocombustible E5, que tiene la misma tendencia.

## Eficiencia energética del motor de combustión interna

Figura 86 Diagrama comparativo de la eficiencia energética para cada combustible empleado en la investigación.

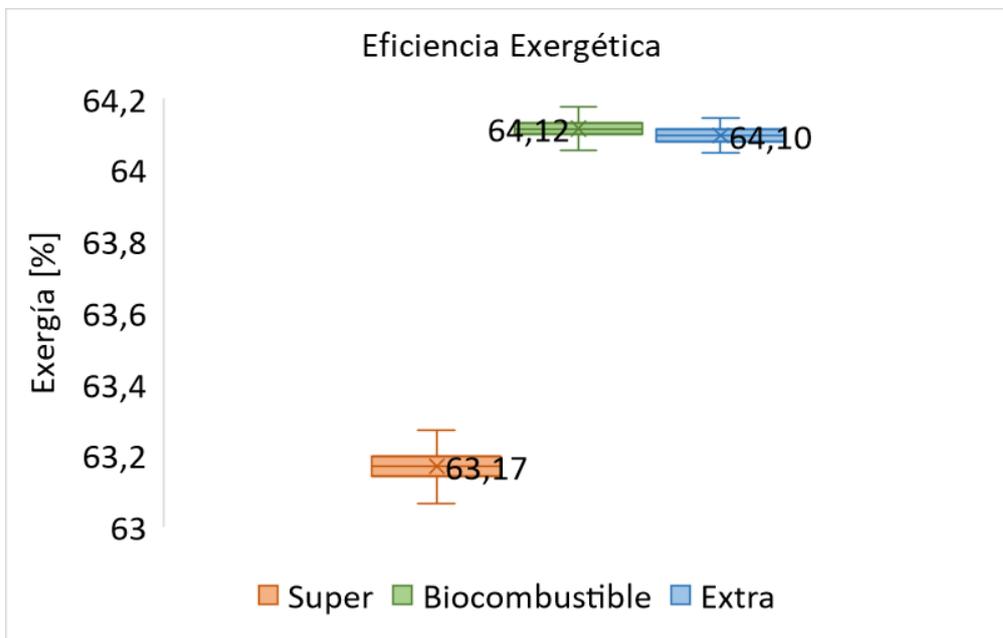


La Figura 86 presenta la eficiencia energética como variable dependiente para cada combustible, se observa una diferencia mínima pero significativa, siendo el combustible super el que exhibe el mayor resultado con un 21,54 %. La eficiencia energética del biocombustible ocupa el segundo lugar con un 21,17 %, sin mostrar una diferencia significativa con la eficiencia del combustible extra, que se sitúa en un 21,11 %. Es importante destacar que el biocombustible, siendo derivado del combustible extra con la adición de bioetanol, muestra una mejora en su rendimiento del 0,28 %.

En el estudio de Rostami . et al (2017) sobre el impacto de las posiciones de la válvula de mariposa en la eficiencia termodinámica de la segunda ley y la disponibilidad del motor utilizando mezclas de bioetanol y gasolina, se aplicaron diversas proporciones de bioetanol con gasolina. La investigación reveló una relación directa entre el incremento del porcentaje de bioetanol y el aumento de la eficiencia energética. Esta asociación se atribuye al mayor contenido de oxígeno presente en las mezclas, lo cual favorece una combustión más eficiente. El estudio destacó que a medida que aumenta el porcentaje de bioetanol, la eficiencia del motor también aumenta en comparación con otros combustibles[208]. Esta tendencia se confirmó en el análisis con bioetanol obtenido del mucílago del cacao en la muestra E5, donde se observó una mayor eficiencia respecto al combustible base puro de la mezcla, respaldando así las conclusiones de la investigación.

### Eficiencia exergética del motor de combustión interna

Figura 87 Diagrama comparativo de la eficiencia exergética para cada combustible empleado en la investigación.



La Figura 87 ilustra la variable dependiente de eficiencia exergética para cada combustible. Se observa una disparidad significativa al comparar el biocombustible con la gasolina super, donde el biocombustible exhibe el valor más elevado y un

rendimiento superior. Sin embargo, al contrastar el biocombustible con la gasolina extra, no se identifica una diferencia estadísticamente significativa.

La mayor eficiencia exergética registrada para el biocombustible, alcanzando un 64,12 %, indica que una porción de la energía liberada por el sistema contribuirá a mejorar la eficiencia térmica. Este resultado sitúa la eficiencia energética del biocombustible ligeramente por encima de la del combustible extra, como se muestra en la Figura 87.

Gallo et al (2002), en su análisis exergético de motores alimentados con etanol y gasolina, realizó una comparación exhaustiva de diversas variables, como el tiempo de encendido, la duración de la combustión y el factor de forma de la velocidad de combustión, permitiendo una evaluación de las irreversibilidades. Los resultados del análisis exergético revelaron que la eficiencia de la combustión en motores alimentados con etanol supera a la de los motores alimentados con gasolina, incluso cuando se mantiene constante la relación relativa aire-combustible.

En el caso del motor con mezclas de etanol-gasolina, incluso con tasas de compresión iguales a las de la versión de gasolina, las eficiencias exergéticas demostraron ser más elevadas. Esto sugiere que la presencia del etanol en la mezcla de combustión genera menos irreversibilidades en comparación con la gasolina[209]. Los resultados obtenidos en la experimentación con el biocombustible E5 corroboran estas tendencias teóricas, mostrando menores pérdidas de exergía en el motor. Estos hallazgos respaldan la eficacia del biocombustible E5 en términos de eficiencia exergética, alineándose con la literatura científica existente.

## Diagramas de Sankey

Figura 88 Diagrama de Sankey para la gasolina super

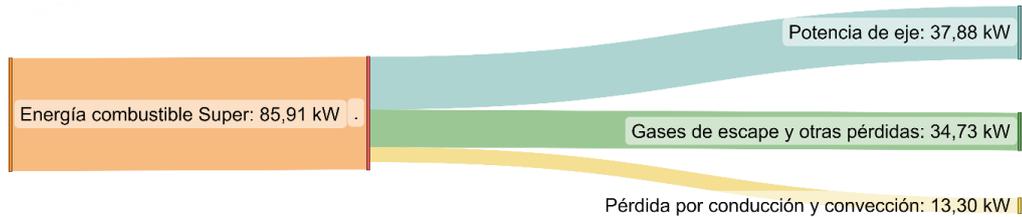


Figura 89 Diagrama de Sankey para la gasolina extra.

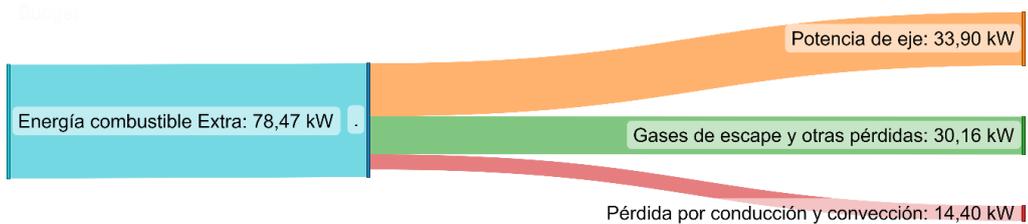
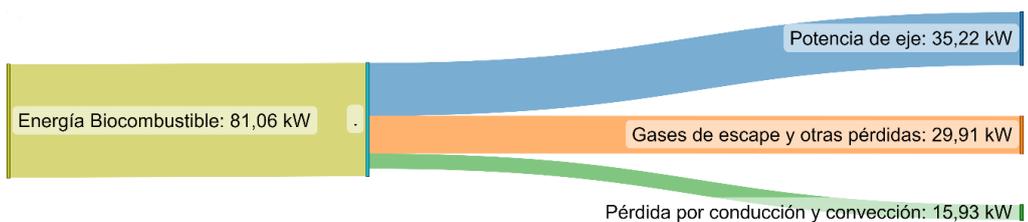


Figura 90 Diagrama de Sankey para el bicombustible E5.



Con base en los resultados obtenidos, se destaca la cantidad de pérdida de energía en el estudio del combustible super, alcanzando los 48,03 kW (55,90%), como se ilustra en la Figura 88. Este escenario conlleva a una eficiencia energética del 21,54% y una eficiencia exergética del 63,17%.

En el caso del combustible extra, la pérdida de energía alcanza los 44,57 kW (56,79%), como se observa en la Figura 89. Esto se refleja en una eficiencia energética de 21,11%, acompañada de una eficiencia exergética de 64,10%.

En el análisis del biocombustible, se registra una pérdida de energía de 45,84 kW (56,55%), visualizada en la Figura 90. Esto se traduce en una eficiencia energética del 21,17%, con una eficiencia exergética del 64,12%.

Los tres combustibles, gasolina súper, extra y biocombustible E5, presentan un comportamiento similar en cuanto a la eficiencia energética, con valores alrededor del 21%, siendo la más alta para la gasolina extra (56,78%) y la más baja para el biocombustible E5 (56,55%). En cuanto a la eficiencia exergética, el biocombustible E5 presenta la mejor performance (64,12%), seguido por la gasolina extra (64,10%) y la gasolina súper (63,17%), con estos resultados el biocombustible E5 se perfila como la mejor opción en términos de eficiencia energética y exergética, con una leve ventaja sobre la gasolina extra. La gasolina súper, por su parte, presenta la mayor pérdida de energía y la menor eficiencia exergética.

Rifino et al. (2019), en su investigación acerca del análisis exergético de un motor de encendido por chispa alimentado con etanol, proporciona una evaluación detallada de las fuentes de irreversibilidad y las oportunidades de mejora inherentes a este tipo de motores. Los autores sugieren que la combinación de etanol con gasolina representa un combustible más eficiente en comparación con el uso exclusivo de gasolina. Asimismo, destaca que la recuperación de la exergía de los gases de escape, mediante tecnologías como la turboalimentación o la recirculación de gases de escape, puede desempeñar un papel crucial para mejorar la eficiencia global del motor[210]. En conjunto, los análisis energéticos realizados en el biocombustible E5, alineados con el estudio mencionado, subrayan la relevancia fundamental de la eficiencia energética y exergética en el diseño y la operación eficiente de motores de combustión interna y ubica a las mezclas de bioetanol con gasolina como la mejor opción en términos de eficiencia energética y exergética.

## **5.2 Discusión de resultados a los procesos termoquímicos aplicados a la cáscara de la vaina del cacao.**

### **5.2.1 Análisis de los procesos de combustión directa.**

#### **Análisis Inmediato**

**Humedad:** Un contenido de humedad del 12,71% se considera relativamente bajo para la biomasa, lo que indica que la muestra está bien seca. Esto es positivo para su almacenamiento y manejo, es importante indicar que esta muestra tuvo un presecado natural, sin ningún tipo de tratamiento, y con esta humedad es idónea para cualquier tratamiento termoquímico.

**Volátiles:** Un contenido de volátiles del 59,66% es alto, lo que sugiere que la biomasa tiene un alto contenido de materia orgánica combustible de fácil ignición. Esto es favorable para la generación de energía, y procesos de gasificación y pirólisis.

**Carbono fijo:** Un contenido de carbono fijo del 18,18% indica una cantidad considerable de carbono en la biomasa, lo que también es positivo para su potencial energético.

**Cenizas:** Un contenido de cenizas del 9,45% se considera moderado. Un contenido alto de cenizas puede afectar negativamente la eficiencia de la combustión y generar residuos como la escoria que puede generar problemas con los equipos.

Liu (2011), en su análisis sobre la obtención de energía a partir de la combustión de paja de arroz en China, realizó un estudio inmediato detallado de la biomasa proveniente de la paja de arroz, obteniendo los siguientes resultados: humedad entre 10-20%, volátiles entre 75-85%, carbono fijo entre 15-25% y cenizas en un rango de 0,1-0,7% [211]. Un contenido de humedad cercano al 20% se considera elevado y puede ocasionar problemas en la combustión. En el caso de la biomasa de la cáscara de la vaina de cacao, que presenta un 12,71% de humedad en la

muestra de laboratorio sometida a secado natural, este porcentaje es más bajo, favoreciendo el entorno de combustión.

Comparado con la paja de arroz, la biomasa de la cáscara de cacao exhibe un contenido de volátiles inferior, ya que la paja de arroz tiene entre 75-85%. Esto sugiere que la paja de arroz podría ofrecer mejores prestaciones para procesos de gasificación y pirólisis en comparación con la biomasa utilizada en la presente experimentación. En cuanto al carbono fijo, la biomasa de la cáscara de cacao se encuentra dentro de los parámetros de la paja de arroz. Sin embargo, en el contenido de cenizas se observa una diferencia significativa. Mientras que las cenizas en la paja de arroz oscilan entre 0,1-0,7%, la biomasa de la cáscara de cacao presenta un 9,5%, un rango moderado. Este valor podría generar problemas importantes en el proceso de combustión directa, dando lugar a la formación de residuos. Por lo tanto, es crucial examinar el comportamiento de esta biomasa en otros análisis subsiguientes.

Okumura, (2009), en sus ensayos de pirólisis y gasificación de biomasa bajo condiciones de presión elevada, realizó un análisis elemental de la biomasa proveniente de la paja de trigo, obteniendo los siguientes resultados: humedad 5,8%, volátiles 70,8%, carbono fijo 18,3% y cenizas en un rango de 5,11%[212]. Estos datos revelan similitudes en los resultados entre la biomasa de la paja de arroz y la cáscara de la vaina de cacao empleada en la presente experimentación, a excepción del porcentaje de cenizas, que sigue siendo elevado en la segunda biomasa comparada.

La disparidad en el contenido de cenizas es un aspecto crucial, ya que podría tener impactos negativos en los procesos de combustión directa. En caso de emplear esta biomasa para la generación de energía, podría ser necesario implementar sistemas de combustión de alta temperatura capaces de fundir estas cenizas para lograr una mayor eficiencia en la combustión.

### **Análisis Elemental.**

**Carbono (C):** El contenido de carbono alcanza un 45,50%, revelando un elevado contenido de materia orgánica y, por ende, un notable potencial energético. El

carbono constituye el principal componente combustible en la biomasa, y su proporción ejerce una influencia significativa en el poder calorífico. En contraste con Baqain et al. (2024), quienes realizaron un estudio sobre parámetros de combustión utilizando biomasa de abeto común, una especie arbórea originaria de Europa, se determinó que el porcentaje de carbono en dicha biomasa era del 50,04%. Es pertinente destacar que el mismo método de análisis se aplicó tanto en ese estudio de referencia como en la presente tesis. No obstante, es importante señalar que la muestra de biomasa de abeto fue sometida a un proceso de secado a una temperatura de 105 °C[213].

**Hidrógeno (H):** El contenido de hidrógeno asciende al 5,32%, denotando una elevada presencia de este elemento que contribuye al incremento del poder calorífico y facilita los procesos de combustión y gasificación. En concordancia con el estudio llevado a cabo por Aich et al. (2022), centrado en mezclas de hojas de eucalipto con carbón de rechazo con el objetivo de evaluar rendimientos, se efectuó un análisis inmediato de las hojas de eucalipto, previamente sometidas a un proceso de secado a 60 °C durante 24 horas. Los resultados revelaron un contenido de hidrógeno del 7%[214], cifra ligeramente superior a la presente en la biomasa de cáscara de cacao. Este hallazgo sugiere escenarios propicios para procesos de gasificación y obtención de cantidades significativas de gas de síntesis en ambos casos.

**Nitrógeno (N):** La presencia de nitrógeno alcanza el 0,91%, evidenciando un contenido reducido de este elemento. Dada su propensión a convertirse en emisiones de NO<sub>x</sub> durante la combustión, un bajo contenido resulta beneficioso. En concordancia, Sieradzka (2022), en su investigación del proceso de gasificación de biomasa a través de CO<sub>2</sub>, examinó diversas biomásas, incluida la proveniente de heno. En estos análisis, se constató que el contenido de nitrógeno en la biomasa de heno, un subproducto agrícola, alcanza el 1,16%[215], reforzando la observación de que biomásas lignocelulósicas como la cáscara de cacao suelen presentar valores bajos de nitrógeno.

**Azufre (S):** La presencia de azufre en un bajo 0,13% constituye un contenido favorable, dado que minimiza las emisiones de SO<sub>2</sub> durante la combustión. En

consonancia con la investigación referida anteriormente sobre el heno, donde los autores reportaron un contenido de azufre del 0,12% [210], la biomasa de la cáscara de la vaina de cacao exhibe características químicas similares.

En resumen, los resultados presentados revelan que la composición química y las propiedades físicas de la biomasa derivada de la cáscara de la vaina de cacao se alinean de manera consistente con los estándares típicos de biomasa, según lo documentado por varios autores en la literatura científica.

### **Poder Calorífico a 0% de humedad**

**Poder Calorífico Inferior (PCI):** Con un valor de 3869,5 kcal/kg, la cáscara de vaina de cacao muestra un PCI que se encuentra en una categoría similar a otras biomásas lignocelulósicas. Una comparación importante es la paja de arroz, cuyo PCI, según el estudio de Chen et al (2023), se estima en 3169,25 kcal/kg[216]. La paja de arroz se utiliza extensamente en China para la generación de electricidad mediante combustión directa. Dada la relevancia del cultivo de cacao en la costa ecuatoriana, la cáscara de vaina de cacao podría considerarse para aplicaciones similares, gracias a su significativo poder calorífico en condiciones de humedad 0. No obstante, es crucial abordar eficientemente el tratamiento de esta biomasa para alcanzar los niveles de humedad requeridos.

El Poder calorífico superior (PCS) es de 4233,01 kcal/kg, que es el PCI más el calor de vaporización del agua, es relevante para la caracterización de combustibles, sin embargo en procesos de combustión se usa el PCI.

### **Poder calorífico a humedad recibida en el laboratorio.**

Al laboratorio del grupo de investigación GRAIBER se trasladaron muestras de cáscara de vaina de cacao sometidas a secado natural, tal como se muestra en el estado representado en la Figura 91.

Figura 91 Cáscaras de vaina de cacao, sometidas a secado natural y analizadas en el laboratorio.



La cáscara de cacao, sometida a un proceso de secado natural, exhibe notables características en términos de poder calorífico, con un Poder Calorífico Superior (PCS) de 3890,4 kJ/kg y un Poder Calorífico Inferior (PCI) de 3526,9 kJ/kg. Estos valores, equiparables a los de otras biomásas lignocelulósicas como la paja de arroz mencionada anteriormente, cuyo PCI en condiciones de humedad 0 se estimó en 3169,25 kcal/kg[216], destacan la eficiencia energética de la cáscara de cacao. Incluso con un 12,5% de humedad en el proceso de secado natural, supera en desempeño al combustible de referencia. Estas propiedades posicionan a la cáscara de cacao como una candidata promisoría para diversos procesos, incluyendo la generación de electricidad mediante combustión directa, así como la exploración de tecnologías como la gasificación y la pirólisis, aprovechando su significativo potencial energético.

### **Análisis de Halógenos**

La cáscara de cacao presenta un contenido de flúor (F) bajo (120,126 ppm) comparado con otras biomásas, mientras que su contenido de cloro (Cl) es similar (15,88 ppm).

El contenido de flúor puede ser perjudicial para la salud humana y animal, y requiere un análisis cuidadoso y medidas de control durante el uso de la biomasa.

El cloro, aunque presente en menor cantidad, puede generar emisiones de gases ácidos durante la combustión, lo que afecta al medio ambiente, además de problemas de corrosión específicos que no se habían encontrado hasta ahora en las centrales eléctricas alimentadas con carbón[217]

Hariana et al. (2023), al explorar los efectos de los aditivos en la formación de depósitos durante la co-combustión de carbón y biomasa con elevado contenido de cloro, revela que la biomasa de aceite de palma tiene una concentración de cloro elevada, alcanzando los 1467,43 ppm. Esta alta presencia de cloro, al mezclarse con carbón para aplicaciones a escala industrial, desencadena fenómenos corrosivos perjudiciales para la integridad de los equipos[218]. En contraste, la biomasa proveniente de la cáscara de la vaina de cacao muestra una concentración de cloro significativamente inferior, registrando tan solo 15,88 ppm. En el estudio de referencia, se requirió implementar mecanismos específicos para mitigar la corrosión ocasionada por el alto contenido de cloro presente en la biomasa estudiada, en marcado contraste con los niveles bajos de cloro observados en la biomasa de la cáscara de cacao objeto de este estudio.

### **Composición de Cenizas.**

#### **Óxidos alcalinos y alcalinotérreos:**

**Na<sub>2</sub>O (0,4%):** Bajo contenido. No se espera un impacto significativo en la combustión o el comportamiento de las cenizas.

**MgO (6,28%):** Contenido moderado. Puede contribuir a la formación de depósitos y a la aglomeración de cenizas durante la combustión.

**CaO (8,78%):** Contenido Moderado. Favorece la formación de cenizas sinterizadas y de alta temperatura de fusión.

**K<sub>2</sub>O (72,02%):** Contenido extremadamente alto. Dominante en la composición de las cenizas. Puede afectar la fluidez de la escoria y la deposición de cenizas.

### **Óxidos ácidos:**

**SiO<sub>2</sub> (3,47%):** Bajo contenido. Puede contribuir a la formación de una capa de cenizas viscosa y a la abrasión de equipos.

**Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (0,52%):** Bajo contenido. No se espera un impacto significativo en la combustión o el comportamiento de las cenizas.

**P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (4,33%):** Contenido moderado. Puede generar emisiones de fósforo durante la combustión y contribuir a la formación de depósitos.

**SO<sub>3</sub> (3,57%):** Contenido moderado. Puede generar emisiones de SO<sub>x</sub> durante la combustión y contribuir a la corrosión de equipos.

### **Otros elementos:**

**ClO (307 ppm):** Bajo contenido. Puede generar emisiones de HCl durante la combustión.

**Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (0,309%):** Bajo contenido. No se espera un impacto significativo en la combustión o el comportamiento de las cenizas.

**ZnO (875 ppm):** Bajo contenido. Puede generar emisiones de Zn durante la combustión.

**CuO (228 ppm):** Bajo contenido. No se espera un impacto significativo en la combustión o el comportamiento de las cenizas.

**MnO (340 ppm):** Bajo contenido. No se espera un impacto significativo en la combustión o el comportamiento de las cenizas.

**Rb<sub>2</sub>O (776 ppm):** Bajo contenido. No se espera un impacto significativo en la combustión o el comportamiento de las cenizas.

**SrO (598 ppm):** Bajo contenido. No se espera un impacto significativo en la combustión o el comportamiento de las cenizas.

**ZrO<sub>2</sub> (5,79 ppm):** Bajo contenido. No se espera un impacto significativo en la combustión o el comportamiento de las cenizas.

### **Análisis general de la composición de las cenizas**

La composición de las cenizas de la cáscara de cacao presenta características singulares que podrían afectar su comportamiento durante la combustión y el manejo de las cenizas:

**Alto contenido de K<sub>2</sub>O:** El K<sub>2</sub>O, un fundente que disminuye la temperatura de fusión de las cenizas, ha sido identificado como un factor crítico en el comportamiento de la biomasa durante la combustión. Vassilev et al. (2015), en su análisis de las características y propiedades de la biomasa lignocelulósica, en comparación con el carbón, señala que el contenido de K<sub>2</sub>O en el carbón convencional oscila entre el 0,29% y el 4,15%, mientras que en la biomasa varía notablemente, situándose entre el 2,9% y el 63,9% [219] En el caso específico de la biomasa derivada de la cáscara de la vaina del cacao, se registra un contenido de K<sub>2</sub>O excepcionalmente alto, alcanzando el 72,02%, superando los límites establecidos por el estudio comparativo. Este elevado contenido propicia la transformación gradual de los elementos inorgánicos de la biomasa en escoria de biomasa a medida que la temperatura aumenta. Este fenómeno conduce a que la composición de la escoria de biomasa se asemeje a la de los elementos inorgánicos presentes en la biomasa original [220] generando inconvenientes significativos relacionados con la abrasión en los componentes del sistema de combustión.

