



**UTILIZACIÓN DEL ACEITE *RICINUS COMMUNIS* (HIGUERILLA) PARA LA
OBTENCIÓN DE BIODIESEL, UN CO-PRODUCTO Y SU SIMULACIÓN EN EL
SOFTWARE ASPEN HYSYS**

**DIANA XIMENA ÁLVAREZ MORA
JIMENA ROBLEDO GIL**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BUCARAMANGA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
INGENIERÍA EN ENERGÍA
BUCARAMANGA**

2019

**UTILIZACIÓN DEL ACEITE *RICINUS COMMUNIS* (HIGUERILLA) PARA LA
OBTENCIÓN DE BIODIESEL, UN CO-PRODUCTO Y SU SIMULACIÓN EN EL
SOFTWARE ASPEN HYSYS**

**DIANA XIMENA ÁLVAREZ MORA
JIMENA ROBLEDO GIL**

TRABAJO DE GRADO

Para optar al título de Ingenieros en Energía

Director: Graciela Chálela Álvarez MSc., Dr.rer.nat. Posdoc

Co-Director: Luis Eduardo Jaimes Reatiga MSc.

Asesora: Norma Yadira Rojas Aguilar (C) MSc.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BUCARAMANGA

FACULTAD DE INGENIERÍAS

INGENIERÍA EN ENERGÍA

BUCARAMANGA

2019

Nota de aceptación

Jurado

Jurado

Bucaramanga, Santander (2019)

AGRADECIMIENTOS

Deseo dar las gracias a mi familia, Rafael Enrique mi padre, Herlinda mi madre y Andrés Felipe mi hermano, ustedes son el motor de mi vida, siempre han estado para mí en los momentos más difíciles, sin ustedes nada de esto sería posible. También, por ser mi apoyo, mi motivación incondicional en mi proceso de formación

Diana Ximena Álvarez Mora

Quiero dar las gracias a mi familia, Lina Sofia Gil, Juan Guillermo Robledo, Juan Carlos Gil, Juan Sebastián Robledo, José Manuel Castelblanco, y mis abuelos Helena y Jorge por todo el apoyo incondicional que me dieron durante toda la trayectoria, fueron totalmente incondicionales en todo momento .

Jimena Robledo Gil

La ejecución de este proyecto se llevó a cabo gracias al patrocinio y a la colaboración del Cinbbya, a la doctora Graciela Chalela, por aportar su conocimiento en el desarrollo de este proyecto de grado, abrírnos las puertas de su espacio y personas a cargo.

A nuestro Co-Director y MSc Luis Eduardo Jaimes, por incentivar desde sus asignaturas, el querer trabajar sobre este tema, por estar pendiente de nuestras solicitudes y brindarnos respuestas concretas y oportunas.

A la química Norma Rojas, gracias por estar 24/7, en cada muestra, ensayo y en cada paso de la realización de este proyecto, por toda la ayuda brindada, mil gracias.

Marvin Torres, gracias infinitas no sólo en la culminación de la carrera, sino por ser nuestro alcahuete en cada una de las materias, por su conocimiento en cuanto al funcionamiento de planta piloto, por brindar serenidad y dar ánimo en materias que se querían desistir, por ser un maestro más del plantel y las ganas al servir.

Mil gracias a todos.

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN.....	16
2.	OBJETIVOS.....	18
2.1.	OBJETIVO GENERAL.....	18
2.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	18
3.	ESTADO DEL ARTE	19
4.	METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN	21
5.	FUNDAMENTO TEÓRICO.....	22
5.1.	MARCO TEÓRICO	22
5.2.	ENERGÍAS RENOVABLES.....	22
5.2.1.	Biomasa.....	23
5.3.	RICINUS COMMUNIS (HIGUERILLA)	24
5.4.	ACEITE DE RICINO	31
5.4.1.	Composición.....	32
5.4.2.	Características fisicoquímicas del aceite de ricino.....	32
5.4.3.	Usos.....	34
5.4.4.	Obtención del aceite de ricino	34
5.5.	EXTRACCIÓN DE ACEITE DE RICINO	35
5.5.1.	Extracción mecánica	35
5.5.2.	Extracción química	36
5.6.	BIORREFINERIA.....	37
5.7.	BIODIESEL.....	38
5.7.1.	Obtención de biodiesel (transesterificación).....	38
5.7.2.	Biodiesel de Higuierilla.....	41
5.7.3.	Normativa para Biodiesel.....	41
5.7.4.	Producción mundial de biodiesel.....	43
6.	METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	45
6.1.	MATERIALES DE LABORATORIO	45
6.2.	ESPECIFICACIONES DE LOS MATERIALES UTILIZADOS	46
6.3.	CARACTERIZACIÓN DE SEMILLA DE HIGUERILLA	47
6.3.1.	Descripción de semilla	47
6.3.2.	Proceso de caracterización de la semilla	48

6.4.	EXTRACCIÓN DEL ACEITE	48
6.4.1.	Descripción del proceso	48
6.4.2.	Caracterización del aceite	50
6.5.	DISEÑO EXPERIMENTAL	54
6.6.	PRODUCCIÓN DE BIODIESEL	55
6.6.1.	Condiciones de reacción	55
6.6.2.	Elementos utilizados	55
6.6.3.	Especificaciones de equipos.....	55
6.6.4.	Proceso de producción.....	56
6.7.	CARACTERIZACIÓN DEL BIODIESEL	60
6.7.1.	Densidad	60
6.7.2.	Índice de acidez.....	61
6.7.3.	Viscosidad	61
6.7.4.	pH.....	62
6.7.5.	% de rendimiento.....	63
6.8.	PRODUCCIÓN DEL CO-PRODUCTO.....	63
6.8.1.	Tipo de crema	63
6.8.2.	Ingredientes utilizados.....	64
6.8.3.	Cantidad de ingredientes.....	64
6.8.4.	Proceso de producción.....	65
7.	DESARROLLO DE SOFTWARE.....	67
7.1.	SIMULACIÓN ASPEN HYSYS.....	67
7.1.1.	Proceso de Simulación	67
8.	RESULTADOS	75
8.1.	RESULTADOS DISEÑO DE EXPERIMENTOS	75
8.2.	RESULTADOS DE CARACTERIZACIÓN DEL BIODIESEL.....	76
8.2.1.	Densidad	76
8.2.2.	Índice de acidez.....	76
8.2.3.	Viscosidad	77
8.2.4.	pH.....	78
8.2.5.	% rendimiento.....	78
8.2.6.	Cromatografía	79

8.3.	ESTUDIO COMPARATIVO EL ACEITE DE PALMA Y EL ACEITE DE HIGUERILLA.....	81
8.3.1.	Comparación.....	81
8.3.2.	Comparación de rendimiento del cultivo	82
8.3.3.	Impactos ambientales generados por el cultivo	83
8.4.	DIAGRAMA DE LA BIOREFINERIA	84
8.5.	OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE CUMPLIDOS	85
9.	CONCLUSIONES.....	87
10.	RECOMENDACIONES.....	87
11.	BIBLIOGRAFÍA.....	88

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Etapas de la producción del biodiesel.....	21
Figura 2 Etapas de la producción del co-producto	21
Figura 3 Clasificación de las fuentes Energéticas Renovables	22
Figura 4 Desarrollo del sistema radical de la higuierilla, con raíces laterales superficiales y raíz central profunda.....	26
Figura 5 A-Planta de higuierilla con tallo color verde y con cera. B- Planta de higuierilla con tallo color rojo y sin cera	26
Figura 6 Hojas de higuierilla de diferentes formas y número de lóbulo	27
Figura 7 A-Estado inicial de la inflorescencia. B-Inflorescencia con flores masculinas en la parte basal. C-Inflorescencia con flores femeninas en la parte superior.	27
Figura 8 Racimo típico del material Roja: cónico, de pedúnculos cortos con frutos de color rojo.....	28
Figura 9 Representación gráfica de la semilla utilizada.....	28
Figura 10 Representación de la anatomía general de la Higuierilla	29
Figura 11 Caballoneo recomendado para la siembra de higuierilla en lotes con problemas de encharcamiento.	31
Figura 12 Esquema de siembra con una densidad poblacional de 6.666 plantas/ha.....	31
Figura 13 Triglicérido del aceite de ricino.....	32
Figura 14 Procedimiento para hacer eficiente la obtención del aceite de ricino.....	35
Figura 15 Prensa utilizada en el proceso de extracción – Cinbbya	36
Figura 16 Esquema general de una biorrefinería.....	37
Figura 17 Rutas de conversión de la biomasa en energía y combustibles.....	38
Figura 18 Desarrollo del mercado mundial de biodiesel.....	44
Figura 19 Calibrador o pie de rey Fuente: Elaboración propia	48
Figura 20 Proceso de extracción del aceite.....	49
Figura 21 Picnómetro	52
Figura 22 A-Viscosímetro BROOKFIELD VISCOMETER VD2T B- Prueba de viscosidad	52
Figura 23 A- Balanza con los 5 gramos de la prueba de acidez B- Muestras de pruebas de acidez	54
Figura 24 Proceso del diseño experimental.....	55
Figura 25 Diagrama de proceso de producción del Biodiesel	57
Figura 26 Calentamiento y agitación del aceite	58
Figura 27 Mezcla de aceite con etanol y catalizador.....	59
Figura 28 Decantación de muestra por 24 horas.....	59
Figura 29 (A) Separación Glicerina y Biodiesel (B) Lavado del biodiesel.....	60
Figura 30 Muestras de prueba de índice de acidez del biodiesel	61
Figura 31 pH metro utilizado de marca Stara1215 orion phmetro thermo scientific	62
Figura 32 A-Prueba 1 de pH B-Prueba 2 de pH	63