### **Contenido considerable de CaO y MgO:**

Estos óxidos alcalinotérreos, al aumentar la viscosidad de la escoria, pueden dar lugar a la formación de depósitos en las superficies de intercambio de calor durante el proceso de combustión. Se recomienda llevar a cabo una evaluación de la formación de depósitos y la posible abrasión de equipos durante la operación. En

comparación con otras biomásas con propiedades químicas similares, como los granos de palmera que presentan un contenido de CaO del 9,2% y MgO del 6,5%, y las astillas de pino con un CaO de 7,89% y MgO de 2,43%[221], la cáscara de vainas de cacao presenta valores en rangos comparables. Cabe destacar que tanto los granos de palmera como las astillas de pino son ampliamente utilizados en calderas para diversas aplicaciones energéticas, sugiriendo un potencial similar para la cáscara de vainas de cacao en términos de emisiones y aplicaciones prácticas en sistemas de combustión.

**Presencia de SiO<sub>2</sub>:** El SiO<sub>2</sub> puede contribuir a la formación de una capa de cenizas viscosa y abrasiva. Se recomienda evaluar la abrasión de equipos y la necesidad de limpieza de las superficies de intercambio de calor, sin embargo el valor de 3,47% es un valor bajo en comparación de otras biomásas que son usadas para generación de energía, por ejemplo la biomasa procedente de la caña, tiene un SiO<sub>2</sub> de aproximadamente 80,2%, en este caso Link et al (2022) en el estudio sobre el comportamiento de fusión de cenizas de mezclas de carrizos y combustibles leñosos, recomiendan que en este tipo de biomasa como la de caña que tiene el alto porcentaje mencionado, existe la alternativa de realizar mezclas de diferentes tipos de biomasa con el fin de mejorar estas características[222].

Pacheco et al (2018) llevaron a cabo la obtención de múltiples muestras de cenizas procedentes de la Planta de Biomasa ENCE ubicada en Mérida, España. El análisis de estas muestras se realizó mediante la técnica de Fluorescencia de Rayos X por Difracción de Longitud de Onda (WDXRF), cuyos resultados expresados en porcentajes se detallan en la tabla 139. Estos hallazgos fueron posteriormente comparados con los obtenidos en la investigación de la biomasa de cacao, proporcionando así un marco de referencia para la evaluación de los componentes presentes en las cenizas de ambos contextos.

Tabla 139 *Contraste de Resultados del Análisis Químico de Cenizas entre la Operación Real de una Central de Biomasa y la Biomasa de la Cáscara del Cacao.*

	%SiO <sub>2</sub>	%CaO	%K <sub>2</sub> O	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>
<b>Biomasa Cacao</b>	3,47	8,78	72,02	0,52	6,28	0,309	4,33	0,4	3,57
<b>Muestra 1</b>	29,5	24,44	7,71	6,2	5,79	1,86	3,58	1,1	1,12
<b>Muestra 2</b>	18	34,01	11	3,27	3,72	2,86	2,72	1,06	4,34
<b>Muestra 3</b>	49,05	10,99	6,2	9,84	1,84	7,64	1,45	1,43	2,3
<b>Muestra 4</b>	6,24	31,37	19,27	1,57	2,29	2,31	2,04	2,18	9,88
<b>Muestra 5</b>	4,8	26,84	23,04	1,12	1,85	2,28	2,35	2,39	11,6
<b>Muestra 6</b>	11,8	27,81	19,59	3,1	2,37	1,91	3,12	2,29	12,23

Los resultados del análisis químico de las cenizas de una planta en operación real exhiben cierta dispersión; no obstante, se observa que la composición de la biomasa proveniente de la cáscara del cacao se encuentra mayormente dentro de los parámetros de las muestras, con la excepción del K<sub>2</sub>O, que se presenta notablemente elevado en comparación con otras muestras. Este hallazgo es importante debido a su potencial impacto en la formación de depósitos de cenizas en calderas y otros equipos de combustión, lo que podría reducir la eficiencia del proceso y aumentar los costos de mantenimiento. Asimismo, la presencia de potasio en niveles elevados podría ocasionar corrosión en los equipos de combustión si no se utiliza un material resistente. Sin embargo, es relevante destacar que estas cenizas pueden ser aprovechadas como abono para el sector agrícola, dado su contenido rico en potasio, un nutriente esencial.

**Análisis de la temperatura de fusión de las cenizas (AFT) de la cáscara de cacao:**

La curva de análisis térmico de las cenizas de la cáscara de cacao presenta cuatro puntos clave:

**Temperatura de deformación inicial (TDI): 888°C:**

Indica el inicio de la deformación de la ceniza bajo la acción de la gravedad.

**Temperatura de reblandecimiento (TR): 1145°C:**

Señala el punto donde la ceniza comienza a ablandarse y perder su forma original.

**Temperatura de hemisferio (TH): 1340°C:** La ceniza se transforma en un líquido viscoso y toma la forma de un hemisferio.

**Temperatura de fluidez (TF): 1420°C:** La ceniza se vuelve completamente líquida y fluye libremente.

### **Análisis de las temperaturas:**

**TDI y TR:** Las temperaturas de deformación inicial y reblandecimiento son relativamente bajas. Esto indica que las cenizas de la cáscara de cacao pueden comenzar a ablandarse y deformarse a temperaturas relativamente bajas durante la combustión.

**TH:** La temperatura de hemisferio es moderada. Indica que las cenizas se funden a una temperatura relativamente alta, lo que puede ser favorable para la formación de una capa de cenizas protectora en las superficies de intercambio de calor.

**TF:** La temperatura de fluidez es alta. Esto significa que las cenizas fundidas tendrán una alta viscosidad, lo que puede dificultar su manejo y generar problemas de deposición en los equipos de combustión.

Li et al (2019) en su investigación sobre cómo mejorar la temperatura de fusión de las cenizas (AFT) del carbón con bajo contenido de AFT mediante la adición de biomasa, como parte de su investigación, encontró la temperatura de fusión de las cenizas del carbón y de la biomasa de cáscaras de castaña y arroz, la Tabla 140, muestra estos resultados en comparación con los de la biomasa obtenida de la cáscara de la vaina de cacao.

*Tabla 140 Contraste de Resultados de la temperatura de fusión de las cenizas comparada con la biomasa de la experimentación[223]*

<b>BIOMASA</b>	<b>TDI</b>	<b>TR</b>	<b>TH</b>	<b>TF</b>
Carbón	1062	1121	1186	1237

Cáscara de castaña	1425	1473	1497	1500
Cáscara de Arroz	1438	1492	1500	1500
Cáscara de cacao	888	1145	1340	1420

En comparación con la biomasa utilizada como referencia, la biomasa empleada en el experimento exhibe una temperatura de deformación inicial (TDI) inferior. La explicación de esta disminución en la temperatura inicial de deformación se encuentra en el estudio de Li et al (2018), donde se compararon tres tipos de biomasa y se determinó que la TDI fue menor en aquella con un elevado contenido de óxido de potasio ( $K_2O$ ). Este fenómeno se atribuye al alto contenido de silicio, aluminio y calcio, así como a la presencia de cenizas de biomasa con una alta proporción de sílice/alúmina[224]. Esta relación se valida en el análisis de la biomasa derivada de la cáscara del cacao, cuyo contenido de  $K_2O$  es del 72,02%, como se detalló previamente en el apartado anterior, superando a la gran mayoría de las biomásas estudiadas hasta el momento, lo que podría influir directamente en la TDI.

**Análisis de la formulación a elementos de la cáscara de cacao:** La composición elemental de la cáscara de cacao presenta características importantes:

**Elementos mayoritarios:**

**K (59,79%):** El contenido mayoritario de potasio en la biomasa impacta directamente en la temperatura de fusión de las cenizas y en la formación de depósitos durante el proceso de combustión. Este elemento puede ser usado en fertilizantes potásicos, como el sulfato de potasio ( $K_2SO_4$ ), el cloruro de potasio (KCl) y la potasa[225]. El incremento en el contenido de potasio, acompañado de cloro (Cl) y azufre (S), resulta en varios efectos adversos:

- Disminución de las temperaturas de fusión de las cenizas, lo que puede provocar acumulaciones elevadas de incrustaciones y escorias.
- Aumento en la generación de aerosoles y emisiones de partículas finas.
- Susceptibilidad a la corrosión y otros problemas asociados[226]

**Ca (6,28%):** El calcio es el segundo elemento más abundante, la elevada concentración de CaO es una característica distintiva de las cortezas de madera,

como las provenientes de árboles como el olmo, álamo, abeto, abedul, haya y arce, así como de algunos tallos de madera. En contraste, la presencia excepcionalmente baja de CaO es típica en la cáscara de arroz, ciertas algas, las cáscaras de nuez de areca y de coco, las mazorcas de maíz y el pasto arundo. Estudios de referencia indican que los tallos, troncos y ramas grandes de la madera exhiben elevadas concentraciones de calcio[226], en el caso de la biomasa de la experimentación, el contenido de Ca es medio.

**Mg (3,79%):** El magnesio es un componente significativo en diversas biomásas, presentando un amplio rango de concentraciones que oscila entre 0,3% y 21,6%. Los valores promedio de este elemento en diferentes grupos de biomasa son comparables a los del calcio (Ca), sugiriendo una asociación análoga de ambos elementos en la composición de la biomasa[227]. En el caso de la biomasa utilizada en la experimentación, se confirma esta analogía.

#### **Elementos minoritarios:**

**P (1,89%):** El fósforo puede generar emisiones de fósforo durante la combustión y contribuir a la formación de depósitos.

**Si (1,62%):** La sílice puede contribuir a la formación de una capa de cenizas viscosa y abrasiva.

**S (1,43%):** El azufre puede generar emisiones de SO<sub>x</sub> durante la combustión y corroer equipos.

#### **Otros elementos:**

**Na (0,30%):** El sodio puede afectar la fluidez de la escoria.

**Al (0,28%):** El aluminio es un componente menor que no se espera que tenga un impacto significativo en la combustión.

**Fe (0,22%):** El hierro no se espera que tenga un impacto significativo en la combustión.

**Elementos traza: Rb (710 ppm), Zn (703 ppm), Sr (505 ppm), Cl (307 ppm), Mn (264 ppm), Cu (182 ppm), Zr (4,29 ppm):** Estos elementos están presentes en pequeñas cantidades y no se espera que tengan un impacto significativo en la combustión.

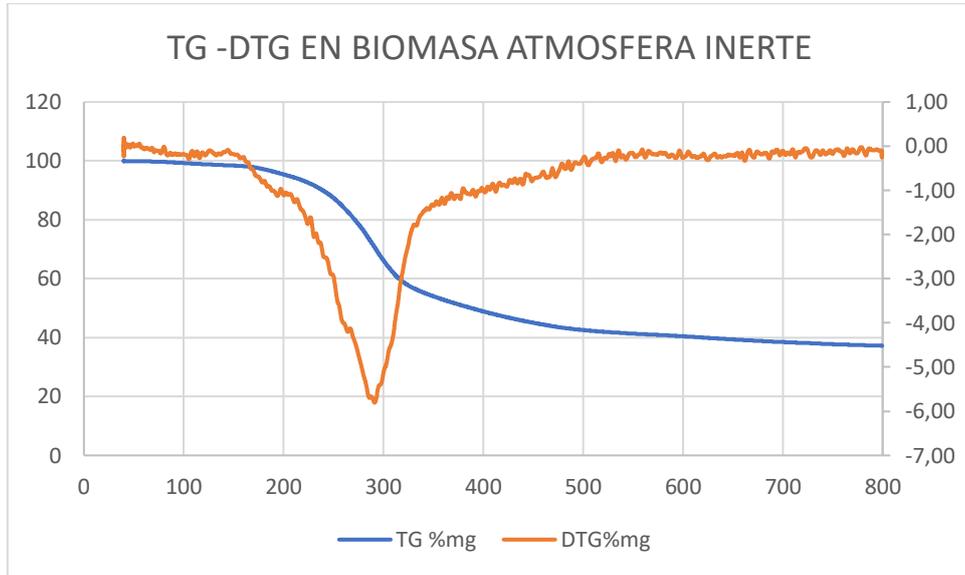
### **Análisis termogravimétrico tg-dtg, espectrómetro de gases.**

En el estudio de la biomasa en cuestión, se llevó a cabo la experimentación con la Técnica TG-MS mediante un rango de temperaturas que abarcó desde los 40°C hasta los 800°C, con un aumento gradual de temperatura de 5°C por minuto a lo largo de un período de 30 minutos. Este proceso se llevó a cabo en dos entornos distintos: uno en atmósfera inerte y otro en atmósfera oxidante.

### **TG-DTG-MS Biomasa en Atmosfera Inerte.**

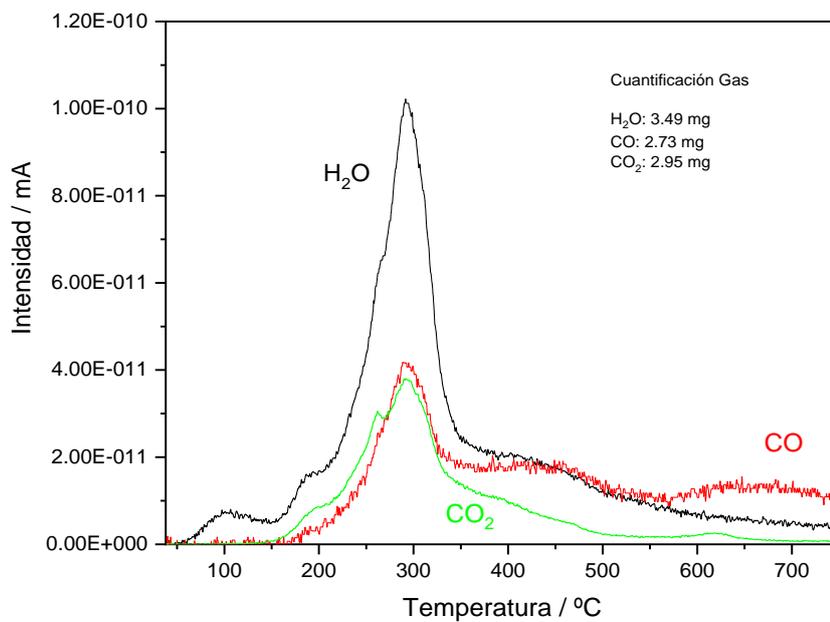
Es importante entender el comportamiento térmico de la biomasa de la vaina de cacao, la primera experimentación se realiza en atmósfera inerte, con el objetivo de simular condiciones de pirólisis, la Figura 92 muestra las curvas TG-DTG y la Figura 93 muestra la espectrometría de masas MS de este proceso en las condiciones indicadas.

Figura 92 Curva TG-DTG biomasa de cacao en atmosfera inerte.



La Figura 92 muestra la curva de masa de pérdida térmica (TG) y la relativa Curvas de tasa de descomposición térmica (DTG) de la biomasa de la cáscara de cacao una velocidad de calentamiento de 5 C/min,

Figura 93 Curvas de espectrometría de masas del experimento



El proceso de pirólisis de la biomasa puede desglosarse en tres etapas distintivas.

En la primera etapa, se destaca principalmente la liberación de agua libre. Es importante señalar que el análisis inmediato de la biomasa de la experimentación, que registra un 12,71% de humedad, revela una ligera ganancia de masa hasta aproximadamente los 100°C, este fenómeno se atribuye a procesos de condensación del agua y formación de compuestos intermedios. Esta fase abarca un rango de temperaturas entre los 40 y 170 °C, aquí existe una pérdida de masa de aproximadamente 5%.

La segunda etapa se caracteriza por la liberación rápida de volátiles, tanto no condensables como condensables, incluida el agua interna. En este punto, la intensidad máxima del espectro de masas del agua interna permanece más pronunciada en la biomasa del estudio, como se ilustra en la Figura 92. El pico más alto del espectro de agua se sitúa aproximadamente a los 300 °C, indicando la fase que abarca desde los 170 °C hasta los 450 °C aproximadamente, con una pérdida de masa de un 50% en esta etapa.

La tercera etapa, más lenta, comprende la liberación gradual de volátiles, generalmente acompañada por la pirólisis secundaria de volátiles condensables y la reacción entre el carbono (C) y el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Este comportamiento se refleja en los espectros presentados en la Figura 92 y abarca un rango de temperaturas entre los 450 y 800 °C, la pérdida de masa en esta etapa es de aproximadamente un 13%.

Estas tres fases se alinean con el análisis de las características de pirólisis llevado a cabo por Zhang et al. (2023), quien examinó los atributos de este tratamiento termoquímico en diversas biomásas, incluyendo residuos de la medicina tradicional china. En este contexto, las tres etapas de la curva DTG se describen de la siguiente manera:

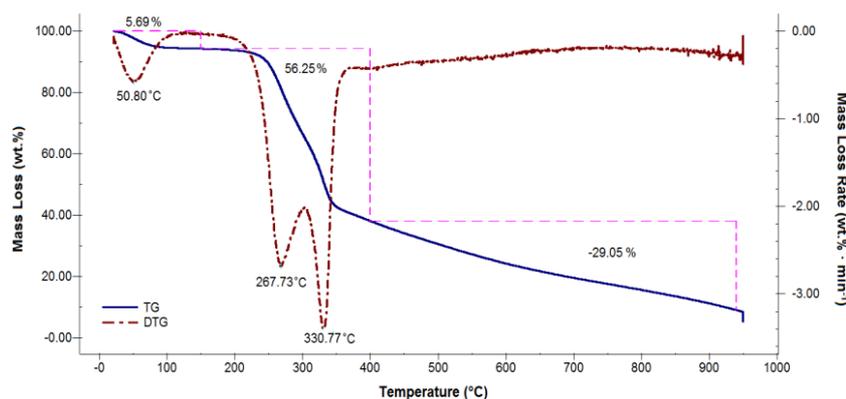
La primera etapa implica la liberación de aguas poco profundas y agua libre, un proceso de naturaleza física, con un rango de temperatura comprendido entre 30 y 170 °C.

En la segunda etapa, el rango de temperatura abarca desde 170 hasta 380 °C. En la tercera etapa, la temperatura supera los 380 °C, y la tasa de pérdida de masa aumenta a aproximadamente un 68%. Durante esta fase, se produce la precipitación de agua, y en la espectrometría se observan dos picos de liberación de agua, uno alrededor de los 78 °C y otro alrededor de los 367 °C. Notablemente, el segundo pico es significativamente más elevado que el primero.

En otras palabras, a lo largo de todo el proceso de pirólisis de biomasa, el agua se precipita de manera continua y alcanza su valor máximo a 367 °C. A lo largo de todo el proceso de pirólisis, se identifica la presencia de agua liberada, agua libre y agua adsorbida en la etapa inicial[228].

Romero et al (2022) en el estudio de pirólisis de cáscara de palmiste, realizaron la experimentación con un aumento gradual de temperatura de 5°C por minuto, igual al aplicado a la experimentación de la biomasa de la cáscara de la vaina del cacao. La Figura 92 muestra el TG-DTG de esta investigación donde la pérdida de peso se produjo en tres etapas. La descomposición inicial o primera etapa fue registró entre 23 y 150°C, con una pérdida de peso entre 5 y 6%. Este hecho podría estar relacionado con la eliminación de humedad y parte de los compuestos ligeros. La segunda etapa se desarrolló entre 150 y 400 °C. En esta etapa se perdió aproximadamente el 56% del peso y podría estar relacionado con el contenido de materia volátil. Esta segunda etapa se reconoce como la zona activa de pirólisis y podría estar relacionada con la descomposición de hemicelulosa, celulosa y lignina. Entre estos tres elementos, el primero en descomponerse es hemicelulosa y se afirma que alcanzó la velocidad máxima de descomposición alrededor de los 268°C, seguida de celulosa a 331°C, en la tercera etapa, se evidenció una descomposición lenta y se puede afirmar que estuvo relacionada con un reordenamiento químico del biocarbón primario para producir un producto sólido rico en carbono[229].

Figura 94 Curva TG-DTG biomasa de cáscara de palmiste.



Al comparar los resultados con la literatura científica, se constata la concordancia con las tres etapas típicas de la pirolisis en una biomasa similar. Según el estudio de pirolisis realizado por Wang et al (2016) en diversas biomásas, durante la primera fase de deshidratación, la temperatura de la biomasa de cascarilla de arroz se mantiene por debajo de los 150 °C. En la segunda etapa, en un rango de temperatura entre 150 y 250 °C, se observa una pirolisis lenta de una fracción reducida de la biomasa, como la hemicelulosa. La tercera etapa, caracterizada por temperaturas superiores a los 250 °C, implica la rápida descomposición térmica de la mayor parte de la biomasa, incluyendo la celulosa y la fibra, liberando compuestos volátiles. Cuando se supera los 500 °C, los materiales no reactivos, como la lignina y los residuos remanentes, experimentan la pirolisis[230].

Roman et al (2018), en la investigación sobre la degradación térmica del kenaf, analizan el comportamiento de esta biomasa a diferentes tamaños de partícula y elaboran una gráfica TG-DTG donde se evidencia la superposición de las curvas. Los resultados indican que el impacto del tamaño de partícula en el rango estudiado es marginal. Los picos presentes en las curvas están intrínsecamente vinculados a la composición del material, específicamente a la presencia de hemicelulosa, celulosa y lignina. La primera pérdida de peso en el intervalo de 100-180 °C se asocia probablemente con la eliminación de agua presente tanto en el interior del material como limitada por la superficie del mismo (evidenciado por máximos del pico DTG alrededor de 130 °C). La curva DTG revela que este pico se intensifica a medida que se reduce el tamaño de partícula, sugiriendo que el proceso de secado del material

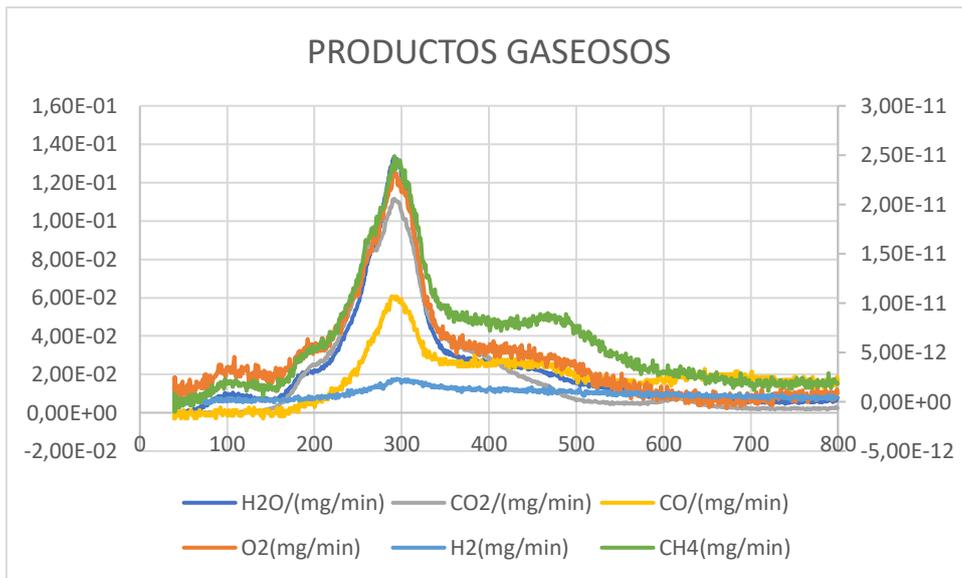
es más eficiente con partículas más pequeñas, dado que la superficie disponible para el intercambio de calor es mayor. El pico identificado alrededor de los 350 °C se corresponde con la descomposición de volátiles ligeros, fenómeno asociado comúnmente con la degradación de la hemicelulosa y celulosa[231].

Estos hallazgos corroboran la pauta general de la pirolisis en biomasa, como se describe en la literatura científica y ratifica la uniformidad con la experimentación realizada con la cáscara de la vaina del cacao.

### **Análisis de productos gaseosos.**

La espectrometría de masas se enfocó en la detección de gases permanentes, tales como H<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub> y O<sub>2</sub>, así como un hidrocarburo ligero como el CH<sub>4</sub>, y H<sub>2</sub>O. Los resultados de la espectrometría de masas se expresan en unidades de masa, generando un diagrama combinado de los perfiles de corriente iónica versus las temperaturas para la biomasa de la cáscara de la vaina de cacao, como se muestra en la Figura 93. Es evidente que, la mayoría de los productos gaseosos se generaron principalmente en el rango de temperatura de 200 a 400 °C. Sin embargo, el H<sub>2</sub> en bajas cantidades se produjo de manera más significativa a temperaturas más elevadas, alrededor de 300°C. Los picos a temperaturas más bajas (<150°C) indican el proceso de secado de las materias primas de biomasa, al igual que la liberación de agua, que alcanzó su pico máximo aproximadamente a 300 °C.

Figura 95 Análisis de productos gaseosos derivados del ensayo en atmosfera inerte



### TG-DTG-MS Biomasa en Atmosfera Oxidante.

El análisis se realizó en atmósfera oxidante, con el objetivo de simular condiciones de combustión, la Figura 96 muestra las curvas TG-DTG y la Figura 97 muestra la espectrometría de masas MS de este proceso en las condiciones indicadas.

Figura 96 Curva TG-DTG biomasa de cacao en atmosfera oxidante.

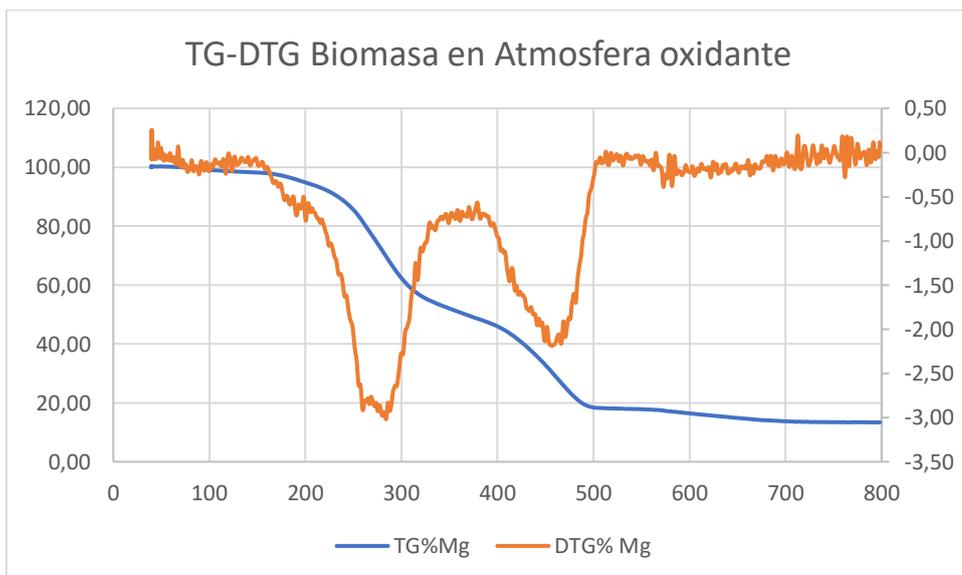
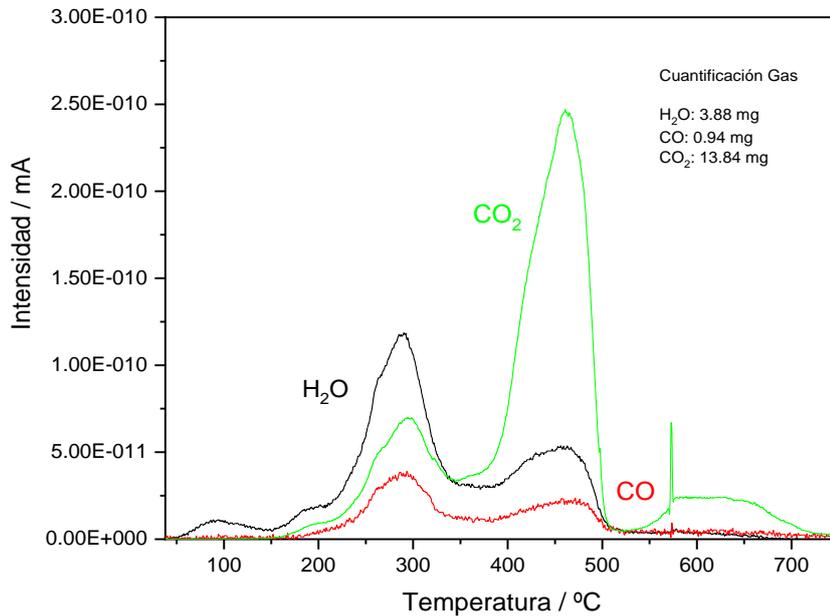


Figura 97 Curvas de espectrometría de masas del experimento



La Figura 96 muestra las curvas de TG y DTG de la biomasa de la cáscara de la vaina de cacao en velocidad de calentamiento de 5 °C/min en atmosfera oxidante para simulación de un proceso de combustión, la muestra en presencia de aire sufre tres etapas de pérdida de peso, además de la liberación de humedad antes de los 150 °C[232]. Algunos autores sugieren que incluso con un material secado al aire, se produce una pequeña pérdida de masa. observado en el rango de temperatura de 60 a 200[233], en la Figura 96, sólo se observó una pérdida mínima de masa en la zona de evaporación del agua, incluso en la espectrometría de la figura 97, se puede ver que la emisión de agua es baja. Los siguientes pasos de combustión ocurren relativamente simultáneamente

La mayor pérdida de masa (41%-42%) ocurrió en el rango de temperaturas de 150°C a 280°C. Como se ve en todas las curvas, se produjeron dos fuertes picos de actividad reconocida: la primera en el rango de 200 a 350 °C y la segunda entre 400 y 500 °C.

La espectrometría de masas revela la separación de H<sub>2</sub>O, CO y otros gases en el primer pico de combustión, productos de la misma. El segundo pico coincide con

la liberación de CO<sub>2</sub>. La menor cantidad de H<sub>2</sub>O en este pico indica la combustión previa de hidrocarburos, mientras que la segunda fase produce compuestos aromáticos y carbón vegetal.

Basado en un modelo de combustión[234], se puede afirmar que esta fase consiste en la conversión de materia orgánica en volátiles y carbono fijo, oxidación de los volátiles formados y finalmente la combustión del carbono. Por encima de 500°C, todas las siguientes reacciones son endotérmicas, lo que sugiere que los compuestos orgánicos se han oxidado.

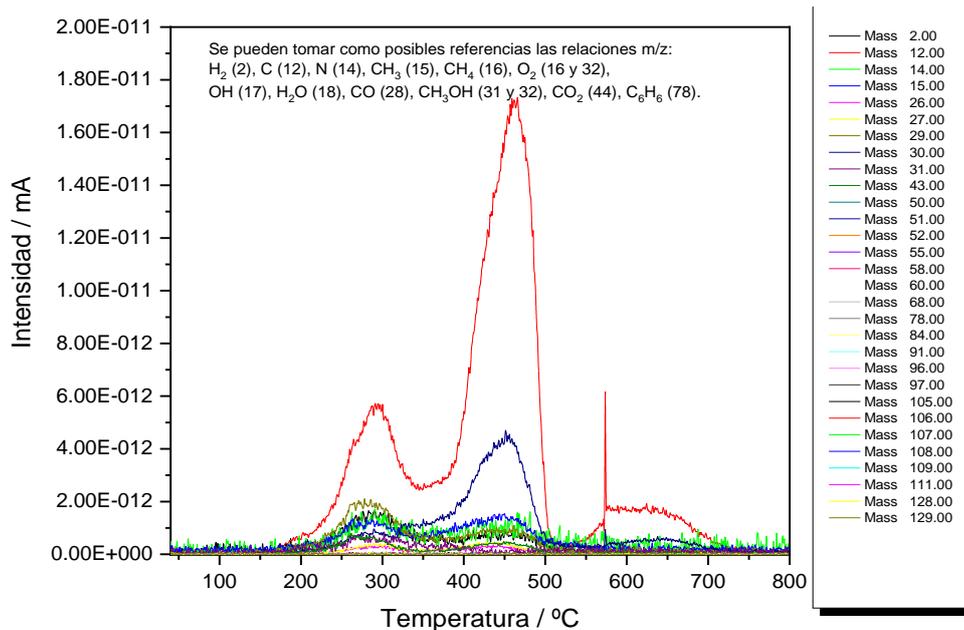
### **Análisis de productos gaseosos.**

La medición simultánea de la liberación de productos gaseosos durante la combustión de biomasa se llevó a cabo mediante espectrometría de masas. El enfoque de la espectrometría de masas se centró en los principales productos volátiles y de combustión de la biomasa, evaluando sus intensidades relativas en el rango de temperatura de 40 °C a 800 °C y su relevancia. Los productos gaseosos identificados principalmente consistieron en volátiles ligeros, como H<sub>2</sub> (masa 2), hidrocarburos como CH<sub>4</sub> (masa 16) y CH<sub>3</sub> (masa 15), CO (masa 28), CO<sub>2</sub> (masa 44) y alcoholes como CH<sub>3</sub>OH (masa 31 y 32).

Durante el análisis, el espectro de masa 17 del espectrómetro representa el fragmento OH, mientras que el 18 representa el H<sub>2</sub>O. La descomposición térmica y la combustión de la biomasa liberaron continuamente H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>, con pequeñas cantidades de CO y CH<sub>4</sub> también observadas. Esto se presenta en la Figura 97.

El CO<sub>2</sub> se liberó significativamente durante la fase de combustión, como era de esperar. Las emisiones de gases primarios derivadas de la descomposición térmica y la combustión del carbono fijo en la biomasa se pueden observar en la Figura 97.

*Figura 98 Análisis de productos gaseosos derivados del ensayo en atmosfera inerte*



### 5.2.2 Análisis de la pirólisis cáscara de la vaina de cacao.

En la tabla 141 se muestran los rendimientos de las fracciones obtenidas en los experimentos de pirólisis en los que se varió la temperatura.

Tabla 141 Influencia de la temperatura de pirólisis sobre el rendimiento de las fracciones, análisis inmediato y PCS

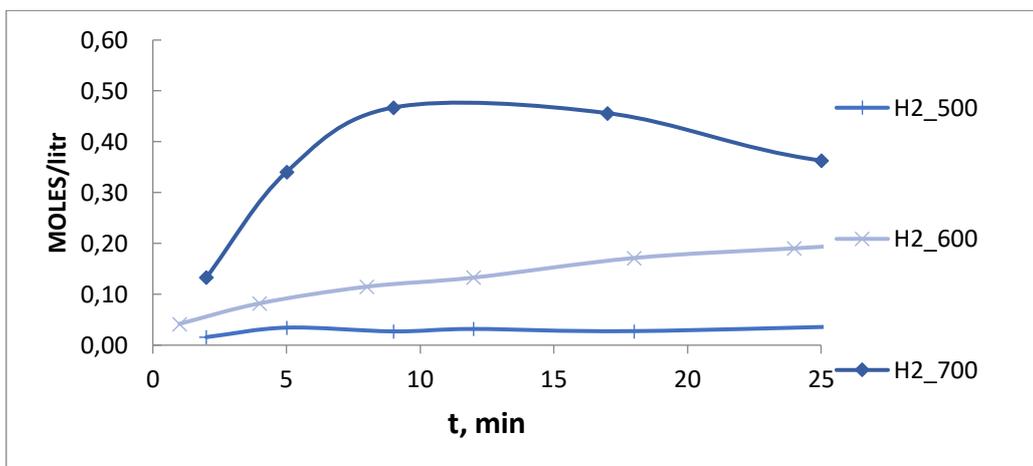
T, °C	Rendimiento de Fracciones, %			Análisis inmediato, %				PCS seco	PCS húm
	Sólida	Líquida	Gases	HU	MV	Ce	CF	MJ/kg	MJ/kg
500	41,27	33,81	24,92	22,68	5,42	10,72	61,18	24,32	24,03
600	38,53	34,73	26,73	22,5	4,28	10,75	62,47	24,15	23,12
700	35,89	31,13	32,92	22,32	4,08	10,78	68,49	24,97	24,85

Puede observarse un descenso de la fracción sólida y un incremento de la fracción gaseosa más acusado a partir de los 600°C, debido al craqueo térmico de la fracción líquida reduciéndose el rendimiento de esta a partir de dicha temperatura. Este comportamiento ha sido observado en anteriores trabajos sobre la descomposición de otros residuos agrícolas y forestales (Encinar et al., 1996; Encinar et al., 2000; González et al., 2003; González et al., 2005; González et al., 2009). En cuanto al análisis inmediato, el efecto de la temperatura observado es el típico, esto es una reducción del contenido de materia volátil y un incremento del contenido de cenizas y

carbono fijo, lo que redundará en un ligero incremento del poder calorífico superior. Este efecto ha sido observado en los anteriores trabajos antes citados.

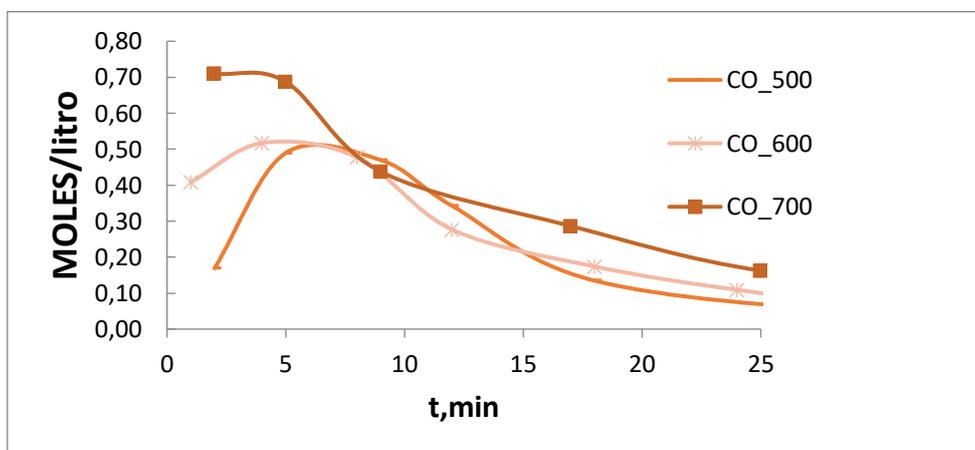
Se han analizado los gases generados en el proceso, y en las Figuras 99 a 102 se muestran la evolución en el tiempo de las concentraciones de los gases  $H_2$ ,  $CO$ ,  $CH_4$  y  $CO_2$ , respectivamente. Así, el  $H_2$  es producido por craqueo de los volátiles (de ahí su alto nivel de producción en este trabajo por encima de  $600\text{ }^\circ\text{C}$ , ver Tabla 142). El metano, el eteno y el etano (aunque en este trabajo no se han detectado estos dos últimos gases) se producen mediante reacciones de craqueo y despolimerización, el monóxido de carbono y el dióxido de carbono mediante reacciones de descarboxilación y despolimerización o reacciones de oxidación secundaria del carbono[235]. Estas reacciones se ven favorecidas al aumentar la temperatura, lo que conduce a una mayor producción de gas. Además, los gases pirolíticos pueden participar en reacciones secundarias que modifican la composición del gas de salida. Sin embargo, estas reacciones se minimizan cuando se utiliza un gas de purga para eliminar los gases producidos en la zona de reacción[236], [237] como en los presentes experimentos. Shafizadeh [238] ha informado que la hemicelulosa, representada por el xilano, se descompone principalmente en el rango de  $220$  a  $320\text{ }^\circ\text{C}$ , la celulosa en el rango de  $250$  a  $360\text{ }^\circ\text{C}$  y la lignina sufre una descomposición gradual en el rango de  $180$  a  $500\text{ }^\circ\text{C}$ . Por tanto, la distribución del producto de la pirólisis de la cáscara de la vaina de cacao dependerá de la descomposición térmica de los componentes mayoritarios.

Figura 99 Efecto de la temperatura sobre la evolución de la  $[H_2]$  con el tiempo.



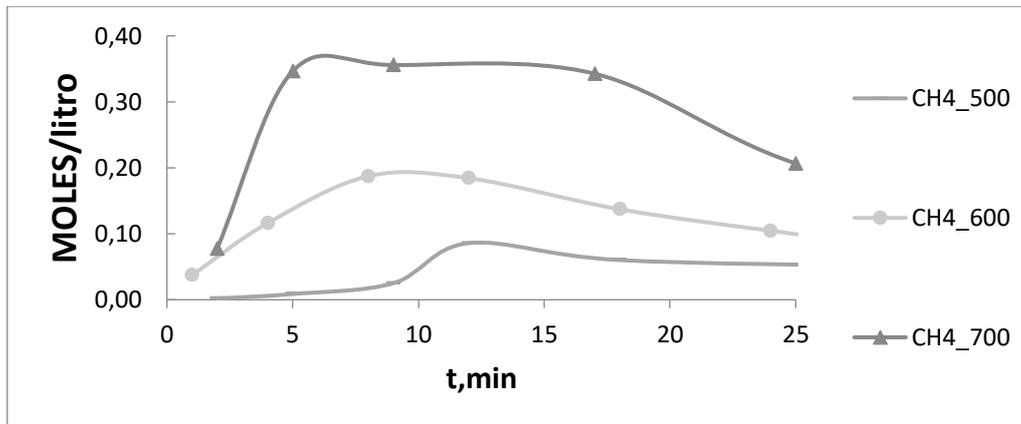
Puede apreciarse un fuerte incremento de la  $[H_2]$  con la temperatura del proceso sobre todo de 600 a 700°C, facilitando la rotura de los enlaces de  $H_2$  por efecto térmico de los productos volátiles liberados en el mismo.

Figura 100 Efecto de la temperatura sobre la evolución de la  $[CO]$  con el tiempo.



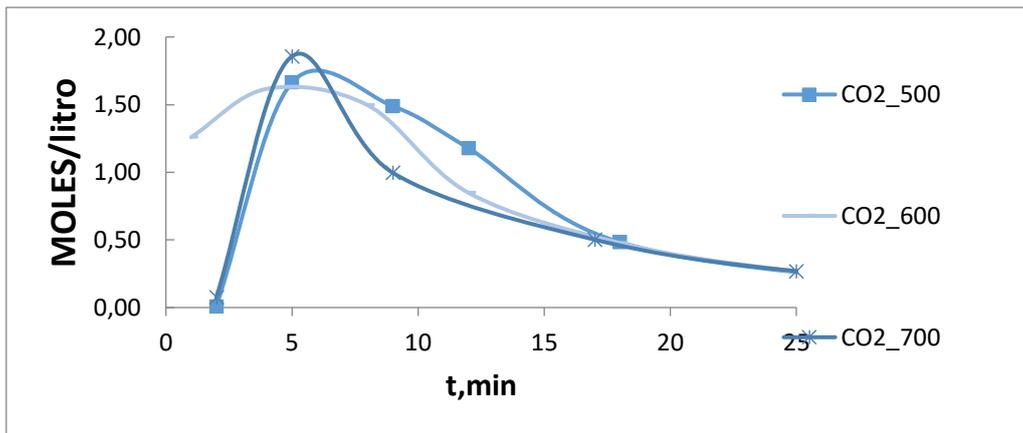
En el caso de la  $[CO]$  puede apreciarse un máximo en los primeros momentos de la reacción, donde los procesos de descarbonilación, descarboxilación y despolimerización se ven favorecidos por efecto térmico. La  $[CO]$  pasa por un máximo en los primeros minutos y posteriormente va disminuyendo con el tiempo. Similar comportamiento puede apreciarse también para el caso del  $CO_2$  (Figura 102) ya que ambos gases proceden de las mismas reacciones antes citadas.

Figura 101 Efecto de la temperatura sobre la evolución de la  $[CH_4]$  con el tiempo.



La  $[CH_4]$  pasa por un máximo en las tres temperaturas ensayadas, pero dado que este gas se produce a consecuencia de las reacciones de craqueo y despolimerización, ese máximo se mantiene prácticamente constante durante más tiempo para la temperatura de  $700^{\circ}C$ , lo que demuestra que se requieren temperaturas más altas para mantener los procesos de craqueo y despolimerización de los alquitranes generados en la descomposición térmica del material. La cáscara de la vaina de cacao presenta un comportamiento algo diferente en la generación de  $H_2$  y  $CH_4$  respecto a otras biomásas estudiadas en otros trabajos anteriores: olive and grape bagasse (Encinar et al., 1996), cardoon (Encinar et al., 2000), cherry stone (González et al., 2003), almond shells (González et al., 2005) or almond shell, walnut shell, almond tree pruning and olive stone (González et al., 2009). La generación de estos dos gases se mantiene hasta los 25 min de generación, con valores más constantes conforme aumenta la temperatura. La diferencia con los residuos antes mencionados es que el máximo de generación se produce en los primeros 10-15 minutos de la reacción y posteriormente la concentración de estos gases cae fuertemente de forma que a los 25-30 min prácticamente han desaparecido.

Figura 102 Efecto de la temperatura sobre la evolución de la  $[CO_2]$  con el tiempo.



La similitud observada en la generación de  $H_2$  y  $CH_4$ , (ver Figuras 103 y 105 donde se muestran los moles acumulados de  $H_2$  y  $CH_4$  con el tiempo, respectivamente) por un lado, y del  $CO$  y  $CO_2$  (ver Figuras 104 y 106 donde se muestran los moles acumulados de  $CO$  y  $CO_2$  con el tiempo respectivamente) por otro, ponen de manifiesto lo ya apuntado anteriormente. Esto es, mientras durante la reacción de pirólisis, los moles acumulados de  $H_2$  y  $CH_4$  crecen de forma prácticamente lineal con mayor pendiente al aumentar la temperatura, fruto de la constancia en la generación de los mismos con el tiempo durante el tiempo que duró la reacción; en el caso del  $CO$  y  $CO_2$ , dado que su concentración cae fuertemente a partir de los 15 minutos de reacción, los moles acumulados tienen tendencia a alcanzar un valor constante o plateau, más acusado a  $700^\circ C$ . Este efecto es el observado para todos los gases en los residuos antes mencionados en los trabajos previos.

En la Tabla 142 se dan las fracciones molares, el PCS del gas generado, caudal de gas generado en cada experimento y la potencia térmica generada en los mismos. De nuevo se ve el efecto comentado anteriormente respecto a los gases  $H_2$  y  $CH_4$ , por un lado, y  $CO$  y  $CO_2$ , por otro lado. Puede apreciarse un incremento de la fracción molar de los primeros y un descenso de la misma para los últimos, conforme aumenta la temperatura. El PCS, caudal de gas y potencia aumentan al aumentar la temperatura. El aumento del PCS se debe fundamentalmente al fuerte incremento tanto del  $H_2$  como del  $CH_4$  generados al aumentar la temperatura, lo que redundará en una mayor potencia térmica obtenida en el experimento.

Figura 103 Efecto de la temperatura sobre la evolución de los moles acumulados de H<sub>2</sub> con el tiempo.