Figura 33	Ingredientes preparación co-producto	64
Figura 34	Cantidad de ingredientes para preparación co-producto.....	65
Figura 35	Crema envasada	65
Figura 36	Simulación de la biorrefinería en HYSYS.....	69
Figura 37	Datos en HYSYS de la línea de aceite de higuera a gran escala	70
Figura 38	Datos en HYSYS de la línea de etanol a gran escala.....	70
Figura 39	Datos en HYSYS de la línea de NaOH a gran escala.....	71
Figura 40	Datos en HYSYS de la línea de producto a gran escala	71
Figura 41	Producto obtenido en HYSYS a gran escala.....	72
Figura 42	Datos en HYSYS de la línea de aceite de higuera con datos experimentales	72
Figura 43	Datos en HYSYS de la línea de etanol con datos experimentales	73
Figura 44	Datos en HYSYS de la línea de NaOH con datos experimentales	73
Figura 45	Datos en HYSYS de la línea de producto con datos experimentales.....	74
Figura 46	Resultados de patrón de biodiesel	80
Figura 47	Resultado de cromatografía de biodiesel de higuera	80
Figura 48	Referencia de rendimiento de palma e higuera.....	82
Figura 49	Diagrama de la biorrefinería a emplear en el bioproceso de producción de Biodiesel y residuos	84
Figura 50	ODS cumplidos en nuestro proyecto	86
Figura 51	Diagrama de Pareto Estandarizada para Viscosidad.....	92
Figura 52	Diagrama de Pareto estandarizado para la densidad.....	94
Figura 53	Diagrama de Pareto estandarizada para índice de acidez.....	96

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Nombres populares de la higuierilla	25
Tabla 2. Representación de la composición de la semilla.....	29
Tabla 3. Porcentaje de ácidos grasos presentes en el aceite de ricino	34
Tabla 4. Partes de la prensa	36
Tabla 5. Comparación de las normativas del biodiesel.....	42
Tabla 6 . Materiales de laboratorio utilizados	45
Tabla 7. Descripción de las semillas trabajadas	47
Tabla 8 . Proceso de caracterización de la semilla	48
Tabla 9 . Rendimiento de semilla 1	49
Tabla 10 . Rendimiento de semilla 2.....	50
Tabla 11 . Normativa para la caracterización del aceite	50
Tabla 12. Resultados densidades semilla 1	51
Tabla 13.Resultados densidades semilla 2.....	51
Tabla 14. Resultados de las viscosidades	53
Tabla 15 . A- Resultados de la acidez semilla 1 B- Resultados de la acidez semilla 2....	54
Tabla 16. . Elementos de laboratorio utilizados para la producción de Biodiesel.....	56
Tabla 17. Datos para hallar la relación aceite/etanol	57
Tabla 18. Relaciones obtenidas.....	57
Tabla 19 Parámetros de HYSYS	67
Tabla 20. Definición de las Variables a ser medidas.....	75
Tabla 21 . Definición de los factores experimentales	75
Tabla 22. Selección del diseño experimental	75
Tabla 23.Indicación del modelo a utilizar	76
Tabla 24.Resultados muestra 1 prueba densidad biodiesel	76
Tabla 25 . Resultados muestra 2 prueba densidad biodiesel	76
Tabla 26. Resultados promedio prueba densidad biodiesel	76
Tabla 27. A-Resultados muestra 1 de la prueba del índice de acidez al biodiesel.	77
Tabla 28. C-Resultados muestra 3 de la prueba del índice de acidez al biodiesel	77
Tabla 29. Datos para poder calcular la viscosidad del biodiesel	77
Tabla 30 . Resultados de las pruebas realizadas a la viscosidad del biodiesel.....	78
Tabla 31 . Resultados de la prueba de pH al biodiesel.....	78
Tabla 32 . Resultados de los rendimientos para cada una de las pruebas realizadas de biodiesel.....	79
Tabla 33. Comparación de usos del aceite de palma y el aceite de higuierilla.....	82
Tabla 34. Comparación de rendimiento de aceite de palma y aceite de higuierilla	83
Tabla 35. Impactos ambientales directos e indirectos en el cultivo de Higuierilla	83
Tabla 36. Impactos ambientales directos e indirectos en el cultivo de Higuierilla	84
Tabla 37. Análisis de los resultados de los experimentos	91
Tabla 38 . Efectos estimados para Viscosidad (cPs)	92
Tabla 39. Análisis de Varianza para Viscosidad	93

Tabla 40. Efectos estimados para densidad (kg/m ³)	93
Tabla 41. Análisis de Varianza para densidad	95
Tabla 42 .Efectos estimados para Índice de Acidez.....	95
Tabla 43. Análisis de Varianza para Índice de Acidez	96
Tabla 44 Efectos estimados para pH.....	97
Tabla 45. Análisis de Varianza para pH	98
Tabla 46. Efectos estimados para % Rendimiento	99
Tabla 47. Análisis de Varianza para % Rendimiento	100
Tabla 48. Mezclador MIX-100 usado en la simulación.....	101
Tabla 49. Reactor CSTR-100 usado en la simulación	101
Tabla 50. Separador de 3 fases V-100 usado en la simulación	101
Tabla 51. Torre de Absorción T-100 usado en la simulación.....	101
Tabla 52 Separador V-101 usado en la simulación.....	102
Tabla 53 Torre de Absorción T-101 usado en la simulación.....	102

LISTA DE GRÁFICAS

Grafica 1. Efectos principales para la viscosidad.....	93
Grafica 2. Graficas de efectos principales para densidad	95
Grafica 3. Efectos principales para índice de acidez.....	97
Grafica 4.Efectos principales para pH	98
Grafica 5 . Diagrama de Pareto estandarizada para % de rendimiento.....	99

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A Análisis de resultados diseño de experimentos	91
ANEXO B Equipos utilizados para la Simulación	101
ANEXO C 50 ton/año Reporte de reacción de HYSYS	103
ANEXO C 7,135kg/h Reporte de reacción de HYSYS.....	106

RESUMEN

TÍTULO: Utilización del aceite *Ricinus Communis* (higuerilla) para la obtención de biodiesel, un co-producto y su simulación en el software Aspen Hysys
AUTORES: Diana Ximena Álvarez Mora, Jimena Robledo Gil.

Este proyecto desarrolla la caracterización de la semilla de la planta de Higuerilla (*Ricinus Communis*), la extracción del aceite, su refinación y el proceso de transesterificación para la obtención del biodiesel. Se discuten las características, limitaciones y beneficios del biodiesel obtenido. Su justificación se explica en su desarrollo en los aspectos de viabilidad y metodología empleada.

Mediante diseño experimental se obtuvo biodiesel a partir de aceite de higuerilla, el cual tuvo un proceso de extracción experimental en laboratorio. Posteriormente se realizó una caracterización para poder analizar parámetros de calidad del mismo, midiendo su densidad, viscosidad cinemática, humedad, y acidez.

Para el caso de Colombia no se puede partir de una referencia en el desarrollo de esta biomasa, pero es una opción promisoriosa debido a que no pertenece a la cadena alimenticia por su nivel de toxicidad, además, de que brinda unas grandes ventajas en su cultivo.

Para obtener el producto final Biodiesel se llevó a cabo una reacción de transesterificación del aceite de higuerilla con etanol, usando hidróxido de sodio (NaOH) como catalizador. De este proceso de transesterificación se obtuvo glicerina, la cual fue empleada en la producción del co-producto; este se produjo con el fin de demostrar el aprovechamiento de la higuerilla en la biorefinería.

Paralelamente se simuló en el Software Aspen Hysys para comparar los resultados obtenidos, con los alcanzados en laboratorio.

PALABRAS CLAVE: Ambiente, Biorrefinería, Biodiesel, Biotecnología, Energía renovable, *Ricinus communis*.

ABSTRACT

TITLE: Use of Ricinus Communis Oil to obtain Biodiesel, a co-product and its simulation in Aspen Hysys Software

AUTHORS: Diana Ximena Álvarez Mora, Jimena Robledo Gil.