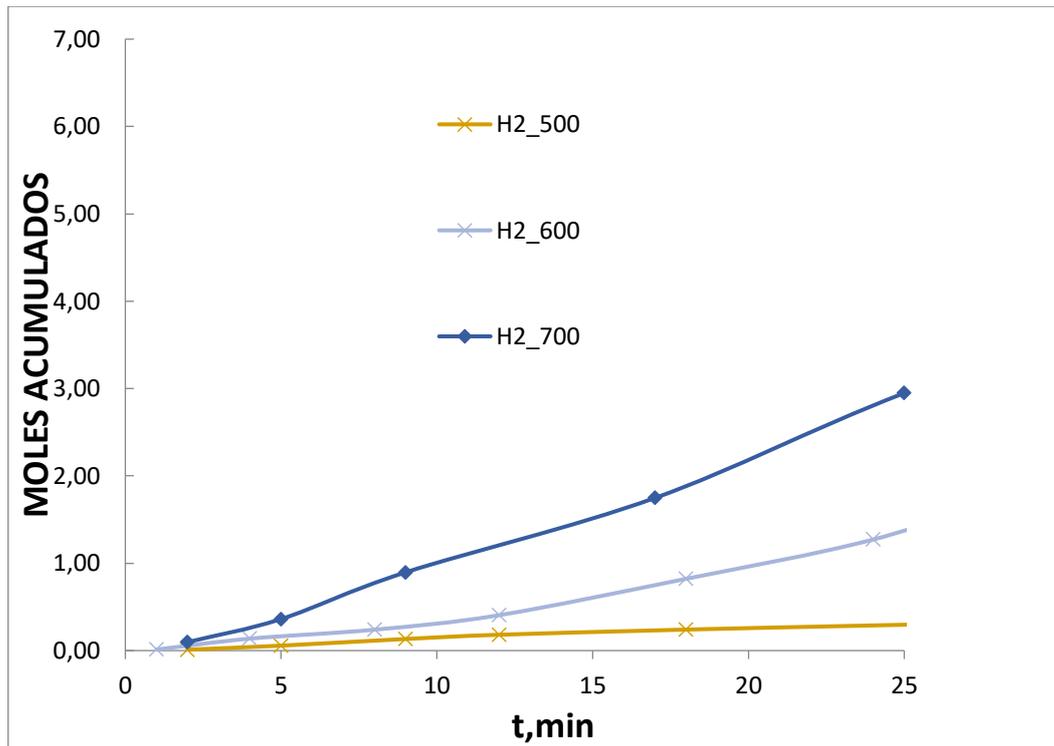


Figura 104 Efecto de la temperatura sobre la evolución de los moles acumulados de CO con el tiempo.

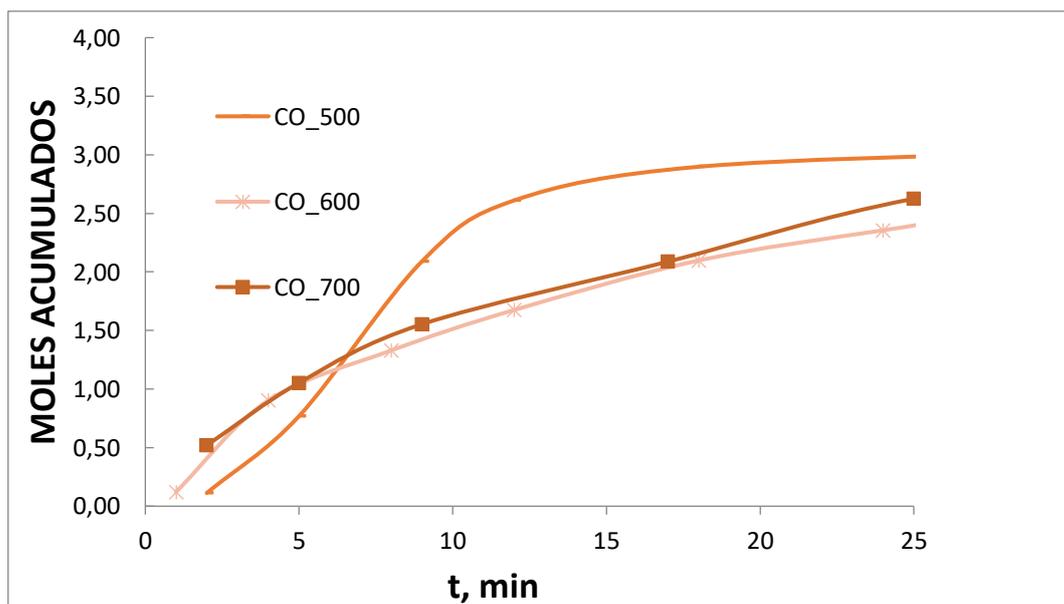


Figura 105 Efecto de la temperatura sobre la evolución de los moles acumulados de CH<sub>4</sub> con el tiempo.

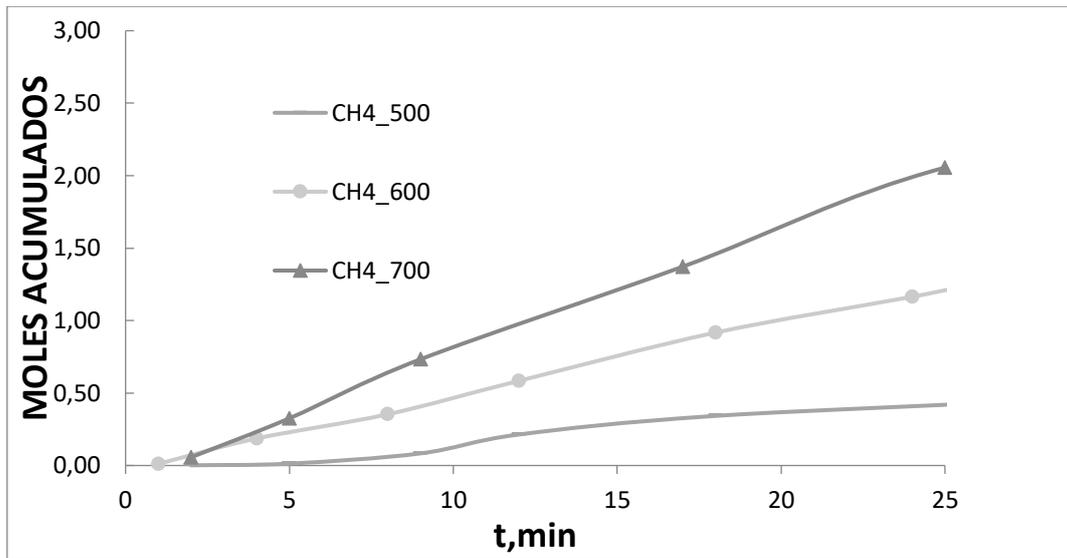


Figura 106 Efecto de la temperatura sobre la evolución de los moles acumulados de CO<sub>2</sub> con el tiempo.

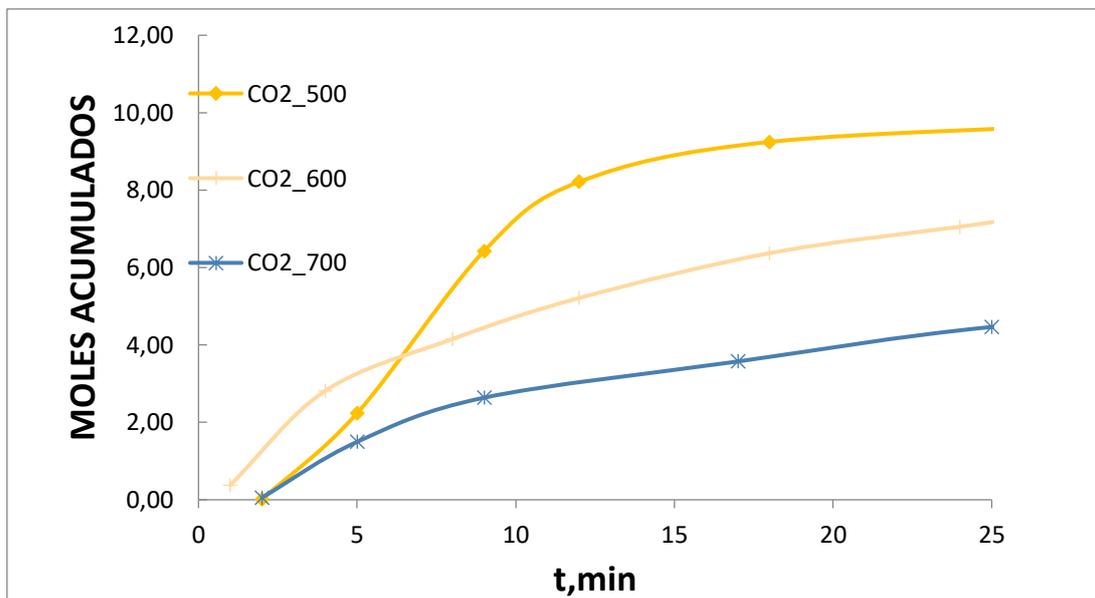


Tabla 142 Efecto de la temperatura sobre las fracciones molares de los gases generados, PCS, caudal de gas y potencia.

T, °C	Fracciones molares (%)					PCS, kcal/m <sup>3</sup> N	Q <sub>gas</sub> , ml/min	Potencia, W
	H <sub>2</sub>	CO	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>			
500	0,89	4,32	1,07	79,49	14,22	259,70	203,43	3,69
600	4,44	2,96	1,92	81,61	9,07	407,26	204,33	5,81
700	8,25	4,87	4,02	74,70	8,16	780,83	209,89	11,44

### 5.2.3 Análisis de la gasificación con aire de la cáscara de la vaina de cacao.

En la Tabla 143 se muestra el efecto de la temperatura sobre el rendimiento del carbón obtenido en el proceso de gasificación con aire, así como su análisis inmediato y PCS en base seca y húmeda. Puede observarse una reducción del rendimiento del carbón al aumentar la temperatura. En cuanto al análisis inmediato, se reduce el contenido de materia volátil, un ligero incremento del contenido de cenizas y muy poca influencia en el contenido de carbono fijo, de ahí el escaso efecto producido tanto en el PCS en base seca como húmeda. Los rendimientos de residuo sólido obtenidos aquí son superiores a los obtenidos en un trabajo anterior sobre piel de cáscara de almendra (González et al., 2006), aunque los valores de PCS eran muy similares a los obtenidos en este trabajo, concretamente para temperaturas de 650-800°C se obtuvieron PCS de los carbones entre 21,1-21,7 MJ/kg[239].

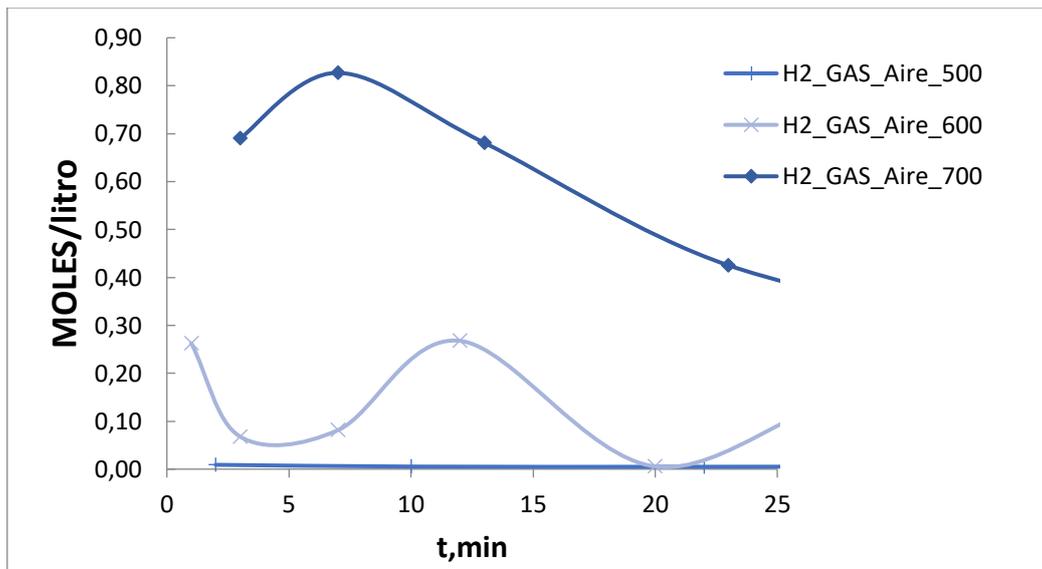
Tabla 143 Efecto de la temperatura de gasificación sobre el rendimiento, análisis inmediato y PCS seco y en base húmeda del carbón obtenido.

T, °C	Rendimiento, %	Análisis inmediato, %				PCS Seco MJ/kg	PCS Húm. MJ/kg
		Sólida	HU	MV	Ce		
500	39,60	22,56	5,4	10,89	62,82	21,52	20,00
600	35,07	22,78	4,18	10,96	62,08	22,80	21,83
700	33,82	22,34	3,99	11,15	62,52	21,48	20,21

En la Figura 107 se muestra la evolución de la {H<sub>2</sub>} con el tiempo, observándose un incremento de la misma al aumentar la temperatura. Hay que indicar que este gas en un proceso de gasificación con aire tiene un origen pirolítico, de ahí que los moles

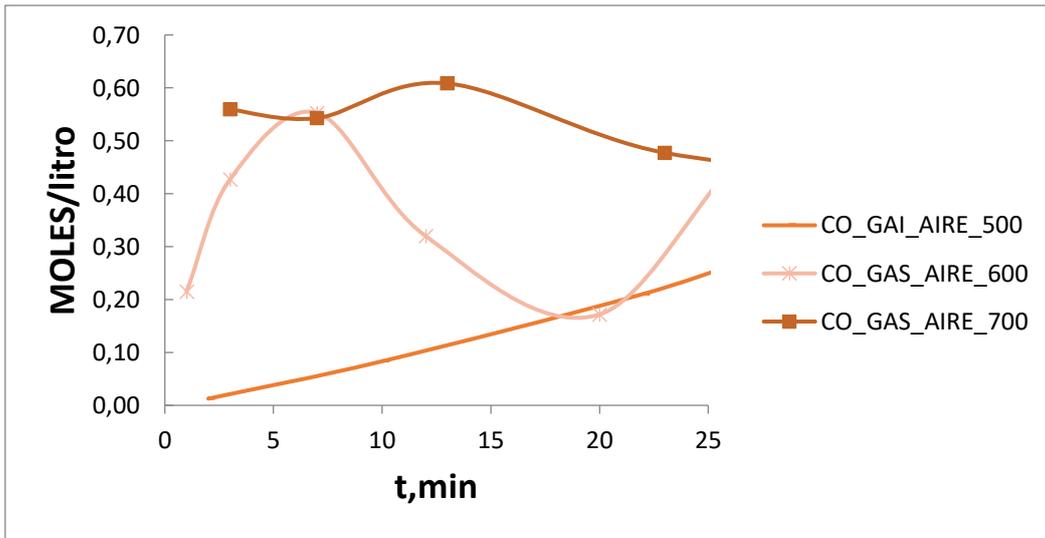
acumulados del mismo con el tiempo (ver Figura 111) tengan también prácticamente un perfil lineal muy similar al obtenido para los experimentos de pirólisis (comparar con Figura 103).

Figura 107 Efecto de la temperatura sobre la evolución de la  $[H_2]$  con el tiempo.



En la Figura 108 se muestra la evolución de la  $[CO]$  con el tiempo, observándose que a partir de los 600°C hay una tendencia a que el proceso de gasificación se mantenga a partir de la reacción  $C + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow CO$ , de ahí que a 700°C la  $[CO]$  se mantenga bastante constante durante todo el experimento. También puede deberse a que haya una ligera contribución de la reacción de Boudouard:  $C + CO_2 = 2 CO$ , dado que puede observarse a la temperatura de 700°C una disminución de la  $[CO_2]$  con el tiempo (ver Figura 110).

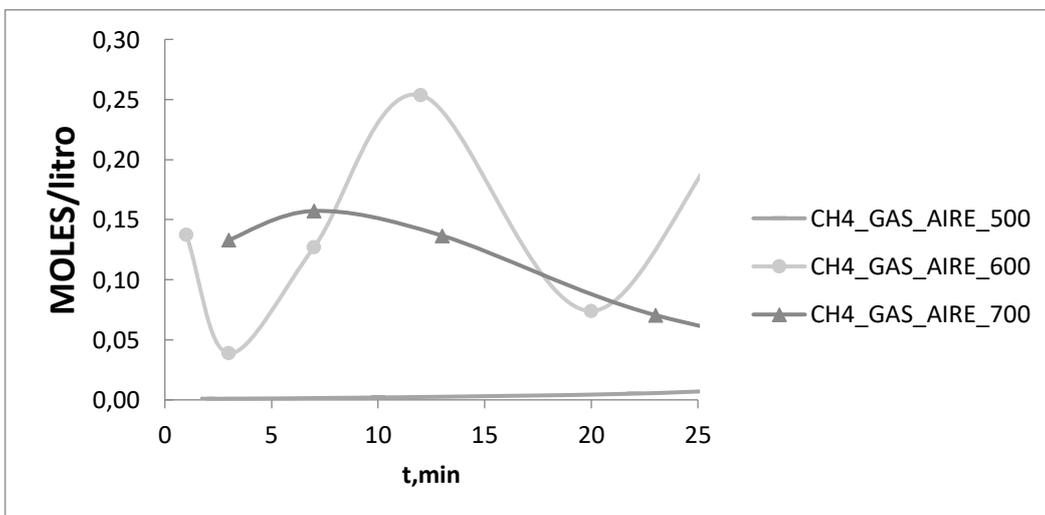
Figura 108 Efecto de la temperatura sobre la evolución de la [CO] con el tiempo.



En la Figura 109 se muestra el efecto de la temperatura de gasificación con aire sobre la evolución de la [CH<sub>4</sub>] con el tiempo. Hay que indicar, por un lado, que este gas también tiene un origen pirolítico, y, por otro lado, si se compara con la evolución de la concentración de este gas con el tiempo para los experimentos pirolíticos (Figura 111) puede apreciarse una fuerte reducción, por lo que puede estar participando en otras reacciones, disminuyendo su concentración. Entre ellas pueden estar:

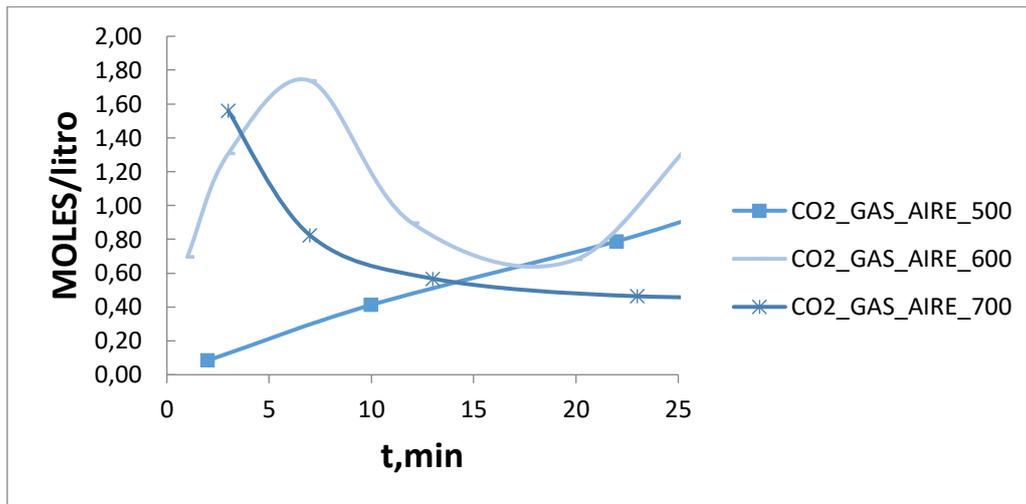


Figura 109 Efecto de la temperatura sobre la evolución de la [CH<sub>4</sub>] con el tiempo.



En la Figura 110 se muestra la evolución de la  $[CO_2]$  con el tiempo, observándose, por un lado, una disminución clara de la concentración de este gas respecto a las obtenidas en los experimentos prolíticos (Figura 102), y, por otro lado, parece indicar que la reacción  $C + O_2 \rightarrow CO_2$  no debe tener mucha contribución en la composición del gas del proceso global de gasificación con aire de la vaina de cáscara de cacao.

Figura 110 Efecto de la temperatura sobre la evolución de la  $[CO_2]$  con el tiempo



En las Figuras 111-114 se representan los moles acumulados de los gases  $H_2$ ,  $CO$ ,  $CH_4$  y  $CO_2$  con el tiempo, respectivamente. Dichas Figuras pueden discutirse de acuerdo con lo ya comentado anteriormente, teniendo en cuenta por un lado que dos de los gases tienen origen pirolítico y que además pueden reaccionar con el agente gasificante para dar otros gases que pueden a su vez a dar lugar a reacciones secundarias que pueden modificar la composición del gas resultante. Para ello, se intentará a continuación conocer la preponderancia de las reacciones que pueden ocurrir en el proceso de gasificación con aire para analizar el gas generado en cada experimento.

Figura 111 Efecto de la temperatura sobre la evolución de los moles acumulados de H<sub>2</sub> con el tiempo.

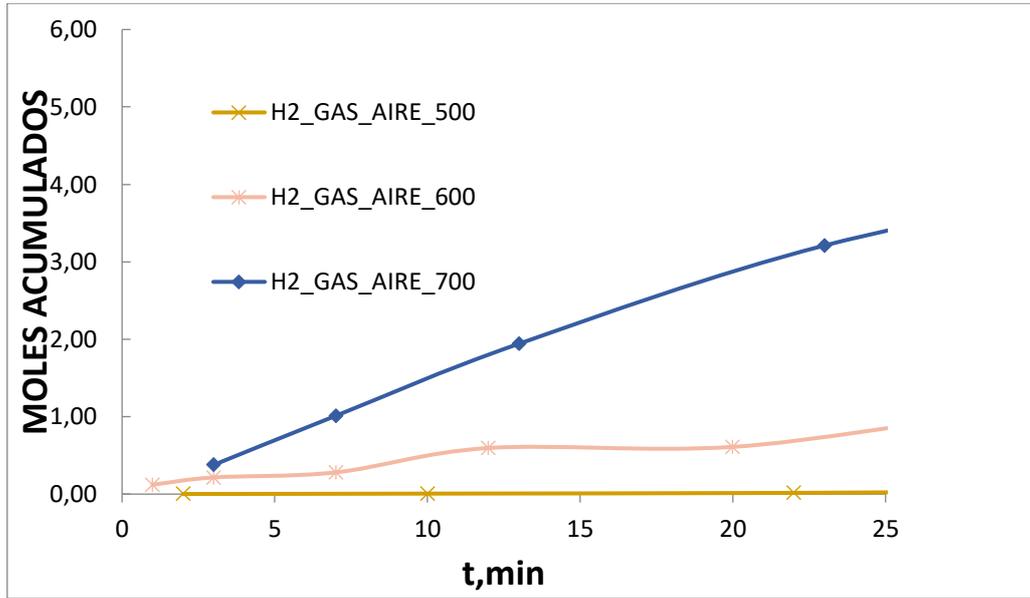


Figura 112 Efecto de la temperatura sobre la evolución de los moles acumulados de CO con el tiempo.

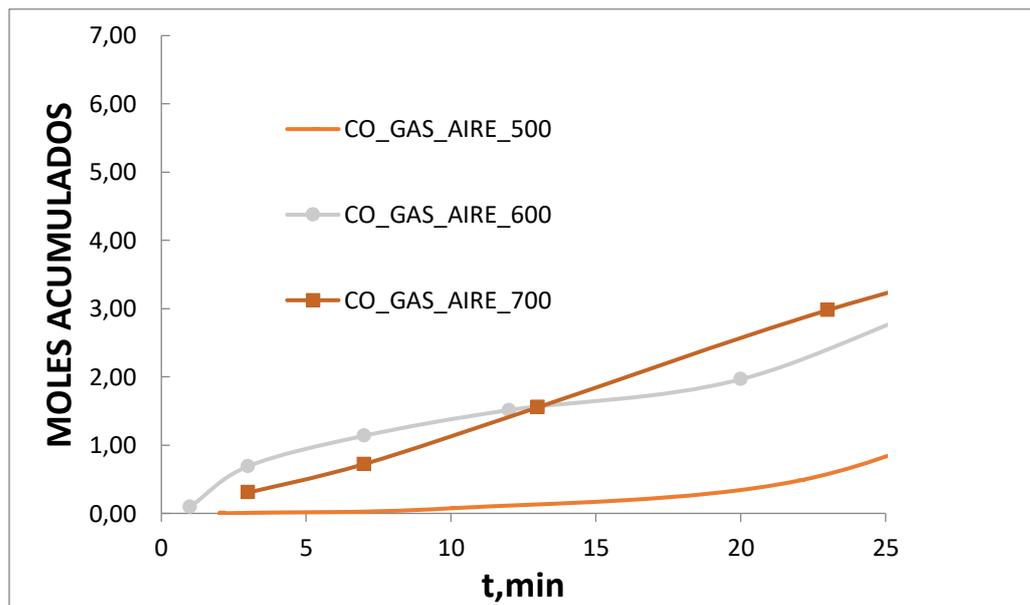


Figura 113 Efecto de la temperatura sobre la evolución de los moles acumulados de CH<sub>4</sub> con el tiempo.

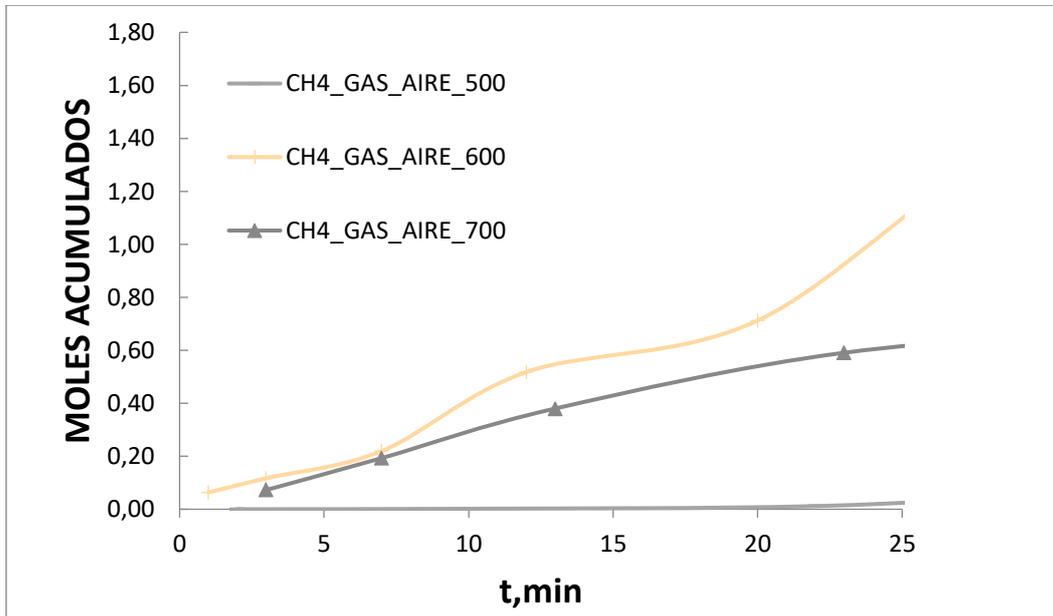
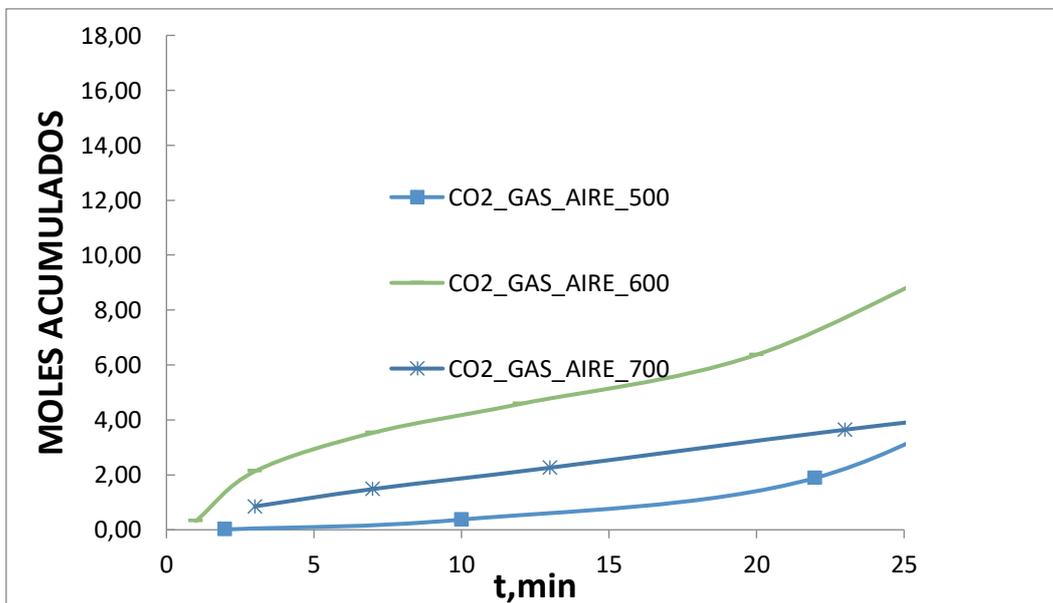


Figura 114 Efecto de la temperatura sobre la evolución de los moles acumulados de CO<sub>2</sub> con el tiempo.



Es generalmente aceptado que el proceso de gasificación de biomasa ocurre a través de los siguientes tres pasos[240]. El paso de desvolatilización o pirólisis es la primera etapa y produce materia volátil y un residuo. Entonces, las reacciones secundarias tienen lugar envolviendo los productos volátiles. Finalmente, las reacciones de



Finalmente, y para intentar discernir las reacciones que tienen lugar en el proceso de gasificación con aire de la vaina de la cáscara de cacao, en las Figuras 115 a 118 se muestran la evolución de los ratios  $\text{CO}/\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2/\text{CO}$ ,  $\text{H}_2/\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2/\text{CH}_4$  con el tiempo, respectivamente. Puede observarse, que para 500 y 600°C el ratio  $\text{CO}/\text{CO}_2$  prácticamente se mantiene constante en valores de 0,2-0,3, sin embargo, para 700°C se observa un fuerte incremento de dicho ratio por encima de 1 y se mantiene constante cercano a dicho valor, lo que indica que la reacción (2) se hace más favorable frente a la reacción (1). Para las temperaturas de 500 y 600°C se producen con la misma intensidad ambas reacciones lo que implica que el ratio permanezca prácticamente constante a lo largo de los experimentos.

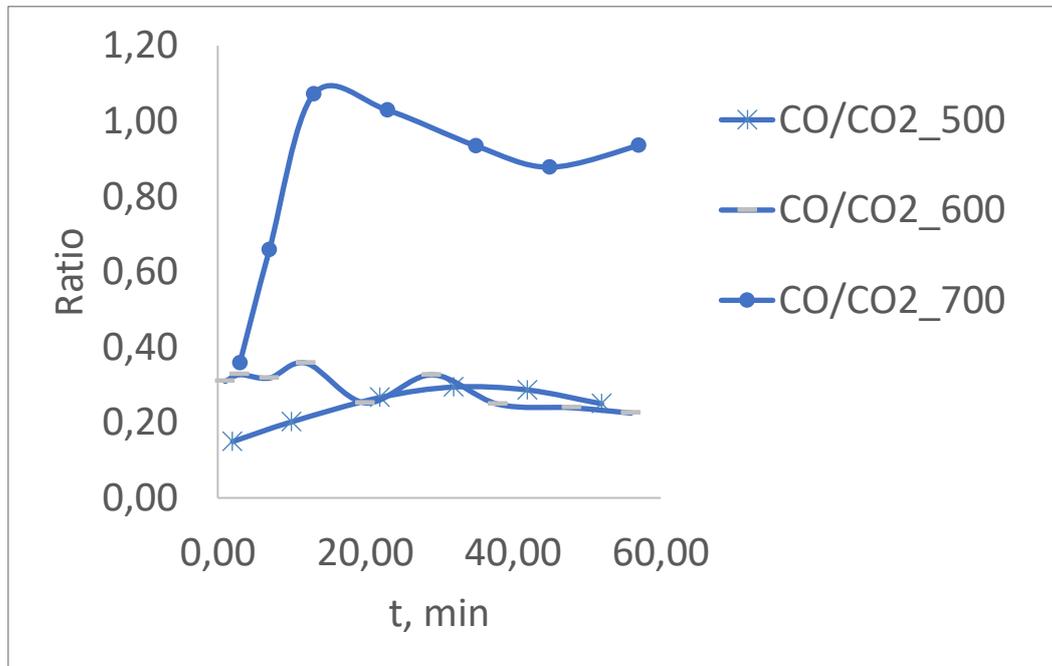
*Tabla 144 Efecto de la temperatura sobre las fracciones molares de los gases generados, PCS, caudal de gas y potencia[239][246]*

T, °C	Fracciones molares (%)						PCS, MJ/m <sup>3</sup> N	Q <sub>gas</sub> , ml/min	Potencia, W
	H <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	CO	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>			
500	0,23	1,47	6,15	0,22	70,66	22,75	0,89	203,43	3,03
600	1,70	10,62	7,43	2,66	62,75	25,46	2,21	226,18	8,35
700	9,98	1,18	11,77	1,52	63,01	13,72	3,36	238,69	13,39
800 <sup>a</sup>	12,03	3,52	13,71	3,96	54,21	11,27	5,3		
750 <sup>a</sup>	11,39	3,30	14,01	2,75	57,73	10,16	4,3		
700 <sup>a</sup>	10,10	3,72	12,53	2,66	62,05	8,23	3,9		
650 <sup>a</sup>	8,35	4,85	10,83	1,14	66,85	6,54	3,6		
660-	3,25-	0,01-	12,5-	1,84-	56,7-	14,5-	3,1-		
830 <sup>b</sup>	4,00	0,08	19,9	2,90	64,2	17,4	5,03		

Finalmente, y para intentar discernir las reacciones que tienen lugar en el proceso de gasificación con aire de la vaina de la cáscara de cacao, en las Figuras 115 a 118 se muestran la evolución de los ratios  $\text{CO}/\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2/\text{CO}$ ,  $\text{H}_2/\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2/\text{CH}_4$  con el tiempo, respectivamente. Puede observarse, que para 500 y 600°C el ratio  $\text{CO}/\text{CO}_2$  prácticamente se mantiene constante en valores de 0,2-0,3, sin embargo, para 700°C se observa un fuerte incremento de dicho ratio por encima de 1 y se mantiene constante cercano a dicho valor, lo que indica que la reacción (2) se hace más favorable frente a la reacción (1). Para las temperaturas de 500 y 600°C se producen

con la misma intensidad ambas reacciones lo que implica que el ratio permanezca prácticamente constante a lo largo de los experimentos.

Figura 115 Efecto de la temperatura sobre el ratio CO/CO<sub>2</sub> con el tiempo.



Observando las Figuras 117 y 117, puede concluirse que a 500 y 600°C no se están produciendo las reacciones water gas y water-gas-shift (4, 5 y 7), dado que los ratios en cuestión, en general, tienen tendencia a disminuir con el tiempo. Sin embargo, para 700°C, en los primeros momentos de la reacción se observa un incremento en ambos ratios, lo que implica una posible participación de las reacciones comentadas, a consecuencia de la liberación de humedad por parte de la biomasa, lo que implica la presencia de vapor de agua y, por tanto, favorecer dichas reacciones.

Figura 116 Efecto de la temperatura sobre el ratio H<sub>2</sub>/CO con el tiempo.

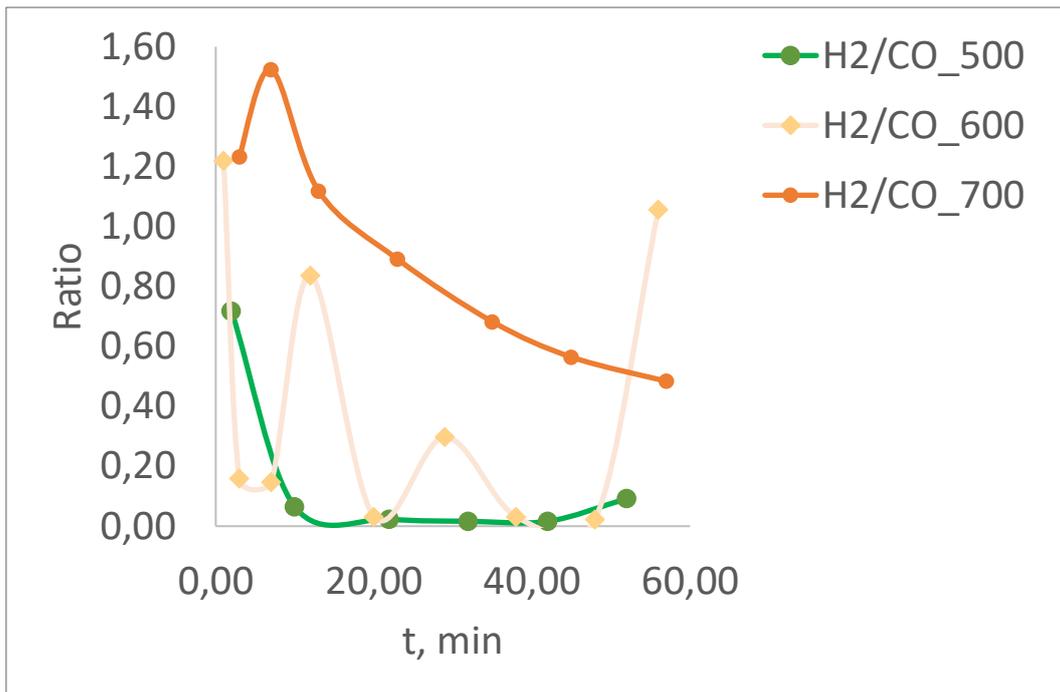
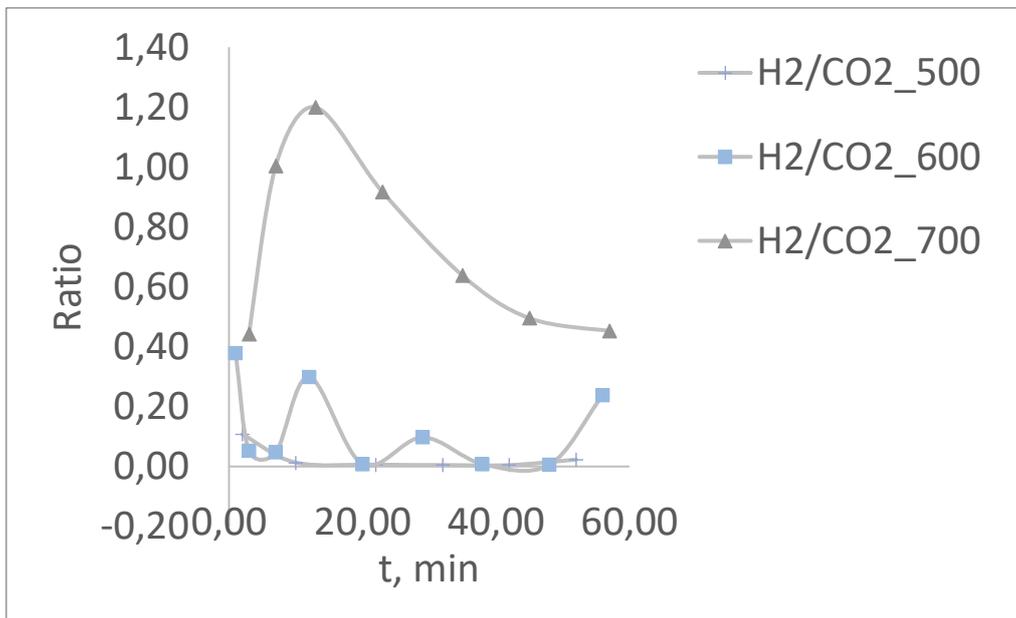


Figura 117 Efecto de la temperatura sobre el ratio H<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> con el tiempo.

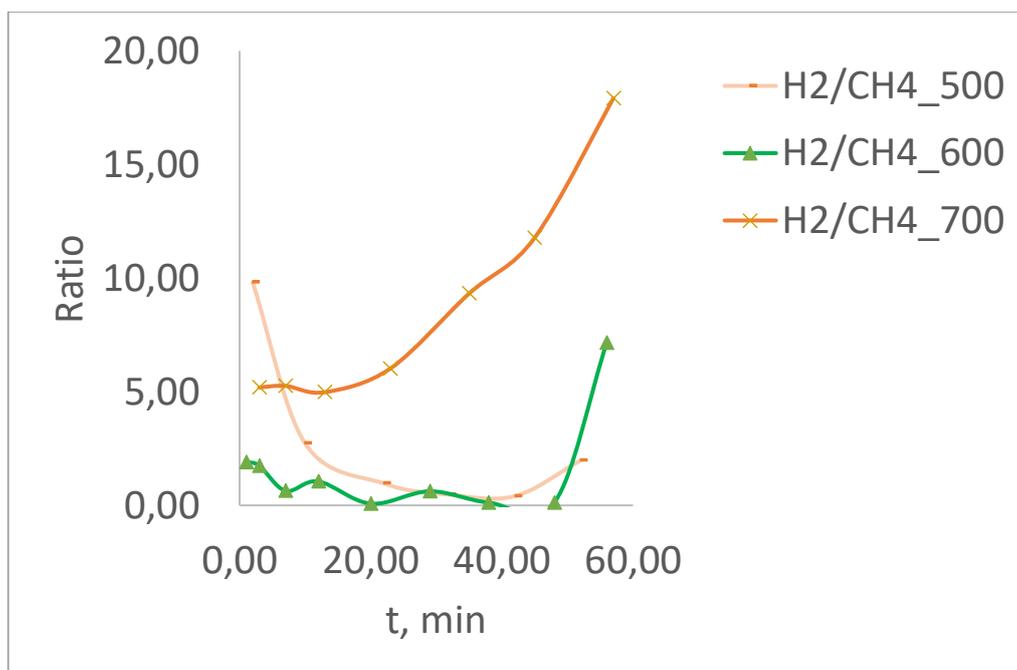


Observando la Figura 118 se aprecia una reducción del ratio H<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> para las temperaturas de 500 y 600°C, lo que implica nula participación de la reacción de reforming del CH<sub>4</sub>, sin embargo, a 700°C se observa un fuerte incremento de este ratio lo que podría indicar cierta participación de la reacción (8), dada la disminución

de la  $[CH_4]$  y el fuerte incremento de la  $[H_2]$ , a través de las fracciones molares obtenidas de estos gases. También en el incremento de la  $[H_2]$  pueden influir las reacciones antes comentadas water-gas y water-gas-shift (4, 5 y 7).

La reacción de hidrogasificación (6) no se da en el proceso de gasificación con aire de la vaina de cáscara de cacao, dada la temperatura usada, y a que no se observa en ningún momento incremento de la  $[CH_4]$ . Para que se produzca esta reacción se requieren temperaturas más altas a las utilizadas en este trabajo, o bien la presencia de un catalizador.

Figura 118 Efecto de la temperatura sobre la evolución de los moles acumulados de  $H_2/CH_4$  con el tiempo.



## 6. CONCLUSIONES.

1. La mezcla E5 muestra una disminución en el poder calorífico inferior a medida que se incrementa el porcentaje de bioetanol, lo que sugiere la importancia de encontrar el equilibrio adecuado en la composición de biocombustibles.
2. La combinación de etanol con gasolina se muestra como una opción más eficiente que el uso exclusivo de gasolina en motores de combustión interna, lo que sugiere la relevancia de la diversificación de fuentes de energía en el sector del transporte.
3. El poder calorífico inferior del biocombustible E5 es menor al de las gasolinas convencionales, debido a la inclusión de bioetanol, lo que puede influir en su rendimiento en motores de combustión interna.
4. La presencia de bioetanol derivado del mucílago del cacao en el biocombustible E5 puede contribuir a la producción de gasolina ecopaís en Ecuador, fomentando la utilización de fuentes locales y sostenibles.
5. El biocombustible E5 cumple con la normativa INEN 935, lo que lo posiciona como una alternativa viable para su uso a gran escala, garantizando su calidad y seguridad en aplicaciones comerciales.
6. La menor generación de oxígeno residual con el biocombustible E5 sugiere una mayor eficiencia de combustión en comparación con combustibles convencionales, lo que puede traducirse en una reducción de emisiones contaminantes.
7. La eficiencia de la combustión en motores alimentados con etanol supera a la de los motores alimentados con gasolina, según estudios previos, lo que respalda la viabilidad de los biocombustibles en la mejora de la eficiencia energética.
8. La eficiencia energética y exergética del biocombustible E5 respalda su viabilidad como una opción sostenible en términos de rendimiento, lo que subraya la importancia de considerar aspectos energéticos en la evaluación de biocombustibles.
9. La presencia de etanol en la mezcla de combustión puede reducir las irreversibilidades y mejorar la eficiencia exergética del motor, lo que destaca la importancia de considerar la composición de los biocombustibles en el diseño de sistemas de propulsión.

10. La recuperación de exergía de los gases de escape puede ser crucial para mejorar la eficiencia global de los motores alimentados con biocombustibles, lo que resalta la importancia de tecnologías de recuperación de energía en aplicaciones automotrices.
11. La eficiencia exergética del biocombustible E5 en motores de combustión interna respalda su potencial para reducir emisiones y mejorar la eficiencia global del sistema, lo que sugiere beneficios ambientales y económicos en su implementación.
12. La mezcla E5, con un contenido de bioetanol del 5%, muestra un equilibrio entre rendimiento y cumplimiento de normativas en comparación con gasolinas convencionales, lo que destaca su potencial como una alternativa viable en el mercado de combustibles.
13. La investigación sobre el aprovechamiento del mucílago del cacao en biocombustibles destaca su potencial como una fuente renovable y sostenible de energía, lo que resalta la importancia de explorar nuevas fuentes de biomasa para la producción de biocombustibles.
14. La integración de tecnologías innovadoras en la producción y utilización de biocombustibles puede contribuir significativamente a la transición hacia un sistema energético más sostenible y respetuoso con el medio ambiente, lo que resalta la importancia de la innovación en la búsqueda de soluciones energéticas sostenibles.
15. La diversificación de fuentes de biomasa para la producción de biocombustibles es fundamental para garantizar la sostenibilidad y la eficiencia en el sector energético, lo que destaca la importancia de considerar múltiples opciones en la producción de energía a partir de biomasa.
16. El análisis elemental de la biomasa de la cáscara de la vaina del cacao revela un contenido significativo de carbono (45,50%), lo que sugiere un alto potencial energético debido a su naturaleza orgánica.
17. La baja humedad en la muestra de biomasa (12,71%) indica una adecuada sequedad, lo cual es favorable para procesos de combustión eficientes.
18. La alta proporción de volátiles en la biomasa de la cáscara de la vaina del cacao la posiciona como un material idóneo para la generación de energía, destacando su potencial como fuente renovable.