This project develops the characterization of the seed of the Higuierilla plant (*Ricinus Communis*), the extraction of the oil, its refining and the transesterification process to obtain the biodiesel. The characteristics, limitations and benefits of the biodiesel obtained are discussed. Its justification is explained in its development in the aspects of viability and methodology used.

By means of an experimental design, biodiesel was obtained from fig oil, which had an experimental extraction process in the laboratory. Subsequently, a characterization was performed to analyze its quality parameters, measuring its density, kinematic viscosity, humidity, and acidity.

In the case of Colombia, it is not possible to start from a reference in the development of this biomass, but it is a promising option because it does not belong to the food chain because of its toxicity level, in addition, because it offers great advantages in its cultivation.

To obtain the final Biodiesel product, a transesterification reaction of the fig oil with ethanol was carried out, using sodium hydroxide (NaOH) as a catalyst. Glycerin was obtained from this transesterification process, which was used in the production of the co-product; This occurred in order to demonstrate the use of the fig tree in the biorefinery.

At the same time, it was simulated in the Aspen Hysys Software to compare the results obtained, with those achieved in the laboratory.

KEYWORDS: Biodiesel, Biorefinery, Biotechnology, Environment, Renewable Energy, Ricinus Communis,.

1. INTRODUCCIÓN

La producción de Biodiesel ha logrado un auge mundial gracias a su crecimiento en los últimos años, producto de la acogida por parte de varios países con interés de reemplazar los combustibles fósiles, ya que se ve como la alternativa más viable. El respaldo por parte de las grandes potencias ha hecho que este movimiento tome mucha importancia gracias a algunas políticas con apoyo en investigación y producción con subsidios y más beneficios.

En el contexto colombiano, el uso del biodiesel está enfocado al sector transporte, en donde se propuso ir reemplazando el combustible tradicional gradualmente. El programa empezó en el año 2005 con mezcla E5 (5:95 bioetanol: gasolina, base volumétrica) usada en las principales ciudades. En el 2008, la mezcla B5 (5:95 biodiesel: diesel, base volumétrica) se incorporó al programa de biocombustibles. Su producción e implementación, irán aumentando gradualmente hasta el año 2020. Actualmente, ambos biocombustibles se usan en mezclas al 8-10%. Las emisiones se han reducido con el uso de E10-B10.

En Colombia, los biocombustibles corresponden mayormente a primera generación (bioetanol y biodiesel), producidos con caña de azúcar y aceite de palma. El cumplimiento de los objetivos energéticos implica un conjunto de situaciones complejas, como la expansión de los cultivos y / o la intensificación de la cosecha, lo que podría implicar un desempeño ambiental negativo.

Ante dicha problemática, los biocombustibles de tercera generación aparecen como una alternativa más clara, sin afectar la seguridad alimentaria. Las semillas de higuierilla no son aptas para el consumo de ningún ser vivo, debido a la toxina contenida en las ellas, motivo por el cual esta semilla no hace parte de la canasta alimenticia. La higuierilla, como base del aceite para producción de biodiesel, otorga ciertas características que la hacen competitiva y eficiente; debido a sus rendimientos de producción de aceite (alrededor del 47-49% del peso total), sus bajos costos de cultivo y su simplicidad en el tratamiento. Dichas características hacen a la higuierilla una materia prima económica y tecnológicamente viable.

Para el desarrollo de este proyecto se tuvieron en cuenta dos conceptos importantes, primero, el de biorrefinería y en el segundo el significado que tienen los Objetivos de Desarrollo Sostenible también conocidos como Objetivos Mundiales, fueron adaptados por los Estados Miembros de los Programas de las Naciones Unidas para el Desarrollo en 2015 como un llamado universal para proteger el planeta, poner fin a la pobreza y garantizar paz y prosperidad a todas las personas para el 2030.

El desarrollo del proyecto tuvo varias etapas: la caracterización de la semilla, seguida por la extracción del aceite, posteriormente su refinación,

transesterificación y una última etapa de caracterización del biodiesel como resultado. La metodología empleada en este trabajo fue un factor importante para poder tener resultados satisfactorios.

Es importante tener en cuenta que la materia prima empleada para la obtención del biodiesel es renovable. También cabe resaltar que este producto es usado en la combustión de motores diésel, calderas, generadores eléctricos, entre otros.

Al terminar la parte experimental del proyecto se realizó la simulación de la producción de biodiesel en el software Aspen Hysys V10, calculando los flujos de energía y materia a escala industrial.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

Obtener biodiesel y un co-producto a partir de aceite de *Ricinus Communis*, para su posterior análisis y simulación en el software Aspen Hysys.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Extraer el aceite de *Ricinus communis* (Higuerilla) para la caracterización fisicoquímica necesaria para la producción del biocombustible y su co-producto.
- Caracterizar mediante un análisis químico y físico el aceite y el biodiesel obtenidos.
- Elaborar el biocombustible de acuerdo a la norma NTC 5444 que rige en Colombia.
- Realizar una relación a gran escala entre las hectáreas necesarias de semilla para la obtención de cierta cantidad de galones de biocombustible.
- Simular un proceso de producción de biodiesel de higuerilla a escala industrial, con la ayuda del software Aspen Hysys V10.

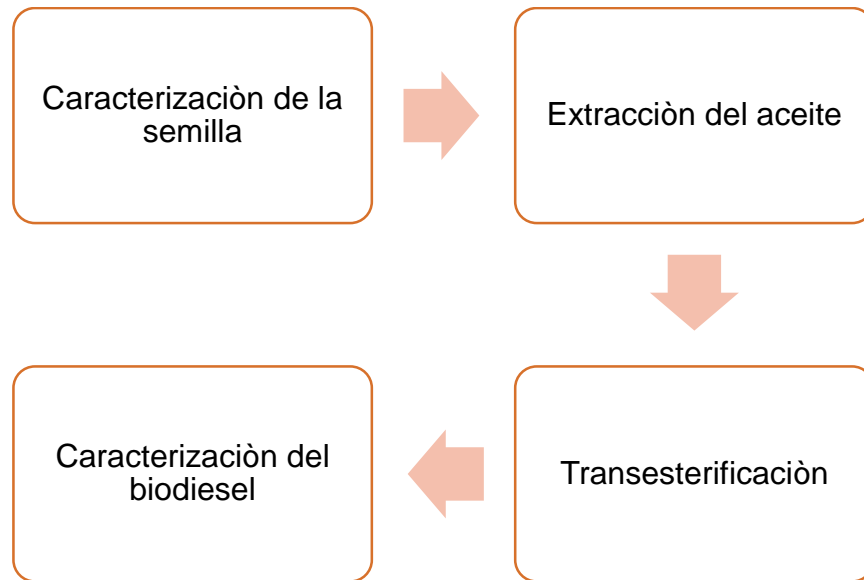
3. ESTADO DEL ARTE

Nombre	Autor	Fecha	Resumen
<p>El biodiesel de aceite de higuera como combustible alternativo para motores diésel.</p> <p>[1]</p>	<p>Alirio Benavides</p> <p>Pedro Benjumea</p> <p>Veselina Pashova</p>	<p>2007</p>	<p>Este artículo presenta la producción de biodiesel a partir de aceite de higuera, y posteriormente realizan comparaciones en la mezcla de aceite de higuera y diésel convencional aumentando el porcentaje de aceite y disminuyendo el porcentaje de diésel convencional, para poder determinar los efectos sobre un motor diésel.</p>
<p>Producción experimental de biodiesel a partir de la reacción de transesterificación catalítica del aceite de ricino.[2]</p>	<p>Harold Casalins</p>	<p>2007</p>	<p>Presenta la mejor relación de aceite de higuera, metanol y NaOH como catalizador, para la obtención de biodiesel, donde ,obtuvieron 0.5% (referido a la masa del aceite) de NaOH una temperatura de 60°C y relaciones molares aceite/alcohol de 1:6 y 1:10 .</p>
<p>Análisis de ciclo de vida para la producción de biodiesel de higuera a partir de aceite de higuera y etanol. [3]</p>	<p>Álvaro José Pérez, Kelly Johana Dumar</p>	<p>2011</p>	<p>Tiene la finalidad de obtener un perfil ambiental potencial de la cadena de producción de biodiesel de aceite de higuera.</p>
<p>Transesterificación de aceite de higuera crudo utilizando catalizadores heterogéneos - estudio preliminar.[4]</p>	<p>Gina Hincapié</p> <p>Andrés Moreno</p> <p>Diana López</p>	<p>2011</p>	<p>Este estudio realizó la transesterificación de aceite de higuera con etanol y metanol, cambiando los catalizadores y su porcentaje de uso. Posteriormente hallaron con cual catalizador se obtuvo más biodiesel.</p>

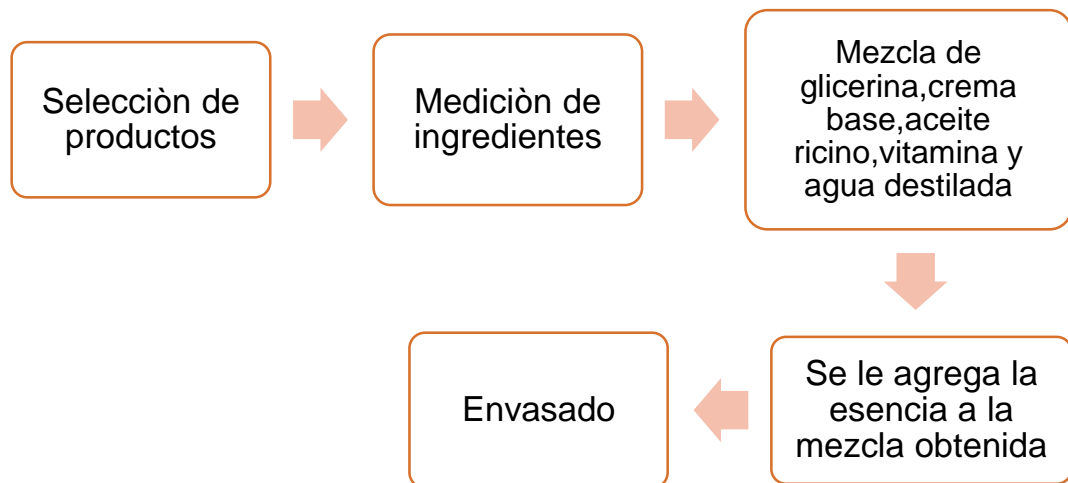
Comportamiento eco fisiológico de variedades de higuera (Ricinus communis L.) para la producción sostenible de aceite y biodiesel en diferentes agro ecosistemas colombianos.[5]	Oscar de Jesús Córdoba Gaona	2012	Es el estudio de los efectos que tiene el clima sobre la higuera y cómo estos pueden variar algunas características de su aceite, afectando directamente en la obtención de biodiesel a partir de aceite de higuera.
Obtención de biodiesel a partir de aceites usados en casa habitación de la comunidad del Refugio. [6]	Juan Antonio Alfonso Álvarez	2013	Este trabajo de investigación está enfocado en el estudio del potencial de biomasa residual en Tijuana Baja, y principalmente es aceite usado. Esto con el fin de caracterizar este aceite, para saber si se puede utilizar para la producción de biodiesel.
Aprovechamiento de residuos agroindustriales como Biocombustible y biorrefinerías.[7]	Deyanira Muñoz Muñoz Álvaro Javier Pantoja Matta Milton Fernando Cuatin Guarín	2013	Es el estudio del aprovechamiento de residuos agroindustriales, se realiza toda la caracterización de los residuos para saber si son viables para ser aprovechados como biocombustibles y/o biorrefinerías.
Síntesis de biodiesel a partir de higuera (ricinus communis) y análisis de su ciclo de vida .[8]	Melisa Esquivel Rojas Julián Enrique Santander Gómez	2018	Se obtuvo biodiesel a partir de aceite de higuera, y con ayuda del software SimaPro se realizó todo el análisis de ciclo de vida de este proceso, para determinar cuáles son los impactos ambientales generados en la producción de biodiesel a partir de aceite de higuera.
Evaluación del funcionamiento del motor diésel electrónico con el uso de biodiesel a base de aceite de higuera con mezcla B10.[9]	Franklin Mateo Arboleda Garrido	2018	En el trabajo se produjo biocombustible a partir de higuera por medio de transesterificación, el objetivo de obtener este biodiesel era realizar diferentes pruebas en algunos motores para demostrar si se producen diferencias en el desempeño del motor.

4. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

La metodología de investigación se clasificó en dos, la de la producción de biodiesel que tiene cinco etapas y la de la obtención del co-producto que tiene tres etapas.



*Figura 1 Etapas de la producción del biodiesel.
Fuente: Elaboración propia*



*Figura 2 Etapas de la producción del co-producto
Fuente: Elaboración propia*

5. FUNDAMENTO TEÓRICO

5.1. MARCO TEÓRICO

5.2. ENERGÍAS RENOVABLES

Las energías renovables son aquellas que se obtienen a partir de fuentes naturales que producen energía de forma inagotable e indefinida. Por ejemplo, la energía solar, la energía eólica o la energía mareomotriz son fuentes renovables de energía. También se consideran renovables cuando se obtienen a partir de fuentes que se regeneran con el tiempo de manera natural, como la masa forestal. [10]

Una de las principales ventajas de las energías renovables es que, además de ser inagotables, presentan un nulo o bajo impacto negativo sobre el medio ambiente, por lo que se consideran energías limpias. En la actualidad las energías renovables son una realidad presente en nuestra sociedad y sus beneficios para el medio ambiente son más que evidentes.[10]

Todas las sociedades del planeta son consumidoras de energía en mayor o menor medida, pero la realidad es que la mayor parte de la energía que se consume procede de fuentes no renovables, como los combustibles fósiles y la energía nuclear, cuyo impacto negativo sobre el medio ambiente es superior. Un aspecto para destacar de las energías renovables es que pueden ser aplicadas y explotadas a nivel local, lo que ayuda a disminuir la dependencia de las poblaciones hacia los grandes productores de energía, favoreciendo el desarrollo económico y la creación de empleo.[10][11]

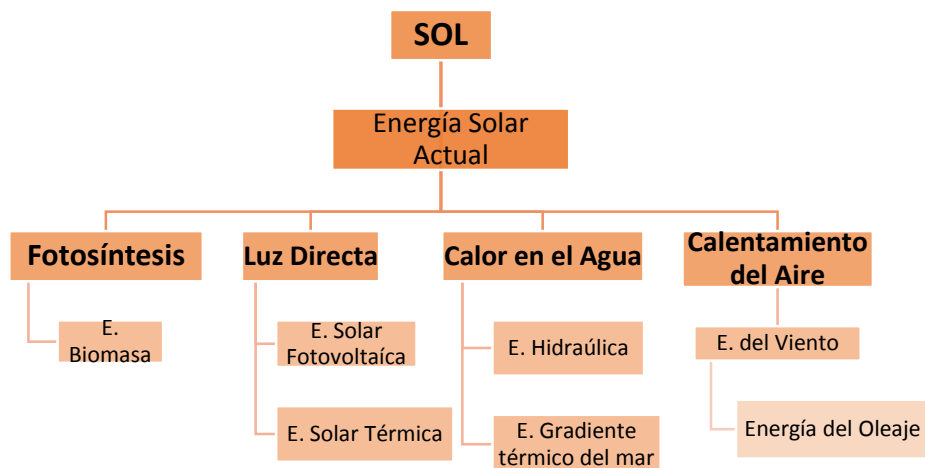


Figura 3 Clasificación de las fuentes Energéticas Renovables
Fuente: Elaboración propia

5.2.1. Biomasa

Por biomasa se refiere a un compuesto orgánico renovable de origen animal o bien vegetal. De la biomasa se puede extraer energía ya que los seres vivos almacenan energía, y como se mencionó anteriormente, la biomasa proviene de ellos.[12]

La biomasa se usa como fuente energética desde varios siglos, pero cuando aparecieron los combustibles fósiles como el petróleo, la biomasa perdió protagonismo. La biomasa se encuentra de diferentes tipos:[12]

- La biomasa agrícola: residuos de cosechas y los cultivos energéticos agrícolas
- Las biomásas forestales: Residuos procedentes de la limpieza de los bosques, los restos de podas, de claras, así como los cultivos energéticos forestales
- Las biomásas ganaderas: residuos del ganado como los estiércoles y los purines
- Las biomásas industriales: residuos orgánicos procedentes de la industria alimentaria como las fábricas de aceite de oliva o las conserveras, de la industria de la madera, como las fábricas de muebles, así como de la industria papelera.
- Las biomásas Urbanas: Fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos.
- Las biomásas acuosas: proceden de plantas acuáticas y algas

Las biomásas se transforman mediante procesos mecánicos, termoquímicos y biológicos, para obtener productos que se conocen como: los pellets y las astillas para generar calor, Biogás para generar electricidad renovable, biodiesel, bioetanol, Biocarburantes avanzados y biohidrógeno.[12]

Cuando la transformación de la biomasa da lugar a la generación de electricidad, calefacción o biocombustibles se conoce como bioenergía, es decir, a partir de la biomasa se puede generar electricidad, calefacción para viviendas, hospitales, polideportivos, así como calor y vapor para procesos industriales, además de biocarburantes para su uso en transporte, biodiesel y bioetanol para automoción, bioqueroseno para aviación.[12]

Cada vez es más común encontrar instalaciones de biomasa en las que se lleva a cabo varios procesos de transformación y se obtienen distintos tipos de energía y biocombustibles, además de obtener otros productos con alto valor añadido como son los bioplásticos y los componentes para alimentación y para cosméticos entre otros, son las biorrefinerías.[12]

Más allá de generar una energía renovable, el aprovechamiento de la biomasa conlleva importantes beneficios para la economía, el empleo y el medio ambiente.