19. La presencia de un porcentaje elevado de cenizas en la biomasa puede requerir sistemas de combustión de alta temperatura para mejorar la eficiencia en la combustión, lo que resalta la importancia de tecnologías avanzadas en su aprovechamiento.
20. La presencia de carbono como componente principal en la biomasa de la cáscara de la vaina del cacao la posiciona como un recurso valioso para la producción de biocombustibles, resaltando su potencial como fuente de energía renovable.
21. La biomasa de la cáscara de la vaina del cacao presenta similitudes en su composición elemental con otras fuentes de biomasa, lo que sugiere un potencial similar para la generación de energía, destacando la versatilidad de este recurso.
22. La implementación de sistemas de combustión adecuados puede ser crucial para maximizar la eficiencia en la utilización de la biomasa de la cáscara de la vaina del cacao, lo que destaca la importancia de tecnologías avanzadas en la conversión de biomasa.
23. La temperatura de pirólisis de la cáscara de la vaina de cacao influye significativamente en los rendimientos de las fracciones sólida, líquida y gaseosa, con una disminución general de los rendimientos a medida que la temperatura aumenta.
24. El análisis inmediato de la muestra revela una reducción del contenido de materia volátil y un aumento del contenido de cenizas y carbono fijo con el incremento de la temperatura de pirólisis, lo que impacta en la composición química de los productos obtenidos.
25. El poder calorífico superior de la cáscara de la vaina de cacao experimenta un ligero incremento con el aumento de la temperatura de pirólisis, lo que sugiere una mayor eficiencia energética en la conversión de la biomasa a biocombustibles.
26. La evolución de los gases generados durante la pirólisis muestra un aumento en la producción de hidrógeno por encima de 600 °C, indicando la importancia del craqueo de los volátiles en la generación de este gas.
27. La presencia de metano, monóxido de carbono y dióxido de carbono en los gases generados sugiere la ocurrencia de reacciones de descarboxilación,

despolimerización y oxidación secundaria durante la pirólisis de la cáscara de la vaina de cacao.

28. La relación CO/CO<sub>2</sub> en los gases generados muestra un cambio significativo a 700 °C, indicando una mayor favorabilidad de la reacción de conversión de monóxido de carbono a dióxido de carbono a temperaturas más altas.
29. La evolución de los ratios H<sub>2</sub>/CO, H<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> con el tiempo revela diferencias en la producción de hidrógeno y metano en función de la temperatura de pirólisis, lo que sugiere variaciones en las reacciones predominantes.
30. La desvolatilización y la gasificación del residuo carbonoso remanente con vapor de agua y CO<sub>2</sub> son etapas clave en el proceso de pirólisis de la cáscara de la vaina de cacao, con la generación de productos gaseosos importantes para la valorización energética de la biomasa.
31. El incremento de la temperatura durante la pirólisis conduce a una disminución en el rendimiento de sólidos debido a la eliminación de volátiles y a la reacción del carbón con el oxígeno del aire, lo que impacta en la eficiencia global del proceso.
32. Los resultados obtenidos en este estudio proporcionan información valiosa para el diseño y la optimización de procesos de combustión, pirólisis y gasificación de la cáscara de la vaina de cacao, contribuyendo al desarrollo sostenible de tecnologías de conversión de biomasa en biocombustibles.

## 7. BIBLIOGRAFÍA.

- [1] P. R. and M. R. (2020) Hannah Ritchie, “ ‘Energy Production and Consumption’ Published online at OurWorldInData.org. Retrieved from: ‘<https://ourworldindata.org/energy-production-consumption>’ [Online Resource].”
- [2] Y. K. Hwang, “The synergy effect through combination of the digital economy and transition to renewable energy on green economic growth: Empirical study of 18 Latin American and caribbean countries,” *J Clean Prod*, vol. 418, p. 138146, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.jclepro.2023.138146.
- [3] N. V. Emodi, J. N. Inekwe, and A. Zakari, “Transport infrastructure, CO2 emissions, mortality, and life expectancy in the Global South,” *Transp Policy (Oxf)*, vol. 128, pp. 243–253, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.tranpol.2022.09.025.
- [4] R. N. Acharya and R. Perez-Pena, “Role of comparative advantage in biofuel policy adoption in Latin America,” *Sustainability (Switzerland)*, vol. 12, no. 4, Feb. 2020, doi: 10.3390/su12041411.
- [5] J. F. González, A. Álvarez Murillo, Á. González Arroyo, and S. Nogales-Delgado, “Glycerol Steam Reforming in a Pilot Plant: Effect of Temperature and Catalyst Load,” *Applied Sciences*, vol. 13, no. 18, p. 10376, Sep. 2023, doi: 10.3390/app131810376.
- [6] G. Hernández Soto, “The role of foreign direct investment and green technologies in facilitating the transition toward green economies in Latin America,” *Energy*, vol. 288, p. 129933, Feb. 2024, doi: 10.1016/j.energy.2023.129933.
- [7] NASA, “<https://data.giss.nasa.gov/gistemp/>.”
- [8] “In partnership with Statistical Review of World Energy 2023 | 72 nd edition.”
- [9] C. Dominguez, E. Kakkos, D. Gross, R. Hischier, and K. Orehounig, “Renovated or replaced? Finding the optimal solution for an existing building considering cumulative CO2 emissions, energy consumption and costs – A case study,” *Energy Build*, vol. 303, p. 113767, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.enbuild.2023.113767.
- [10] J. Li, F. Xiong, M. Fan, and Z. Chen, “The role of nonfood bioethanol production in neutralizing China’s transport carbon emissions: An integrated life cycle environmental-economic assessment,” *Energy for Sustainable Development*, vol. 70, pp. 68–77, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.esd.2022.06.002.
- [11] N. Fatras, Z. Ma, H. Duan, and B. N. Jørgensen, “A systematic review of electricity market liberalisation and its alignment with industrial consumer participation: A comparison between the Nordics and China,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 167. Elsevier Ltd, Oct. 01, 2022. doi: 10.1016/j.rser.2022.112793.
- [12] Organización Latinoamericana de Energía OLADE, *Panorama Energético 2023 Organización Latinoamericana de Energía (OLADE)*. 2023.
- [13] C. Hutter and E. Weber, “Russia–Ukraine war: A note on short-run production and labour market effects of the energy crisis,” *Energy Policy*, vol. 183, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.enpol.2023.113802.
- [14] U. K. Pata, S. Erdogan, and B. Ozcan, “Evaluating the role of the share and intensity of renewable energy for sustainable development in Germany,” *J Clean Prod*, vol. 421, p. 138482, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.jclepro.2023.138482.

- [15] J. Flottmann, "Australian energy policy decisions in the wake of the 2022 energy crisis," *Econ Anal Policy*, vol. 81, pp. 238–248, Mar. 2024, doi: 10.1016/J.EAP.2023.11.025.
- [16] A. International Renewable Energy Agency, "IRENA (2023), Renewable Power Generation Costs in 2022".
- [17] R. Alvarado *et al.*, "Ecological footprint, economic complexity and natural resources rents in Latin America: Empirical evidence using quantile regressions," *J Clean Prod*, vol. 318, p. 128585, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.128585.
- [18] C. Ghirelli, J. J. Pérez, and A. Urtasun, "The spillover effects of economic policy uncertainty in Latin America on the Spanish economy," *Latin American Journal of Central Banking*, vol. 2, no. 2, p. 100029, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.latcb.2021.100029.
- [19] O. Ugarteche, C. de León, and J. García, "China and the energy matrix in Latin America: Governance and geopolitical perspective," *Energy Policy*, vol. 177, p. 113435, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.enpol.2023.113435.
- [20] H. Adun, J. D. Ampah, O. Bamisile, Y. Hu, and I. Staffell, "Ambitious near-term decarbonization and direct air capture deployment in Latin America's net-zero goal," *Energy for Sustainable Development*, vol. 77, p. 101338, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.esd.2023.101338.
- [21] L. Miguel Galindo, J. Samaniego, J. Eduardo Alatorre, J. Ferrer Carbonell Orlando Reyes RESUMEN, J. Eduardo, and J. Ferrer, "Meta-análisis de las elasticidades ingreso y precio de la demanda de gasolina: implicaciones de política pública para América Latina."
- [22] M. A. Ise, S. C. Carrizo, and M. Forget, "Challenges of South American energy transition: energy efficiency and distributed generation," in *The Regulation and Policy of Latin American Energy Transitions*, Elsevier, 2020, pp. 133–151. doi: 10.1016/B978-0-12-819521-5.00008-5.
- [23] Ministerio de Energía y Minas de Ecuador, "BALANCE ENERGÉTICO NACIONAL 2022." [Online]. Available: [www.recursosyenergia.gob.ec](http://www.recursosyenergia.gob.ec)
- [24] Banco Central del Ecuador, "Evolución de la Balanza Comercial por Productos Enero, Mayo 2023," 2023. Accessed: Dec. 30, 2023. [Online]. Available: <https://contenido.bce.fin.ec/documentos/Estadisticas/SectorExterno/BalanzaPagos/balanzaComercial/ebc202307.pdf>
- [25] Banco Central del Ecuador, "Análisis del sector petrolero Resultados Cuarto Trimestre 2022," 2022, Accessed: Dec. 30, 2023. [Online]. Available: <https://contenido.bce.fin.ec/documentos/Estadisticas/Hidrocarburos/ASP202202.pdf>
- [26] Ministerio de Economía y Finanzas 2022, "SUBSIDIOS PROFORMA PRESUPUESTARIA 2023." Accessed: Dec. 30, 2023. [Online]. Available: [https://www.finanzas.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2022/10/Anexo-3\\_Subsidios-2023.pdf](https://www.finanzas.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2022/10/Anexo-3_Subsidios-2023.pdf)
- [27] F. Schaffitzel, M. Jakob, R. Soria, A. Vogt-Schilb, and H. Ward, "Can government transfers make energy subsidy reform socially acceptable? A case study on Ecuador," *Energy Policy*, vol. 137, p. 111120, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.enpol.2019.111120.
- [28] C. F. Terneus Páez and O. Viteri Salazar, "Analysis of agro-food transport in Ecuador faced with a possible reduction in the subsidy of diesel," *Energy Policy*, vol. 144, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.enpol.2020.111713.

- [29] Banco Central del Ecuador, "Estudio de los impactos macroeconómicos de mantener el crudo del Bloque 43-ITT indefinidamente en el subsuelo." Accessed: Dec. 30, 2023. [Online]. Available: <https://contenido.bce.fin.ec/documentos/PublicacionesNotas/Catalogo/Apuntes/ae74.pdf>
- [30] Ministerio de Energía y Minas de Ecuador, "Plan Maestro de Electrificación 2018-2027." Accessed: Jan. 02, 2024. [Online]. Available: <https://www.celec.gob.ec/transelectric/plan-maestro-de-electricidad-2012-2022/#:~:text=El%20Plan%20Maestro%20de%20Electricidad,del%20sector%20el%C3%A9ctrico%20del%20Ecuador.>
- [31] S. Nogales-Delgado, J. M. Encinar, and J. F. González, "Safflower Biodiesel: Improvement of its Oxidative Stability by Using BHA and TBHQ," *Energies (Basel)*, vol. 12, no. 10, p. 1940, May 2019, doi: 10.3390/en12101940.
- [32] J. Encinar, S. Nogales-Delgado, N. Sánchez, and J. González, "Biolubricants from Rapeseed and Castor Oil Transesterification by Using Titanium Isopropoxide as a Catalyst: Production and Characterization," *Catalysts*, vol. 10, no. 4, p. 366, Mar. 2020, doi: 10.3390/catal10040366.
- [33] S. Salles-Filho, A. Bin, P. F. D. Castro, A. F. P. Ferro, and S. Corder, "Innovation in the Brazilian Bioethanol Sector: Questioning Leadership," in *Global Bioethanol*, Elsevier, 2016, pp. 122–141. doi: 10.1016/B978-0-12-803141-4.00005-8.
- [34] A. Kamp and H. Østergård, "Environmental sustainability assessment of fruit cultivation and processing using fruit and cocoa residues for bioenergy and compost. Case study from Ghana," *J Clean Prod*, vol. 129, pp. 329–340, Aug. 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.04.065.
- [35] S. E. Sanni, P. Uma, B. A. Oni, and E. E. Okoro, "Substituting Bioenergy for Fossil Fuels and Risks to Energy Security," in *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*, Elsevier, 2023. doi: 10.1016/B978-0-323-93940-9.00122-5.
- [36] G. Chiriboga, A. De La Rosa, C. Molina, S. Velarde, and G. Carvajal C, "Energy Return on Investment (EROI) and Life Cycle Analysis (LCA) of biofuels in Ecuador," *Heliyon*, vol. 6, no. 6, p. e04213, Jun. 2020, doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e04213.
- [37] E. R. Grijalva and J. M. López Martínez, "Analysis of the Reduction of CO2 Emissions in Urban Environments by Replacing Conventional City Buses by Electric Bus Fleets: Spain Case Study," *Energies (Basel)*, vol. 12, no. 3, p. 525, Feb. 2019, doi: 10.3390/en12030525.
- [38] V. Z. Castillo, H.-S. de Boer, R. M. Muñoz, D. E. H. J. Gernaat, R. Benders, and D. van Vuuren, "Future global electricity demand load curves," *Energy*, vol. 258, p. 124741, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.energy.2022.124741.
- [39] L. N. Guimarães, "Challenges to the Promotion of Distributed Energy Resources in Latin America: A Brazilian Case Study," in *Consumer, Prosumer, Prosumer*, Elsevier, 2019, pp. 235–258. doi: 10.1016/B978-0-12-816835-6.00011-5.
- [40] C. Viviescas *et al.*, "Contribution of Variable Renewable Energy to increase energy security in Latin America: Complementarity and climate change impacts on wind and solar resources," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 113, p. 109232, Oct. 2019, doi: 10.1016/j.rser.2019.06.039.

- [41] M. R. Peláez-Samaniego, M. Garcia-Perez, L. A. B. Cortez, J. Oscullo, and G. Olmedo, "Energy sector in Ecuador: Current status," *Energy Policy*, vol. 35, no. 8, pp. 4177–4189, Aug. 2007, doi: 10.1016/j.enpol.2007.02.025.
- [42] M. A. Ponce-Jara, M. Castro, M. R. Pelaez-Samaniego, J. L. Espinoza-Abad, and E. Ruiz, "Electricity sector in Ecuador: An overview of the 2007–2017 decade," *Energy Policy*, vol. 113, pp. 513–522, Feb. 2018, doi: 10.1016/j.enpol.2017.11.036.
- [43] E. Andoh-Mensah, C. K. Anthonio, F. L. Sossah, D. A. Fianko, and E. N. Yankey, "Integrated soil fertility management using cocoa bean shells improves soil chemical properties, coconut yield and mitigates environmental pollution," *J Clean Prod*, vol. 428, p. 139418, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.jclepro.2023.139418.
- [44] C. J. Mendoza-Meneses, A. A. Feregrino-Pérez, R. G. Guevara-González, and J. F. García-Trejo, "Implementation of pre-harvest techniques in emerging agroforestry systems to increase the yield of cocoa tree (*Theobroma cacao* L.)," *Heliyon*, vol. 9, no. 3, p. e14542, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e14542.
- [45] J. E. Kongor, M. Hinneh, D. Van de Walle, E. O. Afoakwa, P. Boeckx, and K. Dewettinck, "Factors influencing quality variation in cocoa (*Theobroma cacao*) bean flavour profile — A review," *Food Research International*, vol. 82, pp. 44–52, Apr. 2016, doi: 10.1016/j.foodres.2016.01.012.
- [46] C. Figueroa-Hernández *et al.*, "The challenges and perspectives of the selection of starter cultures for fermented cocoa beans," *Int J Food Microbiol*, vol. 301, pp. 41–50, Jul. 2019, doi: 10.1016/j.ijfoodmicro.2019.05.002.
- [47] P. Jagoret, I. Michel, H. T. Ngnogué, P. Lachenaud, D. Snoeck, and E. Malézieux, "Structural characteristics determine productivity in complex cocoa agroforestry systems," *Agron Sustain Dev*, vol. 37, no. 6, Dec. 2017, doi: 10.1007/s13593-017-0468-0.
- [48] W. Niether, J. Jacobi, W. J. Blaser, C. Andres, and L. Armengot, "Cocoa agroforestry systems versus monocultures: a multi-dimensional meta-analysis," *Environmental Research Letters*, vol. 15, no. 10, p. 104085, Oct. 2020, doi: 10.1088/1748-9326/abb053.
- [49] I. Samaniego *et al.*, "Effect of the growing area on the methylxanthines and flavan-3-ols content in cocoa beans from Ecuador," *Journal of Food Composition and Analysis*, vol. 88, p. 103448, May 2020, doi: 10.1016/j.jfca.2020.103448.
- [50] G. Schroth, P. Läderach, A. I. Martinez-Valle, C. Bunn, and L. Jassogne, "Vulnerability to climate change of cocoa in West Africa: Patterns, opportunities and limits to adaptation," *Science of The Total Environment*, vol. 556, pp. 231–241, Jun. 2016, doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.03.024.
- [51] S. Hosseini Bai *et al.*, "Effects of shade-tree species and spacing on soil and leaf nutrient concentrations in cocoa plantations at 8 years after establishment," *Agric Ecosyst Environ*, vol. 246, pp. 134–143, Aug. 2017, doi: 10.1016/j.agee.2017.06.003.
- [52] Corporación Financiera Nacional, "Ficha Sectorial Cacao."
- [53] R. K. Bannor, D. Amoako, and S. Kwabena Chaa Kyire, "Sustaining beyond the production of cocoa for beans: The preference and impact of products from the cocoa husk," *Environmental and Sustainability Indicators*, vol. 21, p. 100333, Feb. 2024, doi: 10.1016/j.indic.2024.100333.
- [54] H. V. H. Nguyễn, H. M. Lê, and G. P. Savage, "Effects of maturity at harvesting and primary processing of cocoa beans on oxalate contents of cocoa powder,"

- Journal of Food Composition and Analysis*, vol. 67, pp. 86–90, Apr. 2018, doi: 10.1016/j.jfca.2018.01.007.
- [55] S. Streule, S. Freimüller Leischtfeld, M. Galler, and S. Miescher Schwenninger, “Monitoring of cocoa post-harvest process practices on a small-farm level at five locations in Ecuador,” *Heliyon*, vol. 8, no. 6, p. e09628, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.heliyon.2022.e09628.
- [56] D. Cortez *et al.*, “Changes in bioactive compounds during fermentation of cocoa (*Theobroma cacao*) harvested in Amazonas-Peru,” *Curr Res Food Sci*, vol. 6, p. 100494, 2023, doi: 10.1016/j.crfs.2023.100494.
- [57] F. Herrera-Rocha *et al.*, “Bioactive and flavor compounds in cocoa liquor and their traceability over the major steps of cocoa post-harvesting processes,” *Food Chem*, vol. 435, p. 137529, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.foodchem.2023.137529.
- [58] Z. S. Vásquez *et al.*, “Biotechnological approaches for cocoa waste management: A review,” *Waste Management*, vol. 90, pp. 72–83, May 2019, doi: 10.1016/j.wasman.2019.04.030.
- [59] J. F. González, A. Álvarez Murillo, D. Díaz García, and S. Nogales-Delgado, “The Determination of Combustion for Different Pellets Based on Ostwald Diagrams in a Domestic Stove under Experimental Conditions,” *Applied Sciences*, vol. 13, no. 21, p. 12007, Nov. 2023, doi: 10.3390/app132112007.
- [60] A. Roskilly, Y. Wang, R. Mikalsen, and H. Yu, “Use of Biofuels in a Range of Engine Configurations,” in *Comprehensive Renewable Energy*, Elsevier, 2012, pp. 343–356. doi: 10.1016/B978-0-08-087872-0.00523-0.
- [61] E. Dogan, T. Luni, M. T. Majeed, and P. Tzeremes, “The nexus between global carbon and renewable energy sources: A step towards sustainability,” *J Clean Prod*, vol. 416, p. 137927, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.jclepro.2023.137927.
- [62] E. E. Rezaei *et al.*, “Climate change impacts on crop yields,” *Nat Rev Earth Environ*, vol. 4, no. 12, pp. 831–846, Nov. 2023, doi: 10.1038/s43017-023-00491-0.
- [63] H. Adamu *et al.*, “Production processes, techno-economic and policy challenges of bioenergy production from fruit and vegetable wastes,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 186, p. 113686, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.rser.2023.113686.
- [64] A. I. Osman, N. Mehta, A. M. Elgarahy, A. Al-Hinai, A. H. Al-Muhtaseb, and D. W. Rooney, “Conversion of biomass to biofuels and life cycle assessment: a review,” *Environmental Chemistry Letters*, vol. 19, no. 6. Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, pp. 4075–4118, Dec. 01, 2021. doi: 10.1007/s10311-021-01273-0.
- [65] T. Zamora-Hernández, A. Prado-Fuentes, J. Capataz-Tafur, B. E. Barrera-Figueroa, and J. M. Peña-Castro, “Demostraciones prácticas de los retos y oportunidades de la producción de bioetanol de primera y segunda generación a partir de cultivos tropicales,” *Educación Química*, vol. 25, no. 2, pp. 122–127, Apr. 2014, doi: 10.1016/S0187-893X(14)70534-8.
- [66] P. Pecho, M. Hruz, M. Sitar, and M. Bugaj, “Possibilities of Using Bioethanol as an Alternative Fuel in the Conditions of Jet Engines,” *Transportation Research Procedia*, vol. 59, pp. 183–192, 2021, doi: 10.1016/j.trpro.2021.11.110.
- [67] J. M. Encinar, J. F. González, and A. Rodríguez-Reinares, “Biodiesel from Used Frying Oil. Variables Affecting the Yields and Characteristics of the Biodiesel,” *Ind Eng Chem Res*, vol. 44, no. 15, pp. 5491–5499, Jul. 2005, doi: 10.1021/ie040214f.

- [68] N. Hossain *et al.*, “Bioethanol production from forest residues and life cycle cost analysis of bioethanol-gasoline blend on transportation sector,” *J Environ Chem Eng*, vol. 9, no. 4, p. 105542, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.jece.2021.105542.
- [69] F. Saladini, N. Patrizi, F. M. Pulselli, N. Marchettini, and S. Bastianoni, “Guidelines for emergy evaluation of first, second and third generation biofuels,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 66, pp. 221–227, Dec. 2016, doi: 10.1016/j.rser.2016.07.073.
- [70] M. Wang, J. Han, J. B. Dunn, H. Cai, and A. Elgowainy, “Well-to-wheels energy use and greenhouse gas emissions of ethanol from corn, sugarcane and cellulosic biomass for US use,” *Environmental Research Letters*, vol. 7, no. 4, p. 045905, Dec. 2012, doi: 10.1088/1748-9326/7/4/045905.
- [71] S. Kim and B. E. Dale, “Comparing alternative cellulosic biomass biorefining systems: Centralized versus distributed processing systems,” *Biomass Bioenergy*, vol. 74, pp. 135–147, Mar. 2015, doi: 10.1016/j.biombioe.2015.01.018.
- [72] L. Li and Y. Ge, “System-level cost evaluation for economic viability of cellulosic biofuel manufacturing,” *Appl Energy*, vol. 203, pp. 711–722, Oct. 2017, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.06.074.
- [73] Y. Li *et al.*, “Economic viability and environmental impact investigation for the biofuel supply chain using co-fermentation technology,” *Appl Energy*, vol. 259, p. 114235, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.114235.
- [74] R. Pant, A. Gupta, G. Pant, K. K. Chaubey, G. Kumar, and N. Patrick, “Second-generation biofuels: Facts and future,” in *Relationship Between Microbes and the Environment for Sustainable Ecosystem Services, Volume 3*, Elsevier, 2023, pp. 97–115. doi: 10.1016/B978-0-323-89936-9.00011-4.
- [75] Y. Makkawi *et al.*, “A comparative analysis of second-generation biofuels and its potentials for large-scale production in arid and semi-arid regions,” *Fuel*, vol. 343, p. 127893, Jul. 2023, doi: 10.1016/j.fuel.2023.127893.
- [76] C. N. Hamelinck and A. P. C. Faaij, “Outlook for advanced biofuels,” *Energy Policy*, vol. 34, no. 17, pp. 3268–3283, Nov. 2006, doi: 10.1016/j.enpol.2005.06.012.
- [77] M. S. Hossain, O. Therasme, K. Rajendran, T. A. Volk, V. Kumar, and D. Kumar, “Biochemical conversion of woody biomass to liquid biofuels,” in *Sustainable Biorefining of Woody Biomass to Biofuels and Biochemicals*, Elsevier, 2024, pp. 81–101. doi: 10.1016/B978-0-323-91187-0.00001-1.
- [78] P. Karagöz, I. V. Rocha, M. Özkan, and I. Angelidaki, “Alkaline peroxide pretreatment of rapeseed straw for enhancing bioethanol production by Same Vessel Saccharification and Co-Fermentation,” *Bioresour Technol*, vol. 104, pp. 349–357, Jan. 2012, doi: 10.1016/j.biortech.2011.10.075.
- [79] C. O. Onwosi, F. N. Ezugworie, C. L. Onyishi, and V. C. Igbokwe, “Lignocellulose biomass pretreatment for efficient hydrolysis and biofuel production,” in *Advances in Biofuels Production, Optimization and Applications*, Elsevier, 2024, pp. 1–19. doi: 10.1016/B978-0-323-95076-3.00001-6.
- [80] S. T. Moe, K. K. Janga, T. Hertzberg, M.-B. Hägg, K. Øyaas, and N. Dyrset, “Saccharification of Lignocellulosic Biomass for Biofuel and Biorefinery Applications – A Renaissance for the Concentrated Acid Hydrolysis?,” *Energy Procedia*, vol. 20, pp. 50–58, 2012, doi: 10.1016/j.egypro.2012.03.007.
- [81] D. C. Dayton and T. D. Foust, “Biomass Conversion,” in *Analytical Methods for Biomass Characterization and Conversion*, Elsevier, 2020, pp. 37–61. doi: 10.1016/B978-0-12-815605-6.00003-2.