La biomasa permite generar de manera sostenible energía natural y de calidad en su forma de electricidad, calor y biocarburantes para el transporte.[12]

Ventajas de la biomasa: [13]

- La biomasa es una energía renovable de futuro, respetuosa con el Medioambiente, que contribuye al cumplimiento del Protocolo de Kyoto.
- Las Emisiones de CO₂ (dióxido de carbono) de la biomasa son neutras.
- Si la materia prima de la biomasa empleada procede de residuos, estos combustibles ayudan al reciclaje.
- La biomasa es una fuente de energía inagotable, siempre que se gestione sosteniblemente
- La biomasa es una energía constante y almacenable.
- La energía producida a partir de biomasa no está sujeta a las fluctuaciones de precios de mercado y es una fuente de trabajo en zonas agrícolas poco desarrolladas.
- La biomasa es una muy buena alternativa al petróleo, ya que es un recurso renovable que está más uniformemente distribuido sobre la superficie de la Tierra y es una fuente de energía que puede ser explotada usando tecnologías más favorables al medio ambiente.
- La producción de biomasa conlleva la limpieza de los bosques, lo que ayuda a prevenir el riesgo de incendios forestales.

5.3. RICINUS COMMUNIS (HIGUERILLA)

5.3.1.1. Clasificación

ORDEN: Euphorbiales
FAMILIA: Euphorbiaceae
GÉNERO: Ricinus
ESPECIE: communis

5.3.1.2. Características

La higuera (*Ricinus communis* L.), planta C3 de la familia *Euphorbiaceae*, es una especie monotípica que está formada por 22 subespecies, así como por un considerable número de cultivares creados por los mejoradores de plantas para su explotación. En la actualidad está considerada como una de las especies más importantes del reino vegetal de aplicación y explotación industrial. Flemming y Jongh (2011) plantearon que, a partir de sus diferentes componentes, en particular las semillas, se pueden obtener 700 productos industriales medicamentos, cosméticos, lubricantes y barnices, y que en la actualidad se ha comenzado a investigar sobre su uso como combustible ecológico (biodiesel), el cual es menos dañino al ambiente. [14]

La siguiente tabla describe los nombres populares con que se conoce en el mundo la higuera.

*Tabla 1. Nombres populares de la higuera
Fuente: Elaboración propia*

País	Nombre
Argentina	Tártago, higuera, castor.
Brasil	Mamona, mamoneira, tártago, ricino, ricino mamona, carrapateiro, palma christi.
Paraguay	Mbai-sivó, ambaí-sivó, palma christi, higuera infernal.
Colombia	Catapucia mayor, ricino, higuera.
Alemania	Rizinusöl
Francia	Huile de Ricin
México	Higuera, higuera infernal, tlapatl.

5.3.1.3. Origen

Beltrao, Cardoso y Severino (2005) opinan que la higuera es de origen tropical y procede del norte de África, específicamente de Etiopía, donde se conoce hace más de 6 000 años. Se adapta a zonas áridas, semiáridas y empobrecidas; pero su resistencia a la sequía es una de sus características más destacadas. Aunque es un cultivo exigente, prospera bien en suelos de mediana fertilidad, profundos, sueltos, permeables, aireados, bien drenados, con cantidades adecuadas de elementos nutritivos y pH por encima de 5,5. [14]

5.3.1.4. Raíz

Es de fundamental importancia conocer el sistema radical de la higuera, tanto para su manejo como para su explotación económica, pues gran parte de las características de esa planta son determinadas por la estructura radical, la cual está invisible debajo del suelo [15]

El sistema radical es pivotante y presenta raíces ramificadas y superficiales; puede alcanzar profundidades hasta de 6 metros en plantas de ciclo perenne. [15]

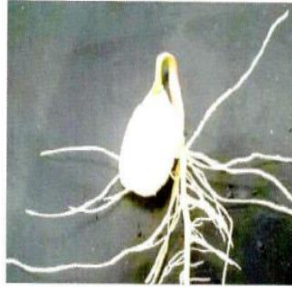


Figura 4 Desarrollo del sistema radical de la higuera, con raíces laterales superficiales y raíz central profunda

Fuente: Jorge I. Abril Castro

5.3.1.5. Tallo

El tallo es erecto, circular y parcialmente hueco; ramificado y varía en longitud; de color verde, rojo o morado y con la presencia o ausencia de cera. Está bien definido por un número de nudos, a partir de los cuales emerge una hoja en cada uno; los entrenudos tienden a ser cortos en la base e incrementar en longitud a una mayor altura sobre la planta. Según Beltráo et al., ;(2001) el tallo es suculento y a medida que madura se vuelve leñoso. [15]



(A)



(B)

Figura 5 A-Planta de higuera con tallo color verde y con cera. B- Planta de higuera con tallo color rojo y sin cera

Fuente: Jorge I. Abril Castro

5.3.1.6. Hojas

Es una planta bien foliada y las hojas se distribuyen de forma alterna, con filotaxia 2/5; son palmadas, con 5 a 11 lóbulos acuminados, las márgenes son cerradas, con o sin cera y varían en longitud y coloración, desde el verde, rojo, hasta el morado. [15]



Figura 6 Hojas de higuera de diferentes formas y número de lóbulo
Fuente: Jorge I. Abril Castro

5.3.1.7. Flores

Las flores son normalmente monoicas, dispuestas en inflorescencias tipo racimo, en las cuales, la parte basal está ocupada por flores masculinas, y el ápice, por las femeninas; ambas flores están desprovistas de corola. Las masculinas pueden representar del 30 % al 50 % del total de flores y algunas veces están ausentes o dispersas entre las femeninas. La inflorescencia puede alcanzar los 80 cm de longitud y las flores dioicas son raras .[15]



(A)



(B)



(C)

Figura 7 A-Estado inicial de la inflorescencia. B-Inflorescencia con flores masculinas en la parte basal. C-Inflorescencia con flores femeninas en la parte superior.

Fuente: Jorge I. Abril Castro

5.3.1.8. Fruto

El fruto es una cápsula tricarpelar, con una semilla por carpelo; de forma esférica o alargada, dehiscente o indehiscente y puede ser lisa o con estructuras semejantes a espinas, denominadas acúleos. Se distribuyen en racimos que pueden ser cónicos, esféricos o cilíndricos, de longitud variable, en función del cultivar y de las condiciones ambientales. [15]



Figura 8 Racimo típico del material Roja: cónico, de pedúnculos cortos con frutos de color rojo

Fuente: Jorge I. Abril Castro

5.3.1.9. Semillas

Las semillas de la higuera se caracterizan por componerse de un aceite fijo (el oleum ricino), en el que entre 35% a 55% lo constituyen los glicéridos de los ácidos ricinoleico, isoricinoleico, ricina (una fitotoxina de alta venenosidad según vía endovenosa y oral, que podría ser causante de muerte) y ricinina (un alcaloide con fórmula $C_8H_8N_2O_2$). Las semillas de higuera se componen de grasas en un promedio de 70%, del que el 68% corresponde a tricinoleína (un glicérido del ácido ricinoléico), 20% son proteínas, y el resto le corresponde a la ricina (una albúmina de toxicidad, que a dosis de mínimo 0.03 gramos se considera letal, y que a su vez correspondería a 25 gramos de semillas) y a las enzimas con presencia de lipasa (que en la aplicación industrial se emplean en la producción de detergentes, aun en la industria de leche, queso, panaderías, para mejoras en los sabores, bebidas, etc.) y vitaminas como la E. [16]



Figura 9 Representación gráfica de la semilla utilizada

Fuente: Elaboración propia

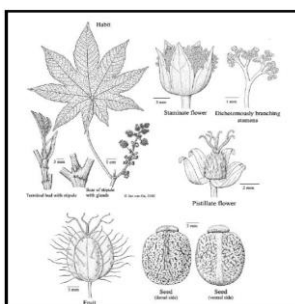


Figura 10 Representación de la anatomía general de la Higuierilla
Fuente: Iris Adriana Sánchez Medina

5.3.1.10. Utilidad

El aceite extraído de las semillas (aceite de ricino) ha sido usado medicinalmente desde tiempos muy remotos, pero actualmente la mayor parte del aceite que se produce tiene como destino el uso industrial. [16]

Se ha empleado en la fabricación de cuero artificial, pinturas, barnices, linóleos, lubricante de motores de altos regímenes de trabajo, biodiesel, etc. [16]

5.3.1.11. Composición de la semilla

La semilla está compuesta por una resina que es altamente tóxica para el hombre y los animales, debiendo tener cuidado con los residuos de este compuesto en la extracción del aceite.[16]

Tabla 2. Representación de la composición de la semilla
Fuente: Iris Adriana Sánchez Medina

Composición	Porcentaje
Aceite	46.19
Almidón	20
Albúmina	0.5
Goma	4.31
Resina bruta	1.91
Fibra leñosa	20
Agua	7.09
Total	100

5.3.1.12. CULTIVO DE LA SEMILLA DE HIGUERILLA

5.3.1.12.1. Ecofisiología del cultivo

La higuera se puede cultivar hasta los 40° de latitud Norte-Sur, aunque hay reportes a 52° N en la antigua Unión Soviética, donde ciertas variedades fueron seleccionadas para estas condiciones. A pesar de lo anterior, esta especie se ha considerado como un cultivo de regiones tropicales, requiriendo temperaturas óptimas entre los 20° y 25° C, durante 4 a 6 meses y baja humedad relativa, aunque puede crecer bien de 26° a 41° C. [17]

Esta planta se adapta bien a diversos tipos de suelo, con excepción de aquellos con elevados niveles de aluminio y arcilla, y con limitación de drenaje, debido a la sensibilidad que manifiesta la planta a los excesos de agua. Suelos con fertilidad elevada favorecen el crecimiento vegetativo excesivo y retrasan de forma considerable la etapa de floración. Aunque el sistema radical puede alcanzar profundidades de 1,5 m, la planta absorbe el 60% del agua de los primeros 60 cm de profundidad.[17]

5.3.1.12.2. Época de siembra

La época de siembra también puede ser de gran influencia en cuanto al rendimiento y la calidad de las semillas de ricino. La temperatura óptima del suelo para una buena germinación se encuentra entre los 18° y 23° C, aunque pueden germinar entre 12° y 18° C, pero se retrasará la germinación en dos o tres semanas. Normalmente, la siembra manual es común para cultivares con semillas de tamaños medio y grande, y también en sistema de cultivos asociados. La siembra mecánica es para semillas pequeñas de cultivares de porte enano (híbridos). [17]

5.3.1.12.3. Preparación del suelo

El proceso de preparación del suelo es la operación agrícola más importante para evitar la erosión; de ella depende directamente:

- a) la mayor o menor degradación que experimentará el suelo
- b) la cantidad de restos de cultivos mantenidos en la superficie
- c) la retención de agua en el suelo durante los periodos de lluvia

La preparación del suelo más recomendable para la higuera es la utilización de un pase de arado convencional, preferentemente de discos. También se recomienda uno o dos pases de rastra, cuando se trata de suelos de textura arenosa o franco-arenosa. [17]



Figura 11 Caballoneo recomendado para la siembra de higuera en lotes con problemas de encharcamiento.

Fuente: Kaushik N.

5.3.1.12.4. Marco de siembra

La densidad de plantas adoptada en un campo de producción de semillas es función del marco de siembra utilizado; se trata del factor que más influye sobre el rendimiento y la calidad de las semillas. Mazzani (1983) considera que los mejores resultados se obtienen utilizando un marco de siembra de 105 x 75 cm, correspondiendo a una densidad de 12.500 plantas-ha-1. Este mismo autor observó que el comportamiento de dos densidades de 10.000 plantas-ha-1 sembradas a 100 x 100 cm y a 200 x 50 cm, resultó en una producción de 31 % en favor del primero marco de siembra. [17]

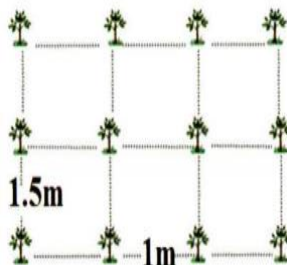


Figura 12 Esquema de siembra con una densidad poblacional de 6.666 plantas/ha.

Fuente: Kaushik N.

5.3.1.12.5. Cosecha

El inicio dependerá de la variedad utilizada, generalmente a los 120 días después de establecida en campo se cosechan las variedades o híbridos precoces, y a los 150 días las variedades más tardías. [2]

5.4. ACEITE DE RICINO

Las hectáreas cultivadas en Colombia son alrededor de 1000, las cuales se encuentran distribuidas principalmente en Antioquia, el Eje cafetero (Dorada, Magdalena medio y Puerto Salgar) y otras en Cundinamarca y Santander. En estos

departamentos están ubicados los centros de estudio y las industrias que están utilizando la higuera como materia prima en sus procesos.

Otra característica importante del aceite de higuera es que es un aceite no comestible, por lo tanto, no compite con la alimentación humana, gran crítica que se ha hecho a otras materias primas como el maíz, caña o soya, que se utilizan como insumos para la producción de biocombustibles. Actualmente en Colombia no se utiliza el aceite de higuera para producir biodiesel y/u otros derivados del aceite.

5.4.1. Composición

El aceite de higuera llamado también aceite de ricino o de castor se extrae de las semillas de la higuera (*Ricinus communis*). Su principal componente es el ácido ricinoleico (ácido cis-12-hidroxi octadeca-9-enoico), el cual se encuentra formando el triglicérido simple denominado triricinoleína, cuya concentración en porcentaje por peso es cercana al 90%. Dada su naturaleza química, el aceite de higuera es un líquido altamente viscoso, miscible en alcohol y ácido acético y de bajo punto de solidificación. [16]

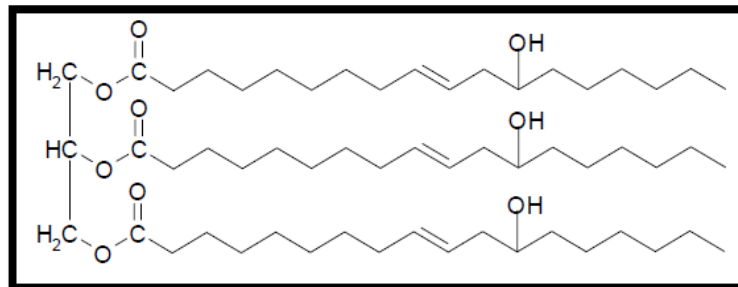


Figura 13 Triglicérido del aceite de ricino
Fuente: Iris Adriana Sánchez Medina

5.4.2. Características fisicoquímicas del aceite de ricino

- **Índice de acidez:** Se define como el número de mg de KOH necesarios para neutralizar los ácidos grasos libres presentes en un gramo (1 g) de grasa o aceite. Ribeiro y Seravalli (2004) revelan que el estado de conservación de un aceite está íntimamente relacionado con la naturaleza y calidad de la materia prima, con la calidad y el grado de pureza del aceite, con el procesamiento y, sobre todo, con las condiciones de almacenamiento y conservación, ya que la descomposición de los triglicéridos se acelera por el calor y la luz, mientras que la rancidez está casi siempre acompañada por la formación de ácidos grasos libres. [15]
- **Índice de yodo:** Está definido como el número de gramos de yodo absorbido por 100 gramos de grasa o aceite; proporciona una medida del grado de insaturación de las grasas extraídas con éter, o incluso mide el grado de

instauración de los ácidos grasos presentes en la grasa. La determinación del índice de yodo en aceites o grasas que contienen enlaces dobles se basa en la absorción del halógeno, según ciertas condiciones, para provocar resultados estequiométricos. [15]

- **Índice de saponificación:** El índice de saponificación se define como el número de mg de hidróxido de potasio (KOH) necesarios para saponificar los ácidos grasos derivados de la hidrólisis de un gramo de muestra; es inversamente proporcional al peso molecular promedio de los triglicéridos en ácidos grasos presentes, y es importante para demostrar la presencia de grasas y aceites de alta proporción de ácidos grasos, de bajo peso molecular, en mezclas con otros aceites y grasas. Cuanto menor sea el peso molecular del ácido graso, mayor es el índice de saponificación; para las grasas vegetales, cuantos más altos son los índices de saponificación, más se prestan para fines alimenticios.[15]
- **Índice de refracción:** La determinación de este índice es útil en el control de los procesos de hidrogenación, no solo para los aceites, sino también para las grasas, cuya temperatura indicada es de 40° C. El índice de refracción de los aceites y grasas es muy utilizado como criterio de calidad e identidad; al referirse a un aceite, esta proporción aumenta con el índice de yodo y se puede utilizar para controlar los procesos de hidrogenación de los aceites insaturados.[15]
- **Gravedad específica:** Es la relación entre la masa de un volumen determinado de una sustancia a una temperatura, t_1 y la masa de un volumen igual de agua a una temperatura de referencia, t_2 o también, la relación entre la densidad de una sustancia a una temperatura t_1 y la densidad del agua a una temperatura t_2 Cuando la temperatura de referencia es 4° C, temperatura a la cual la densidad del agua es la unidad, la gravedad específica y la densidad son numéricamente igual .[15]

Al igual que otros aceites vegetales, el aceite de ricino es un triglicérido de diversos ácidos grasos y alrededor de 10% de glicerina. Los ácidos grasos constan de aproximadamente 80-90% de ácido ricinoleico, 3-6% de ácido linoleico, 2-4% de ácido oleico y 1-5% de ácidos grasos saturados (ácidos esteáricos, palmítico, dihidroxiesteárico y eicosanoico). También contiene ácido linolenico (alrededor del 0.3%). [16]