- [82] A. C. Eloka-Eboka and S. Maroa, "Biobutanol fermentation research and development: feedstock, process and biofuel production," in *Advances and Developments in Biobutanol Production*, Elsevier, 2023, pp. 79–103. doi: 10.1016/B978-0-323-91178-8.00007-2.
- [83] M. Choudhary, S. Joshi, P. Singh, and N. Srivastava, "Biofuel production from lignocellulosic biomass: Introduction and metabolic engineering for fermentation scale-up," in *Genetic and Metabolic Engineering for Improved Biofuel Production from Lignocellulosic Biomass*, Elsevier, 2020, pp. 1–12. doi: 10.1016/B978-0-12-817953-6.00001-4.
- [84] C. Marzo, A. B. Díaz, I. Caro, and A. Blandino, "Status and Perspectives in Bioethanol Production From Sugar Beet," in *Bioethanol Production from Food Crops*, Elsevier, 2019, pp. 61–79. doi: 10.1016/B978-0-12-813766-6.00004-7.
- [85] J. K. Shihadeh, H. Huang, K. D. Rausch, M. E. Tumbleson, and V. Singh, "Vacuum Stripping of Ethanol during High Solids Fermentation of Corn," *Appl Biochem Biotechnol*, vol. 173, no. 2, pp. 486–500, May 2014, doi: 10.1007/s12010-014-0855-9.
- [86] C. Marzo, A. B. Díaz, I. Caro, and A. Blandino, "Status and Perspectives in Bioethanol Production From Sugar Beet," in *Bioethanol Production from Food Crops*, Elsevier, 2019, pp. 61–79. doi: 10.1016/B978-0-12-813766-6.00004-7.
- [87] Y. Zhang *et al.*, "Experimental study on the application of bioethanol in dual-fuel intelligent charge compression ignition (ICCI) engine," *Fuel*, vol. 303, p. 121181, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.fuel.2021.121181.
- [88] M. Errico, C. Madeddu, M. Flemming Bindseil, S. Dall Madsen, S. Braekevelt, and M. S. Camilleri-Rumbau, "Membrane assisted reactive distillation for bioethanol purification," *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, vol. 157, p. 108110, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.cep.2020.108110.
- [89] M. Boro, A. K. Verma, D. Chettri, V. K. Yata, and A. K. Verma, "Strategies involved in biofuel production from agro-based lignocellulose biomass," *Environ Technol Innov*, vol. 28, p. 102679, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.eti.2022.102679.
- [90] M. Gavahian, P. E. S. Munekata, I. Eş, J. M. Lorenzo, A. Mousavi Khaneghah, and F. J. Barba, "Emerging techniques in bioethanol production: from distillation to waste valorization," *Green Chemistry*, vol. 21, no. 6, pp. 1171–1185, 2019, doi: 10.1039/C8GC02698J.
- [91] R. J. Pearson and J. W. G. Turner, "Using alternative and renewable liquid fuels to improve the environmental performance of internal combustion engines: key challenges and blending technologies," in *Alternative Fuels and Advanced Vehicle Technologies for Improved Environmental Performance*, Elsevier, 2014, pp. 52–89. doi: 10.1533/9780857097422.1.52.
- [92] J. Beckman and G. Nigatu, "A Report from the Economic Research Service A Report from the Economic Research Service Global Ethanol Mandates: Opportunities for U.S. Exports of Ethanol and DDGS," 2017. [Online]. Available: [www.ers.usda.gov](http://www.ers.usda.gov)
- [93] *Inventory of Estimated Budgetary Support and Tax Expenditures for Fossil Fuels 2013*. OECD, 2013. doi: 10.1787/9789264187610-en.
- [94] F. S. Frutuoso *et al.*, "Assessing light flex-fuel vehicle emissions with ethanol/gasoline blends along an urban corridor: A case of Fortaleza/Brazil," *International Journal of Transportation Science and Technology*, vol. 12, no. 2, pp. 447–459, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.ijtst.2022.04.001.
- [95] R. J. Nichols, "The Methanol Story: A Sustainable Fuel for the Future," 2003.

- [96] K. Nakata, S. Utsumi, A. Ota, K. Kawatake, T. Kawai, and T. Tsunooka, "The Effect of Ethanol Fuel on a Spark Ignition Engine," Oct. 2006. doi: 10.4271/2006-01-3380.
- [97] Musyaroh, W. Wijayanti, M. N. Sasongko, and Winarto, "Influence of sweet orange peel oil additive on physicochemical properties of gasoline," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 61, no. 6, pp. 4875–4888, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.aej.2021.09.057.
- [98] H. Farajollahi and S. Hossainpour, "Techno-economic assessment of biomass and coal co-fueled chemical looping combustion unit integrated with supercritical CO<sub>2</sub> cycle and Organic Rankine cycle," *Energy*, vol. 274, p. 127309, Jul. 2023, doi: 10.1016/j.energy.2023.127309.
- [99] J. P. Wolf and Dong, "Biomass combustion for power generation: an introduction," in *Biomass Combustion Science, Technology and Engineering*, Elsevier, 2013, pp. 3–8. doi: 10.1533/9780857097439.1.3.
- [100] J. M. Encinar, F. J. Beltrán, A. Bernalte, A. Ramiro, and J. F. González, "Pyrolysis of two agricultural residues: Olive and grape bagasse. Influence of particle size and temperature," *Biomass Bioenergy*, vol. 11, no. 5, pp. 397–409, Jan. 1996, doi: 10.1016/S0961-9534(96)00029-3.
- [101] Ş. Y. Balaman, "Introduction to Biomass—Resources, Production, Harvesting, Collection, and Storage," in *Decision-Making for Biomass-Based Production Chains*, Elsevier, 2019, pp. 1–23. doi: 10.1016/B978-0-12-814278-3.00001-7.
- [102] Ş. Y. Balaman, "Biomass-Based Production Systems," in *Decision-Making for Biomass-Based Production Chains*, Elsevier, 2019, pp. 25–54. doi: 10.1016/B978-0-12-814278-3.00002-9.
- [103] J. F. González *et al.*, "Combustion optimisation of biomass residue pellets for domestic heating with a mural boiler," *Biomass Bioenergy*, vol. 27, no. 2, pp. 145–154, Aug. 2004, doi: 10.1016/j.biombioe.2004.01.004.
- [104] K. Kavathia and P. Prajapati, "A review on biomass-fired CHP system using fruit and vegetable waste with regenerative organic Rankine cycle (RORC)," *Mater Today Proc*, vol. 43, pp. 572–578, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2020.12.052.
- [105] P. McKendry, "Energy production from biomass (part 1): overview of biomass," *Bioresour Technol*, vol. 83, no. 1, pp. 37–46, May 2002, doi: 10.1016/S0960-8524(01)00118-3.
- [106] T. C. Hung, T. Y. Shai, and S. K. Wang, "A review of organic rankine cycles (ORCs) for the recovery of low-grade waste heat," *Energy*, vol. 22, no. 7, pp. 661–667, Jul. 1997, doi: 10.1016/S0360-5442(96)00165-X.
- [107] J. M. Láinez-Aguirre, M. Pérez-Fortes, and L. Puigjaner, "Strategic Planning of Biomass Supply Chain Networks for Co-combustion Plants," 2015, pp. 453–474. doi: 10.1016/B978-0-444-63472-6.00018-5.
- [108] P. Basu and P. Kaushal, "Biomass characteristics," in *Biomass Gasification, Pyrolysis, and Torrefaction*, Elsevier, 2024, pp. 63–105. doi: 10.1016/B978-0-443-13784-6.00009-3.
- [109] V. Mangut *et al.*, "Thermogravimetric study of the pyrolysis of biomass residues from tomato processing industry," *Fuel Processing Technology*, vol. 87, no. 2, pp. 109–115, Jan. 2006, doi: 10.1016/j.fuproc.2005.08.006.
- [110] D. C. Dayton and T. D. Foust, "Biomass Characterization," in *Analytical Methods for Biomass Characterization and Conversion*, Elsevier, 2020, pp. 19–35. doi: 10.1016/B978-0-12-815605-6.00002-0.

- [111] S. A. Ashter, "Biomass and its sources," in *Technology and Applications of Polymers Derived from Biomass*, Elsevier, 2018, pp. 11–36. doi: 10.1016/B978-0-323-51115-5.00002-5.
- [112] A. Friedl, E. Padouvas, H. Rotter, and K. Varmuza, "Prediction of heating values of biomass fuel from elemental composition," *Anal Chim Acta*, vol. 544, no. 1–2, pp. 191–198, Jul. 2005, doi: 10.1016/j.aca.2005.01.041.
- [113] S. Zhang, Y. Wang, B. Wang, and S. Wang, "A review on superiority of mycelial pellets as bio-carriers: Structure, surface properties, and bioavailability," *Journal of Water Process Engineering*, vol. 58, p. 104745, Feb. 2024, doi: 10.1016/j.jwpe.2023.104745.
- [114] C. Xu, K. Wei, Z. Du, and W. Ma, "Effect of particle size on the properties of biomass gasification residue pellets used as a metallurgical-grade silicon reducing agent," *Powder Technol*, vol. 435, p. 119406, Feb. 2024, doi: 10.1016/j.powtec.2024.119406.
- [115] P. L. W. Kamga *et al.*, "Physical and energetic characteristics of pellets produced from Movingui sawdust, corn spathes, and coconut shells," *Energy Reports*, vol. 11, pp. 1291–1301, Jun. 2024, doi: 10.1016/j.egyr.2024.01.006.
- [116] S. Vergkizi, I. Partheniadis, A. Sipaki, T. Papanikolaou, D. Fatouros, and I. Nikolakakis, "Hydroxyapatite and pore former effects on the microstructure and mechanical strength of porous pellets loaded with *Lactobacillus*," *Powder Technol*, vol. 435, p. 119433, Feb. 2024, doi: 10.1016/j.powtec.2024.119433.
- [117] A. Soria-Verdugo, "Pyrolysis of sludge and biomass residues," in *Wastewater Treatment Residues as Resources for Biorefinery Products and Biofuels*, Elsevier, 2020, pp. 155–181. doi: 10.1016/B978-0-12-816204-0.00008-4.
- [118] J. M. Encinar, F. J. Beltrán, A. Ramiro, and J. F. González, "Catalyzed Pyrolysis of Grape and Olive Bagasse. Influence of Catalyst Type and Chemical Treatment," *Ind Eng Chem Res*, vol. 36, no. 10, pp. 4176–4183, Oct. 1997, doi: 10.1021/ie960795b.
- [119] H. B. Goyal, D. Seal, and R. C. Saxena, "Bio-fuels from thermochemical conversion of renewable resources: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 12, no. 2, pp. 504–517, Feb. 2008, doi: 10.1016/j.rser.2006.07.014.
- [120] M. Jahirul, M. Rasul, A. Chowdhury, and N. Ashwath, "Biofuels Production through Biomass Pyrolysis —A Technological Review," *Energies (Basel)*, vol. 5, no. 12, pp. 4952–5001, Nov. 2012, doi: 10.3390/en5124952.
- [121] R. E. Guedes, A. S. Luna, and A. R. Torres, "Operating parameters for bio-oil production in biomass pyrolysis: A review," *J Anal Appl Pyrolysis*, vol. 129, pp. 134–149, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.jaap.2017.11.019.
- [122] A. A. Boateng, "Characterization and Thermal Conversion of Charcoal Derived from Fluidized-Bed Fast Pyrolysis Oil Production of Switchgrass," *Ind Eng Chem Res*, vol. 46, no. 26, pp. 8857–8862, Dec. 2007, doi: 10.1021/ie071054l.
- [123] A. A. Boateng, "Pyrolysis solid coproducts and usage," in *Pyrolysis of Biomass for Fuels and Chemicals*, Elsevier, 2020, pp. 239–257. doi: 10.1016/B978-0-12-818213-0.00010-2.
- [124] M. Ahmad *et al.*, "Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: A review," *Chemosphere*, vol. 99, pp. 19–33, Mar. 2014, doi: 10.1016/j.chemosphere.2013.10.071.
- [125] B. Glaser, J. Lehmann, and W. Zech, "Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal - a review," *Biol*

- Fertil Soils*, vol. 35, no. 4, pp. 219–230, Jun. 2002, doi: 10.1007/s00374-002-0466-4.
- [126] N. Z. Rebitanim, W. A. Wan Ab Karim Ghani, N. A. Rebitanim, and M. Amran Mohd Salleh, "Potential applications of wastes from energy generation particularly biochar in Malaysia," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 21, pp. 694–702, May 2013, doi: 10.1016/j.rser.2012.12.051.
- [127] G. De Bhowmick and A. K. Sarmah, "Unconventional bioresources and their prospects," in *Current Developments in Biotechnology and Bioengineering*, Elsevier, 2020, pp. 103–119. doi: 10.1016/B978-0-444-64309-4.00004-0.
- [128] L. Xu and J. Yuan, "Online identification of the lower heating value of the coal entering the furnace based on the boiler-side whole process models," *Fuel*, vol. 161, pp. 68–77, Dec. 2015, doi: 10.1016/j.fuel.2015.08.009.
- [129] L. C. Malucelli *et al.*, "Biochar higher heating value estimative using thermogravimetric analysis," *J Therm Anal Calorim*, vol. 139, no. 3, pp. 2215–2220, Feb. 2020, doi: 10.1007/s10973-019-08597-8.
- [130] H. Qian *et al.*, "A Simple Prediction Model for Higher Heat Value of Biomass," *J Chem Eng Data*, vol. 61, no. 12, pp. 4039–4045, Dec. 2016, doi: 10.1021/acs.jced.6b00537.
- [131] C. Bonatto *et al.*, "Biomass to bioenergy research: current and future trends for biofuels," in *Recent Developments in Bioenergy Research*, Elsevier, 2020, pp. 1–17. doi: 10.1016/B978-0-12-819597-0.00001-5.
- [132] Y. Xu, X. Hu, W. Li, and Y. Shi, "Preparation and Characterization of Bio-oil from Biomass," in *Progress in Biomass and Bioenergy Production*, InTech, 2011. doi: 10.5772/16466.
- [133] A. B. Ross, P. Biller, M. L. Kubacki, H. Li, A. Lea-Langton, and J. M. Jones, "Hydrothermal processing of microalgae using alkali and organic acids," *Fuel*, vol. 89, no. 9, pp. 2234–2243, Sep. 2010, doi: 10.1016/j.fuel.2010.01.025.
- [134] H. A. Baloch *et al.*, "Recent advances in production and upgrading of bio-oil from biomass: A critical overview," *J Environ Chem Eng*, vol. 6, no. 4, pp. 5101–5118, Aug. 2018, doi: 10.1016/j.jece.2018.07.050.
- [135] G. Saradha Devi, S. Vaishnavi, S. Srinath, B. Dutt, and K. S. Rajmohan, "Energy recovery from biomass using gasification," in *Current Developments in Biotechnology and Bioengineering*, Elsevier, 2020, pp. 363–382. doi: 10.1016/B978-0-444-64321-6.00019-7.
- [136] Y. Huang, B. Jin, Z. Zhong, R. Xiao, and H. Zhou, "Effect of operating conditions on gas components in the partial coal gasification with air/steam," *Korean Journal of Chemical Engineering*, vol. 24, no. 4, pp. 698–705, Jul. 2007, doi: 10.1007/s11814-007-0029-3.
- [137] P. Bajpai, "Biomass conversion processes," in *Biomass to Energy Conversion Technologies*, Elsevier, 2020, pp. 41–151. doi: 10.1016/B978-0-12-818400-4.00005-0.
- [138] S. Yao *et al.*, "Cascade utilization of energy in high temperature syngas to reduce energy consumption in biomass gasification processes," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 52, p. 103680, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.csite.2023.103680.
- [139] S. Yao *et al.*, "Cascade utilization of energy in high temperature syngas to reduce energy consumption in biomass gasification processes," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 52, p. 103680, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.csite.2023.103680.

- [140] V. Duc Bui *et al.*, “Techno-economic assessment and logistics management of biomass in the conversion progress to bioenergy,” *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 55, p. 102991, Feb. 2023, doi: 10.1016/j.seta.2022.102991.
- [141] C. Park *et al.*, “Biomass gasification: Sub-pilot operation of >600 h with extensive tar cracking property and high purity syngas production at H<sub>2</sub>:CO ratio ~2 using moving bed redox looping technology,” *Fuel Processing Technology*, vol. 252, p. 107966, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.fuproc.2023.107966.
- [142] S. Samipour, M. D. Manshadi, and P. Setoodeh, “CO<sub>2</sub> removal from biogas and syngas,” in *Advances in Carbon Capture*, Elsevier, 2020, pp. 455–477. doi: 10.1016/B978-0-12-819657-1.00020-7.
- [143] V. Shmelev and Y. N. Chun, “Synthesis gas production by reforming methane in a chemical compression reactor,” *International Journal of Energy for a Clean Environment*, vol. 11, no. 1–4, pp. 189–201, 2010, doi: 10.1615/InterJEnerCleanEnv.2011001596.
- [144] A. V. Bridgwater, A. J. Toft, and J. G. Brammer, “A techno-economic comparison of power production by biomass fast pyrolysis with gasification and combustion,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 6, no. 3, pp. 181–246, Sep. 2002, doi: 10.1016/S1364-0321(01)00010-7.
- [145] A. Evans, V. Strezov, and T. J. Evans, “Sustainability considerations for electricity generation from biomass,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, no. 5, pp. 1419–1427, Jun. 2010, doi: 10.1016/j.rser.2010.01.010.
- [146] M. Gupta, S. Pramanik, and R. V. Ravikrishna, “Development of a syngas-fired catalytic combustion system for hybrid solar-thermal applications,” *Appl Therm Eng*, vol. 109, pp. 1023–1030, Oct. 2016, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2016.04.150.
- [147] Y. KC *et al.*, “Utilizing Coffee Pulp and Mucilage for Producing Alcohol-Based Beverage,” *Fermentation*, vol. 7, no. 2, p. 53, Apr. 2021, doi: 10.3390/fermentation7020053.
- [148] W. Mühlbauer and J. Müller, “Cocoa (*Theobroma cacao* L.),” in *Drying Atlas*, Elsevier, 2020, pp. 239–245. doi: 10.1016/B978-0-12-818162-1.00028-6.
- [149] Humberto Barazarte, Elba Sangronis, and Emaldi Unai, “La cáscara de cacao (*Theobroma cacao* L.): Una posible fuente comercial de pectinas,” *Arch Latinoam Nutr*, vol. 58, no. 1, pp. 64–70, 2008.
- [150] J. V. Bastidas, W. A. B. Melo, and J. Briones-Bitar, “Sustainability of the Cocoa Industry: Cocoa Waste Mucilage Use to Produce Fermented Beverages. Case Study in Los Ríos Province,” *International Journal of Sustainable Development and Planning*, vol. 17, no. 4, pp. 1147–1152, Jul. 2022, doi: 10.18280/ijstdp.170412.
- [151] J. M. Fuentes-Alventosa *et al.*, “Effect of extraction method on chemical composition and functional characteristics of high dietary fibre powders obtained from asparagus by-products,” *Food Chem*, vol. 113, no. 2, pp. 665–671, Mar. 2009, doi: 10.1016/j.foodchem.2008.07.075.
- [152] E. Azarpazhoooh, H. Rashidi, P. Sharayei, H. Behmadi, and H. S. Ramaswamy, “Effect of flaxseed-mucilage and Stevia on physico-chemical, antioxidant and sensorial properties of formulated cocoa milk,” *Food Hydrocolloids for Health*, vol. 1, p. 100017, 2021, doi: 10.1016/j.fhfh.2021.100017.

- [153] A. Tigre and F. Bayas-Morejón, "Elaboration Of An Alcoholic Drink From The Aerobic Fermentation Of Mucilage Of Cocoa (*Theobroma cacao* L.)," 2018. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/326266094>
- [154] K. Y. B. Anvoh, A. Z. Bi, and D. Gnakri, "Production and Characterization of Juice from Mucilage of Cocoa Beans and its Transformation into Marmalade," *Pakistan Journal of Nutrition*, vol. 8, no. 2, pp. 129–133, Jan. 2009, doi: 10.3923/pjn.2009.129.133.
- [155] O. L. Saavedra-Sanabria, D. Durán, J. Cabezas, I. Hernández, C. Blanco-Tirado, and M. Y. Combariza, "Cellulose biosynthesis using simple sugars available in residual cacao mucilage exudate," *Carbohydr Polym*, vol. 274, p. 118645, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.carbpol.2021.118645.
- [156] C. M. Galanakis, "Recovery of high added-value components from food wastes: Conventional, emerging technologies and commercialized applications," *Trends Food Sci Technol*, vol. 26, no. 2, pp. 68–87, Aug. 2012, doi: 10.1016/j.tifs.2012.03.003.
- [157] L. C. Vriesmann, R. D. de Mello Castanho Amboni, and C. L. de Oliveira Petkowicz, "Cacao pod husks (*Theobroma cacao* L.): Composition and hot-water-soluble pectins," *Ind Crops Prod*, vol. 34, no. 1, pp. 1173–1181, Jul. 2011, doi: 10.1016/j.indcrop.2011.04.004.
- [158] G. Grillo *et al.*, "Cocoa bean shell waste valorisation; extraction from lab to pilot-scale cavitation reactors," *Food Research International*, vol. 115, pp. 200–208, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.foodres.2018.08.057.
- [159] Servicio Ecuatoriano de Normalización (INEN), "NTE INEN 935 - Productos Derivados de Petróleo. Gasolina. Requisitos," Quito, 2021.
- [160] J. Díaz-Montenegro, E. Varela, and J. M. Gil, "Livelihood strategies of cacao producers in Ecuador: Effects of national policies to support cacao farmers and specialty cacao landraces," *J Rural Stud*, vol. 63, pp. 141–156, Oct. 2018, doi: 10.1016/j.jrurstud.2018.08.004.
- [161] J. V. Villarroel-Bastidas, G. del C. Angulo-Ortega, and J. Briones-Bitar, "Degradación de azúcares reductores del mucílago de cacao para la producción de bioetanol," *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, Sep. 2022, doi: 10.17533/udea.redin.20220992.
- [162] American Society for Testing and Materials 2018, "ASTM D4809-18 Standard Test Method for Heat of Combustion of Liquid Hydrocarbon Fuels by Bomb Calorimeter (Precision Method)," 2018.
- [163] R. A. Nadkarni, *Guide to ASTM test methods for the analysis of petroleum products and lubricants*. ASTM International, 2007.
- [164] American Society for Testing and Materials ASTM, "ASTM D86 - Standard Test Method for Distillation of Petroleum Products at Atmospheric Pressure," 2015.
- [165] American Society for Testing and Materials ASTM, "ASTM D323 Standard Test Method for Vapor Pressure of Petroleum Products (Reid Method)," 2015.
- [166] American Society for Testing and Materials ASTM, "ASTM D130 Standard Test Method for Corrosiveness to Copper from Petroleum Products by Copper Strip Test," 2012.
- [167] American Society for Testing and Materials ASTM, "ASTM D4294 Standard Test Method for Sulfur in Petroleum and Petroleum Products by Energy Dispersive X-ray Fluorescence Spectrometry," 2016.
- [168] American Society for Testing and Materials ASTM, "ASTM D381 Standard Test Method for Gum Content in Fuels by Jet Evaporation," 2017.

- [169] Servicio Ecuatoriano de Normalización INEN, “NTE INEN 2204 Gestión ambiental. Aire. Vehículos automotores. Límites permitidos de emisiones producidas por fuentes móviles terrestres que utilizan gasolina,” 2017.
- [170] Y. Ye, X. Zhao, and J. Zhang, “Driving cycle electrification and comparison,” *Transp Res D Transp Environ*, vol. 123, p. 103900, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.trd.2023.103900.
- [171] E. Jungblut, T. Grube, J. Linssen, and D. Stolten, “Fuel-saving opportunities for automated vehicles: A driving cycle analysis,” *Transp Res Interdiscip Perspect*, vol. 22, p. 100964, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.trip.2023.100964.
- [172] A. Clenci and G. Descombes, “Variable compression ratio at internal combustion engine,” in *Positive Displacement Machines*, Elsevier, 2019, pp. 163–184. doi: 10.1016/B978-0-12-816998-8.00007-8.
- [173] J. Matijošius, Y. Gutarevych, Y. Shuba, A. Rimkus, and O. Syrota, “Effect of the addition of hydrogen-containing (H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>) gas on indicated and effective parameters of a gasoline engine,” *Int J Hydrogen Energy*, vol. 56, pp. 66–74, Feb. 2024, doi: 10.1016/j.ijhydene.2023.11.289.
- [174] R. Ilves, A. Küüt, and J. Olt, “Ethanol as Internal Combustion Engine Fuel,” in *Ethanol*, Elsevier, 2019, pp. 215–229. doi: 10.1016/B978-0-12-811458-2.00008-0.
- [175] DARRERA, “Skywatch® Geos 11,” <https://www.darrera.com/wp/es/producto/12055-skywatch-geos-11/>.
- [176] CCS Electronics, “CANedge1: 2x CAN Bus Data Logger (SD + RTC),” <https://www.csselectronics.com/products/can-logger-sd-canedge1>.
- [177] CCS Electronics, “CANmod.gps: GPS-to-CAN with 3D Inertial Sensor and UDR,” <https://www.csselectronics.com/products/gps-to-can-bus-gnss-imu>.
- [178] TEXA, “TEXA,” <https://www.texaiberica.com/productos/gasbox-opabox-autopower>.
- [179] Y. C. Ardila, J. E. J. Figueroa, and M. R. W. Maciel, “Mathematical models for predicting the higher heating value and ultimate analysis of biomass,” *Ind Crops Prod*, vol. 208, p. 117777, Feb. 2024, doi: 10.1016/j.indcrop.2023.117777.
- [180] L. K. Andersen, T. J. Morgan, A. K. Boulamanti, P. Álvarez, S. V. Vassilev, and D. Baxter, “Quantitative X-ray Fluorescence Analysis of Biomass: Objective Evaluation of a Typical Commercial Multi-Element Method on a WD-XRF Spectrometer,” *Energy & Fuels*, vol. 27, no. 12, pp. 7439–7454, Dec. 2013, doi: 10.1021/ef4015394.
- [181] D. M. Le, H. R. Sørensen, and A. S. Meyer, “Elemental analysis of various biomass solid fractions in biorefineries by X-ray fluorescence spectrometry,” *Biomass Bioenergy*, vol. 97, pp. 70–76, Feb. 2017, doi: 10.1016/j.biombioe.2016.12.018.
- [182] Y. Li, M. Jia, S. L. Kokjohn, Y. Chang, and R. D. Reitz, “Comprehensive analysis of exergy destruction sources in different engine combustion regimes,” *Energy*, vol. 149, pp. 697–708, Apr. 2018, doi: 10.1016/j.energy.2018.02.081.
- [183] Y. Arteaga Estrella, “ESTUDIO DEL DESPERDICIO DEL MUCILAGO DE CACAO EN EL CANTÓN NARANJAL (PROVINCIA DEL GUAYAS) MUCILAGO WASTE RESEARCH IN EL NARANJAL CITY (GUAYAS PROVINCE).” [Online]. Available: <http://www.anecacao.com/index.php/es/asistencia-tecnica/articulos-tecnicos.html>
- [184] A. Verardi, C. G. Lopresto, A. Blasi, S. Chakraborty, and V. Calabrò, “Bioconversion of lignocellulosic biomass to bioethanol and biobutanol,” in

- Lignocellulosic Biomass to Liquid Biofuels*, Elsevier, 2020, pp. 67–125. doi: 10.1016/B978-0-12-815936-1.00003-4.
- [185] L. P. Tejeda *et al.*, “PRODUCCIÓN DE BIOETANOL A PARTIR DE LA FERMENTACIÓN ALCOHÓLICA DE JARABES GLUCOSADOS DERIVADOS DE CÁSCARAS DE NARANJA Y PIÑA”, [Online]. Available: [www.acofi.edu.co](http://www.acofi.edu.co)
- [186] A. Bušić *et al.*, “Bioethanol Production from Renewable Raw Materials and its Separation and Purification: a Review,” *Food Technol Biotechnol*, vol. 56, no. 3, 2018, doi: 10.17113/ftb.56.03.18.5546.
- [187] M. Guigou, C. Lareo, L. V. Pérez, M. E. Lluberas, D. Vázquez, and M. D. Ferrari, “Bioethanol production from sweet sorghum: Evaluation of post-harvest treatments on sugar extraction and fermentation,” *Biomass Bioenergy*, vol. 35, no. 7, pp. 3058–3062, Jul. 2011, doi: 10.1016/j.biombioe.2011.04.028.
- [188] E. D. Tulu, R. Duraisamy, B. H. Kebede, and A. M. Tura, “Anchote (*Coccinia abyssinica*) starch extraction, characterization and bioethanol generation from its pulp/waste,” *Heliyon*, vol. 9, no. 3, p. e14320, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e14320.
- [189] C. Balladares *et al.*, “Physicochemical characterization of *Theobroma cacao* L. mucilage, in Ecuadorian coast,” *Emir J Food Agric*, vol. 28, no. 10, p. 741, 2016, doi: 10.9755/ejfa.2016-02-187.
- [190] A. A. Kiss, R. M. Ignat, and C. S. Bildea, “Optimal extractive distillation process for bioethanol dehydration,” in *Computer Aided Chemical Engineering*, vol. 33, Elsevier B.V., 2014, pp. 1333–1338. doi: 10.1016/B978-0-444-63455-9.50057-X.
- [191] T. Janković, A. J. J. Straathof, I. R. McGregor, and A. A. Kiss, “Bioethanol separation by a new pass-through distillation process,” *Sep Purif Technol*, vol. 336, p. 126292, May 2024, doi: 10.1016/j.seppur.2024.126292.
- [192] C. Arenas-Grimaldo, J. G. Avendaño-Guerrero, C. E. Molina-Guerrero, and J. G. Segovia-Hernández, “Design and control of a distillation sequence for the purification of bioethanol obtained from sotol bagasse (*Dasyliirium* sp.),” *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 203, pp. 11–17, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.cherd.2023.12.039.
- [193] C. Berlanga-Labari, A. Albistur-Goñi, I. Barado-Pardo, M. Gutierrez-Peinado, and J. Fernández-Carrasquilla, “Compatibility study of high density polyethylene with bioethanol–gasoline blends,” *Mater Des*, vol. 32, no. 1, pp. 441–446, Jan. 2011, doi: 10.1016/j.matdes.2010.06.017.
- [194] A. G. Olugbenga, “Cost determination of using bioethanol to improve properties of Nigerian gasoline,” *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, vol. 7, p. 100358, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.cscee.2023.100358.
- [195] T. M. M. Abdellatief, M. A. Ershov, V. M. Kapustin, E. A. Chernysheva, and A. Mustafa, “Low carbon energy technologies envisaged in the context of sustainable energy for producing high-octane gasoline fuel,” *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 56, p. 103103, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.seta.2023.103103.
- [196] S. Ge *et al.*, “An assessment of agricultural waste cellulosic biofuel for improved combustion and emission characteristics,” *Science of The Total Environment*, vol. 813, p. 152418, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.152418.
- [197] A. Mansouri, R. Rihani, A. N. Laoufi, and M. Özkan, “Production of bioethanol from a mixture of agricultural feedstocks: Biofuels characterization,” *Fuel*, vol. 185, pp. 612–621, Dec. 2016, doi: 10.1016/j.fuel.2016.08.008.

- [198] Schifter I, L. Diaz, R. Rodriguez, J. P. Gómez, and U. Gonzalez, "Combustion and emissions behavior for ethanol–gasoline blends in a single cylinder engine," *Fuel*, vol. 90, no. 12, pp. 3586–3592, Dec. 2011, doi: 10.1016/j.fuel.2011.01.034.
- [199] C. B. Kothare *et al.*, "Performance improvement and CO and HC emission reduction of variable compression ratio spark-ignition engine using n-pentanol as a fuel additive," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 74, pp. 107–119, Jul. 2023, doi: 10.1016/j.aej.2023.05.024.
- [200] D. Y. Dhande, D. V. Nighot, N. Sinaga, and K. B. Dahe, "Extraction of bioethanol from waste pomegranate fruits as a potential feedstock and its blending effects on a performance of a single cylinder SI engine," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 149, p. 111349, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.rser.2021.111349.
- [201] Salazar Leonardo, "Comportamiento de mezclas Gasolina-Etanol, en un motor de encendido por chispa y sus efectos en las emisiones," *REOPE*, 2018, Accessed: Feb. 13, 2024. [Online]. Available: <https://www.recope.go.cr/wp-content/uploads/2019/03/Informe-ETANOL-v5.pdf>
- [202] P. Iodice, G. Langella, and A. Amoresano, "Ethanol in gasoline fuel blends: Effect on fuel consumption and engine out emissions of SI engines in cold operating conditions," *Appl Therm Eng*, vol. 130, pp. 1081–1089, Feb. 2018, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2017.11.090.
- [203] A. T. Hoang, Q. V. Tran, A. R. M. S. Al-Tawaha, V. V. Pham, and X. P. Nguyen, "Comparative analysis on performance and emission characteristics of an in-Vietnam popular 4-stroke motorcycle engine running on biogasoline and mineral gasoline," *Renewable Energy Focus*, vol. 28, pp. 47–55, Mar. 2019, doi: 10.1016/j.ref.2018.11.001.
- [204] W.-D. Hsieh, R.-H. Chen, T.-L. Wu, and T.-H. Lin, "Engine performance and pollutant emission of an SI engine using ethanol–gasoline blended fuels," *Atmos Environ*, vol. 36, no. 3, pp. 403–410, Jan. 2002, doi: 10.1016/S1352-2310(01)00508-8.
- [205] M. B. Mobin Siddique *et al.*, "A comprehensive review on the application of bioethanol/biodiesel in direct injection engines and consequential environmental impact," *Clean Eng Technol*, vol. 3, p. 100092, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.clet.2021.100092.
- [206] G. Najafi, B. Ghobadian, T. Yusaf, S. M. Safieddin Ardebili, and R. Mamat, "Optimization of performance and exhaust emission parameters of a SI (spark ignition) engine with gasoline–ethanol blended fuels using response surface methodology," *Energy*, vol. 90, pp. 1815–1829, Oct. 2015, doi: 10.1016/j.energy.2015.07.004.
- [207] S.-R. Jhang, Y.-C. Lin, K.-S. Chen, S.-L. Lin, and S. Batterman, "Evaluation of fuel consumption, pollutant emissions and well-to-wheel GHGs assessment from a vehicle operation fueled with bioethanol, gasoline and hydrogen," *Energy*, vol. 209, p. 118436, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.energy.2020.118436.
- [208] S. Rostami, M. Kiani Deh Kiani, M. Eslami, and B. Ghobadian, "The effect of throttle valve positions on thermodynamic second law efficiency and availability of SI engine using bioethanol-gasoline blends," *Renew Energy*, vol. 103, pp. 208–216, Apr. 2017, doi: 10.1016/j.renene.2016.11.033.
- [209] W. L. R. Gallo and L. F. Milanez, "Exergetic Analysis of Ethanol and Gasoline Fueled Engines," Feb. 2002. doi: 10.4271/920809.

- [210] C. H. Rufino *et al.*, “Exergetic analysis of a spark ignition engine fuelled with ethanol,” *Energy Convers Manag*, vol. 192, pp. 20–29, Jul. 2019, doi: 10.1016/j.enconman.2019.04.035.
- [211] Z. Liu, A. Xu, and B. Long, “Energy from Combustion of Rice Straw: Status and Challenges to China,” *Energy Power Eng*, vol. 03, no. 03, pp. 325–331, 2011, doi: 10.4236/epe.2011.33040.
- [212] Y. Okumura and K. Okazaki, “Pyrolysis and Gasification Experiments of Biomass under Elevated Pressure Condition,” *Journal of Environment and Engineering*, vol. 4, no. 1, pp. 24–35, 2009, doi: 10.1299/jee.4.24.
- [213] M. Baqain, D. Neshumayev, and A. Konist, “TG-MS analysis and kinetic study of co-combustion of ca-rich oil shale with biomass in air and oxy-like conditions,” *Carbon Capture Science & Technology*, vol. 10, p. 100162, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.ccst.2023.100162.
- [214] S. Aich, B. K. Nandi, and S. Bhattacharya, “Effects of eucalyptus leaves blending on combustion characteristics of an Indian reject coal,” *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, vol. 44, no. 1, pp. 1437–1448, Mar. 2022, doi: 10.1080/15567036.2019.1644397.
- [215] M. Sieradzka, A. Mlonka-Mędrala, and A. Magdziarz, “Comprehensive investigation of the CO<sub>2</sub> gasification process of biomass wastes using TG-MS and lab-scale experimental research,” *Fuel*, vol. 330, p. 125566, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.fuel.2022.125566.
- [216] X. Chen *et al.*, “Moisture content effects on self-heating in stored biomass: An experimental study,” *Energy*, vol. 285, p. 129391, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.energy.2023.129391.
- [217] Y. Fan, H. Zhang, Q. Lyu, and Z. Zhu, “Investigation of slagging characteristics and anti-slagging applications for Indonesian coal gasification,” *Fuel*, vol. 267, p. 117285, May 2020, doi: 10.1016/j.fuel.2020.117285.
- [218] Hariana *et al.*, “The effects of additives on deposit formation during co-firing of high-sodium coal with high-potassium and -chlorine biomass,” *Energy*, vol. 271, p. 127096, May 2023, doi: 10.1016/j.energy.2023.127096.
- [219] S. V. Vassilev, C. G. Vassileva, and V. S. Vassilev, “Advantages and disadvantages of composition and properties of biomass in comparison with coal: An overview,” *Fuel*, vol. 158, pp. 330–350, Oct. 2015, doi: 10.1016/j.fuel.2015.05.050.
- [220] C. He *et al.*, “Viscosity determination of the biomass slag in the SiO<sub>2</sub>-CaO-K<sub>2</sub>O system based on the bond distribution,” *Fuel*, vol. 356, p. 129642, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.fuel.2023.129642.
- [221] A. A. Tortosa Masiá, B. J. P. Buhre, R. P. Gupta, and T. F. Wall, “Characterising ash of biomass and waste,” *Fuel Processing Technology*, vol. 88, no. 11–12, pp. 1071–1081, Dec. 2007, doi: 10.1016/j.fuproc.2007.06.011.
- [222] S. Link, P. Yrjas, D. Lindberg, A. Trikkel, and V. Mikli, “Ash melting behaviour of reed and woody fuels blends,” *Fuel*, vol. 314, p. 123051, Apr. 2022, doi: 10.1016/j.fuel.2021.123051.
- [223] F. Li, H. Fan, M. Guo, Q. Guo, and Y. Fang, “Influencing Mechanism of Additives on Ash Fusion Behaviors of Straw,” *Energy & Fuels*, vol. 32, no. 3, pp. 3272–3280, Mar. 2018, doi: 10.1021/acs.energyfuels.7b04012.
- [224] F. Li *et al.*, “Investigation on improve ash fusion temperature (AFT) of low-AFT coal by biomass addition,” *Fuel Processing Technology*, vol. 191, pp. 11–19, Aug. 2019, doi: 10.1016/j.fuproc.2019.03.005.

- [225] B. B. Park, R. D. Yanai, J. M. Sahm, D. K. Lee, and L. P. Abrahamson, "Wood ash effects on plant and soil in a willow bioenergy plantation," *Biomass Bioenergy*, vol. 28, no. 4, pp. 355–365, Apr. 2005, doi: 10.1016/j.biombioe.2004.09.001.
- [226] I. OBERNBERGER, T. BRUNNER, and G. BARNTHALER, "Chemical properties of solid biofuels—significance and impact," *Biomass Bioenergy*, vol. 30, no. 11, pp. 973–982, Nov. 2006, doi: 10.1016/j.biombioe.2006.06.011.
- [227] S. V. Vassilev, D. Baxter, L. K. Andersen, C. G. Vassileva, and T. J. Morgan, "An overview of the organic and inorganic phase composition of biomass," *Fuel*, vol. 94, pp. 1–33, Apr. 2012, doi: 10.1016/j.fuel.2011.09.030.
- [228] S. Zhang, Y. Dong, and G. Qi, "TG-GC-MS study of pyrolysis characteristics and kinetic analysis during different kinds of biomass," *Int J Hydrogen Energy*, vol. 48, no. 30, pp. 11171–11179, Apr. 2023, doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.11.333.
- [229] M. Romero *et al.*, "Assessment of Pilot Scale Pyrolysis Gas Production as Fuel for Cogeneration," *Chem Eng Trans*, vol. 92, pp. 211–216, 2022, doi: 10.3303/CET2292036.
- [230] S. Wang *et al.*, "TG-FTIR-MS analysis of the pyrolysis of blended seaweed and rice husk," *J Therm Anal Calorim*, vol. 126, no. 3, pp. 1689–1702, Dec. 2016, doi: 10.1007/s10973-016-5762-6.
- [231] S. Roman, B. Ledesma, A. Alvarez-Murillo, A. Al-Kassir, and J. F. Gonzalez, "STUDY OF THE DEVOLATILIZATION KINETICS OF KENAF BY ISOCONVERSIONAL METHODS. INFLUENCE OF VARIABLES," *Environ Eng Manag J*, vol. 17, no. 6, pp. 1417–1424, 2018, doi: 10.30638/eemj.2018.140.
- [232] M. Baqain, D. Neshumayev, and A. Konist, "TG-MS analysis and kinetic study of co-combustion of ca-rich oil shale with biomass in air and oxy-like conditions," *Carbon Capture Science & Technology*, vol. 10, p. 100162, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.ccst.2023.100162.
- [233] M. A. Bazelatto Zanoni, H. Massard, and M. Ferreira Martins, "Formulating and optimizing a combustion pathways for oil shale and its semi-coke," *Combust Flame*, vol. 159, no. 10, pp. 3224–3234, Oct. 2012, doi: 10.1016/j.combustflame.2012.05.005.
- [234] L. Loo, B. Maaten, A. Siirde, T. Pihu, and A. Konist, "Experimental analysis of the combustion characteristics of Estonian oil shale in air and oxy-fuel atmospheres," *Fuel Processing Technology*, vol. 134, pp. 317–324, Jun. 2015, doi: 10.1016/j.fuproc.2014.12.051.
- [235] F. Shafizadeh, "Pyrolysis and Combustion of Cellulosic Materials," 1968, pp. 419–474. doi: 10.1016/S0096-5332(08)60173-3.
- [236] Soltes Ed J. and Milne Thomas A., "Pyrolysis Oils from Biomass, Copyright, ACS Symposium Series, Foreword," 1988, pp. i–vi. doi: 10.1021/bk-1988-0376.fw001.
- [237] O. Beaumont and Y. Schwob, "Influence of physical and chemical parameters on wood pyrolysis," *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development*, vol. 23, no. 4, pp. 637–641, Oct. 1984, doi: 10.1021/i200027a002.
- [238] Shafizadeh F. and Anderson L.L., "Fuels from Waste," *New York, Academic Press, Inc.*, pp. 141–159, 1977.
- [239] J. F. González *et al.*, "Almond residues gasification plant for generation of electric power. Preliminary study," *Fuel Processing Technology*, vol. 87, no. 2, pp. 149–155, Jan. 2006, doi: 10.1016/j.fuproc.2005.08.010.
- [240] P. García-Ibañez, A. Cabanillas, and J. M. Sánchez, "Gasification of leached orujillo (olive oil waste) in a pilot plant circulating fluidised bed reactor.

- Preliminary results," *Biomass Bioenergy*, vol. 27, no. 2, pp. 183–194, Aug. 2004, doi: 10.1016/j.biombioe.2003.11.007.
- [241] J. F. González *et al.*, "Pyrolysis of Almond Shells. Energy Applications of Fractions," *Ind Eng Chem Res*, vol. 44, no. 9, pp. 3003–3012, Apr. 2005, doi: 10.1021/ie0490942.
- [242] J. F. González, J. M. Encinar, J. L. Canito, E. Sabio, and M. Chacón, "Pyrolysis of cherry stones: energy uses of the different fractions and kinetic study," *J Anal Appl Pyrolysis*, vol. 67, no. 1, pp. 165–190, Mar. 2003, doi: 10.1016/S0165-2370(02)00060-8.
- [243] J. M. Encinar, J. F. González, and J. González, "Fixed-bed pyrolysis of *Cynara cardunculus* L. Product yields and compositions," *Fuel Processing Technology*, vol. 68, no. 3, pp. 209–222, Dec. 2000, doi: 10.1016/S0378-3820(00)00125-9.
- [244] J. M. Encinar, F. J. Beltrán, A. Ramiro, and J. F. González, "Catalyzed Pyrolysis of Grape and Olive Bagasse. Influence of Catalyst Type and Chemical Treatment," *Ind Eng Chem Res*, vol. 36, no. 10, pp. 4176–4183, Oct. 1997, doi: 10.1021/ie960795b.
- [245] K. VANHEEK, B. STROBEL, and W. WANZL, "Coal utilization processes and their application to waste recycling and biomass conversion," *Fuel*, vol. 73, no. 7, pp. 1135–1143, Jul. 1994, doi: 10.1016/0016-2361(94)90250-X.
- [246] K. G. Mansaray, A. E. Ghaly, A. M. Al-Taweel, F. Hamdullahpur, and V. I. Ugursal, "Air gasification of rice husk in a dual distributor type fluidized bed gasifier," *Biomass Bioenergy*, vol. 17, no. 4, pp. 315–332, Oct. 1999, doi: 10.1016/S0961-9534(99)00046-X.