Tabla 3. Porcentaje de ácidos grasos presentes en el aceite de ricino
Fuente: Elaboración propia

Ácidos grasos	%
Ricinoleico	87
Oleico	7.4
Linoleico	3.1
Palmítico	1
Dihidroxiesteárico	0.6
Esteárico	0.3
Eicosanoico	0.3
Linolénico	0.3

5.4.3. Usos

El aceite extraído de *Ricinus communis* L. (higuerilla) por sus características (lubricante, resistente a altas temperaturas, alta viscosidad y densidad), es uno de los más empleados para la novedosa industria oleo química [18], que permiten su transformación en varios productos derivados del petróleo como el biodiesel.[19]

El aceite se emplea en motores de altas revoluciones, y este mismo aceite refinado se utiliza en la producción de cosméticos y aun en productos medicinales, especialmente para efectos purgativos o para aplicaciones de úlceras o brotes sobre la piel. En la producción industrial, la Higuerilla tiene su utilidad en la elaboración de crayones, empaques, esmaltes, emulsión para pinturas, fertilizantes, espumas, fluido para amortiguadores, fluido hidráulico, fungicidas, germicidas, grasas, hule, insecticidas, lacas, materiales de revestimiento, masilla para vidrios, papel carbón, papel matamoscas, pasta para empaquetaduras, poliéster, pulidores, revestimiento para papel, tintas de impresión y en la fabricación de velas.

5.4.4. Obtención del aceite de ricino

Se obtiene el aceite por uno de los siguientes tres métodos: 1. por expulsión o extracción por prensado; 2. pre-prensado y posterior extracción con solvente, y 3. por expansión-extracción con solventes. El proceso de extracción escogido depende de la cantidad de aceite presente en la semilla, de la cantidad de aceite que puede permanecer en la torta, de cuánta proteína desnaturalizada es permitida en la torta, de los recursos económicos disponibles y de las restricciones impuestas por las leyes ambientales con respecto a la emisión de compuestos orgánicos.[15]

Para que la extracción sea más eficiente se deben tener en cuenta ciertos procedimientos:



*Figura 14 Procedimiento para hacer eficiente la obtención del aceite de ricino
Fuente: Elaboración propia*

5.5. EXTRACCIÓN DE ACEITE DE RICINO

5.5.1. Extracción mecánica

Para la extracción mecánica se debe hacer un calentamiento previo de la semilla, alcanzando una temperatura aproximada de 60°C, este calentamiento tiene como propósito:

- Romper las paredes celulares para que el aceite escape
- Reducir la viscosidad del aceite
- Controlar el contenido de humedad
- Coagular proteínas
- Inactivar enzimas y eliminar microorganismos
- Inhibir a la toxina

Para la extracción mecánica se utiliza una prensa hidráulica tipo expeller. En la siguiente tabla se describen las características de esta herramienta.

Tabla 4. Partes de la prensa
Fuente: Elaboración propia

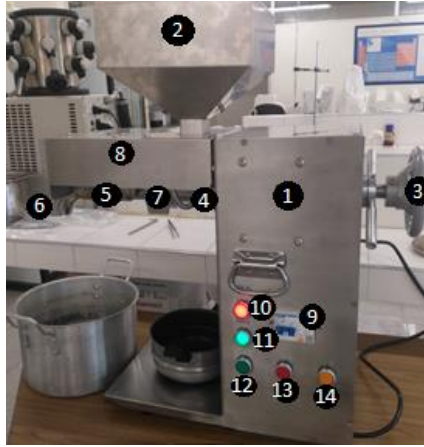


Figura 15 Prensa utilizada en el proceso de extracción – Cinbbya
Fuente: Elaboración propia

1. Maquina principal
2. Embudo
3. Volante de recorte
4. Cámara de calentamiento
5. Calentador
6. Salida del residuo
7. Ranura de guía de aceite
8. Cubierta
9. Interruptor de protección
10. Indicador de encendido
11. Botón de calentamiento
12. Botón para iniciar molienda
13. Botón para pausar molienda
14. Botón para retroceder-limpieza

5.5.2. Extracción química

La extracción de lípidos con solventes químicos ha sido utilizada tradicionalmente para obtener lípidos de fuentes animales y vegetales, para el caso de las micro algas, el solvente es por lo general adicionado a la biomasa seca, aunque en algunos casos es utilizado en biomasa con cierta cantidad de agua, lo que disminuye los costos globales del proceso, pero disminuye también la eficiencia de la extracción. [20]

Una metodología basada en solventes químicos fue propuesta por Folch en 1957, la cual extrae lípidos tanto polares, como no polares, esto se logra debido a la utilización de un solvente apolar, el cual disuelve los lípidos neutros, en combinación con un solvente relativamente polar, el cual disuelve los lípidos polares presentes en la muestra sometida a extracción, estas propiedades de los solventes fueron originalmente aprovechadas para desarrollar un método basado en la mezcla metanol/cloroformo, seguido de una purificación de los extractos con una solución de KCl. [20]

El aceite de ricino posee una composición química peculiar, debido al alto contenido (87-97%) de ácido ricinoleico (ácido cis-12-hidroxi octadeca-9-enoico). La presencia del grupo hidroxilo provee de características únicas tanto al aceite de ricino como a sus derivados: polaridad, alta viscosidad y gravedad específica, además de permitir su completa solubilidad en alcoholes. [20]

5.6. BIORREFINERIA

Actualmente el crecimiento de la demanda mundial de energía, la reducción de las reservas de combustibles fósiles, el aumento de las emisiones de CO₂ y otros gases de efecto invernadero junto al cambio climático, han intensificado las investigaciones y la implementación de proyectos relacionadas con el uso de fuentes de energía renovables en general, y en específico de la biomasa y los biocombustibles. [21]

El uso eficiente y sostenible de la energía de la biomasa para la generación de electricidad, la producción de biocombustibles, productos químicos y alimentos en complejos industriales llamados biorrefinerías, está demostrando ser una estrategia económica y políticamente correcta. La experiencia brasileña con el etanol es la iniciativa más grande y de mayor éxito de la producción y uso de biocombustibles en gran escala y de carácter sostenible.[22]

Brasil y Colombia tienen la oportunidad de convertirse en líderes mundiales en la producción de biocombustibles y electricidad en un mundo que se mueve hacia el futuro de las energías limpias. Sin embargo, los países desarrollados llevan a cabo importantes inversiones en Investigación y Desarrollo (I+D) de nuevos complejos industriales multiproducto-biorrefinerías.[22]

Las biorrefinerías industriales han sido identificadas como la vía más prometedora para la creación de una nueva bioindustria [23]. La Figura 16 muestra el esquema general de una biorrefinería.

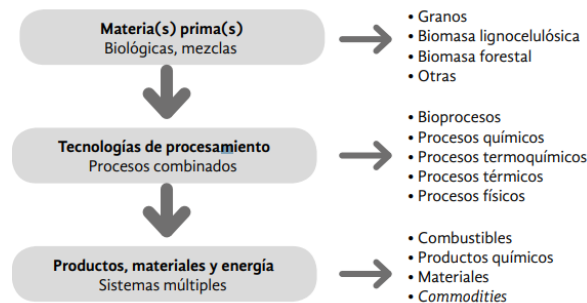


Figura 16 Esquema general de una biorrefinería

Fuente: B. Kamm

Una biorrefinería se puede definir como una instalación industrial que integra tecnologías de conversión de biomasa y procesos para la producción simultánea de combustibles, energía y productos químicos a partir de biomasa.[24]

Entre las potenciales ventajas de la implementación de las biorrefinerías se tiene:

- Eficiencia energética
- Combustibles alternativos

- Reducción de emisiones
- Reducción de costos
- Aumento de la sostenibilidad en el uso de biomasa y residuos

En el sistema de clasificación la diferenciación se ha realizado por cuatro procesos de conversión principales, los cuales incluyen los bioquímicos (fermentación, conversión enzimática), termoquímicos (gasificación, pirólisis), químicos (hidrólisis ácida, síntesis, esterificación), y procesos mecánicos (fraccionamiento, prensado, reducción de tamaños) como los mostrados en la Figura 17. El diseño de una biorrefinería pasa por la selección de una ruta optimizada entre una variedad de materias primas, procesos de conversión y productos.[22]

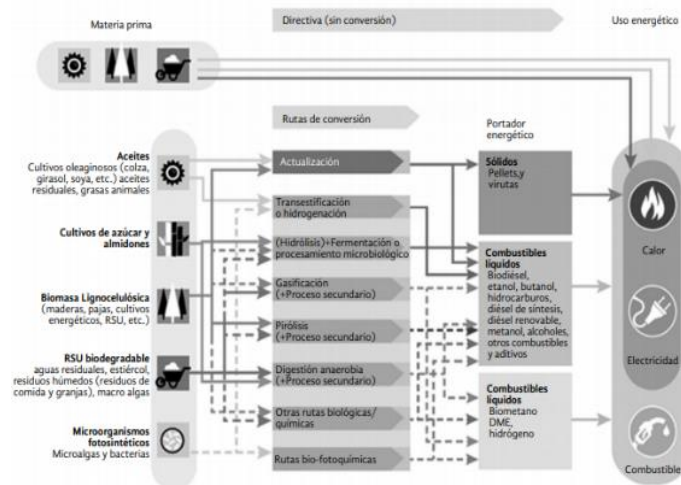


Figura 17 Rutas de conversión de la biomasa en energía y combustibles

Fuente: B. Kamm

5.7. BIODIESEL

5.7.1. Obtención de biodiesel (transesterificación)

5.7.1.1. Definición

La transesterificación o alcoholólisis es el desplazamiento de alcohol a partir de un éster por otro alcohol en un proceso similar a la hidrólisis, excepto que se utiliza alcohol en lugar de agua [25].

El biodiesel puede ser producido por la transesterificación de los aceites con alcoholes de cadena corta, tales como metanol, o por la esterificación de ácidos grasos libres (AGL). La reacción de transesterificación se lleva a cabo en presencia de un catalizador adecuado tal como álcali o ácido y el glicerol es el único subproducto producido. El biodiesel resultante es bastante similar al combustible diesel convencional en sus características principales.[25][26]

Aunque hay muchas maneras y procedimientos para convertir el aceite vegetal en un combustible como el diesel, se encontró que el proceso de transesterificación es el proceso de modificación del aceite más viable. Actualmente la forma más común de producir biodiesel es transesterificar los triacilgliceroles de los aceites vegetales o animales, con un alcohol en presencia de un catalizador alcalino o ácido [27].

En general hay dos métodos de transesterificación. Un método simple que usa un catalizador y el otro que es sin un catalizador.[28]

5.7.1.2. Tipos de catálisis

Existen diferentes procesos de transesterificación que se pueden aplicar para sintetizar biodiesel:

- Transesterificación catalizada por base [17]
- Transesterificación catalizada por ácido [17]
- Transesterificación catalizada por enzimas [17]
- Transesterificación supercrítica con alcohol [17]

5.7.1.3. Variables que afectan la reacción de Transesterificación

Las variables más importantes que afectan el rendimiento del éster de metilo durante la reacción de transesterificación son:

- Presencia de ácidos grasos libres y la humedad
- Relación molar de alcohol/aceite y tipo de alcohol
- El catalizador y concentración
- Temperatura y tiempo de reacción
- Intensidad de mezcla
- Pureza de los reactivos [27][28][29]

5.7.1.3.1. Efecto de los ácidos grasos libres y la humedad

Los ácidos grasos libres (AGL) y el contenido de humedad son parámetros clave para la determinación de la viabilidad del proceso de transesterificación de aceite vegetal. En la transesterificación, los AGL y el agua siempre producen efectos negativos, ya que la presencia de AGL y agua son las causas de formación de jabón, consumen el catalizador y reducen la efectividad del mismo, dificultad en la separación de glicerol y la prevención de la purificación del biodiesel crudo, todo lo que resulta en una conversión baja. [29] [30].

La presencia de agua tiene un mayor efecto negativo en la transesterificación que la de los AGL porque cuando el agua está presente, especialmente a temperaturas elevadas, se pueden hidrolizar los triglicéridos a diglicéridos y formar un AGL. Sin embargo, la presencia de agua a temperaturas medias conduce a la formación excesiva de jabón. Cuando un catalizador alcalino tal como el hidróxido de sodio o

potasio está presente, el AGL va a reaccionar para formar un producto saponificado. [29] [30].

5.7.1.3.2. Efecto de la relación molar y el tipo de alcohol

Una de las variables más importantes que afectan el rendimiento del éster es la relación molar de alcohol a triglicérido. La relación estequiométrica para la transesterificación requiere tres moles de alcohol y un mol de triglicérido para producir tres moles de ésteres de ácidos grasos de alquilo y una mol de glicerol. Sin embargo, la transesterificación es una reacción de equilibrio en la que se requiere un gran exceso de alcohol para conducir la reacción hacia la derecha. Para la máxima conversión del éster, se requiere una relación de 6:1. Sin embargo, la alta relación molar de alcohol a aceite vegetal interfiere con la separación de la glicerina porque hay un aumento de la solubilidad. [25].

Cuando la glicerina permanece en solución, ayuda a conducir el equilibrio hacia la izquierda, bajando el rendimiento de los ésteres. La formación catalizada por una base de etilésteres es difícil en comparación con la formación de ésteres de metilo. El metanol y el etanol no son miscibles con los triglicéridos a temperatura ambiente, y las mezclas de reacción son usualmente agitadas mecánicamente para mejorar la transferencia de masa. [25].

5.7.1.3.3. Efecto del tipo de catalizador y la concentración

Los catalizadores utilizados para la transesterificación de triglicéridos se clasifican como ácidos, alcalinos, catalizadores enzimáticos o heterogéneos, entre los cuales los catalizadores alcalinos como el hidróxido de sodio, el metóxido de sodio, el hidróxido de potasio, el metóxido de potasio son los más eficaces. Si el aceite tiene un alto contenido de ácidos grasos libres y agua, la transesterificación catalizada por ácido es la adecuada. Los ácidos pueden ser ácido sulfúrico, ácido fosfórico, ácido clorhídrico o ácido sulfónico. [25]. Se ha encontrado que una concentración en el rango de 0.5-1.0% (p/p) se obtienen rendimientos del 94-99% en la conversión de aceites vegetales y un aumento en la concentración del catalizador no afecta la conversión, pero añade costos extra porque el catalizador necesita ser eliminado de la mezcla de reacción después de que se complete la reacción [28].

5.7.1.3.4. Efecto de la temperatura y el tiempo de reacción

La literatura ha revelado que la velocidad de reacción está fuertemente influenciada por la temperatura de reacción. Sin embargo, la reacción se lleva a cabo cerca del punto de ebullición del metanol (60-70 °C) a presión atmosférica durante un tiempo dado. Tales condiciones suaves de reacción requieren la eliminación de los ácidos grasos libres del aceite mediante refinado o pretratamiento. El pretratamiento no es necesario si la reacción se lleva a cabo bajo alta presión (9000 kPa) y a alta temperatura (240 °C), donde la esterificación y transesterificación simultáneas

tendrán lugar con un rendimiento máximo en un rango de temperaturas desde 60°C hasta 80 °C en una relación molar de 6:1 [28].

5.7.1.3.5. Intensidad de mezclado

Se ha observado que durante la reacción de transesterificación, los reactivos inicialmente forman un sistema líquido de dos fases. Se ha encontrado que el efecto de la mezcla juega un papel significativo en la lenta velocidad de reacción. Como la separación de las fases cesa, la mezcla se vuelve insignificante. El efecto del mezclado en la cinética del proceso de transesterificación constituye la base para el aumento de la escala y el diseño del proceso [28].

5.7.1.3.6. Pureza de los reactivos

Las impurezas en el aceite afectan considerablemente el nivel de conversión. Se ha reportado que se ha obtenido aproximadamente el 65-84% de conversión en ésteres utilizando aceites vegetales crudos en comparación con el 94-97% de rendimiento con aceites refinados bajo las mismas condiciones de reacción. Se ha encontrado que los ácidos grasos libres interfieren con el catalizador. Este problema puede ser resuelto si la reacción se lleva a cabo bajo condiciones de alta temperatura y presión [28].

5.7.2. Biodiesel de Higuierilla

El aceite de ricino posee una composición química peculiar, debido al alto contenido del 87- 97% de ácido ricinoleico (ácido cis-12-hidroxi octadeca-9-enoico). La presencia del grupo hidroxilo provee de características únicas tanto al aceite como a sus derivados tales como : polaridad, alta viscosidad y gravedad específica, además de permitir su completa solubilidad en alcoholes [20].

Las propiedades particulares del biodiesel elaborado a partir de la higuierilla están muy ligadas a su naturaleza química. Tal biocombustible posee un alto contenido de metilésteres del ácido ricinoleico, el cual es de carácter insaturado (presenta un enlace doble en su estructura). Adicionalmente el ácido ricinoleico, a diferencia de los otros ácidos carboxílicos comúnmente presentes en los aceites vegetales, posee un grupo hidroxilo en su estructura que le confiere su alta viscosidad [1].

5.7.3. Normativa para Biodiesel

Tabla 5. Comparación de las normativas del biodiesel
Fuente: Fedepalma

PROPIEDADES	UNIDAD	ASTM 6751 ESTADOS UNIDOS	EN 14214 COMUNIDAD EUROPEA	NTC 5444 COLOMBIA	CARACTERÍSTICAS DEL BIODIESEL DE PALMA	CARACTERÍSTICAS DEL BIODIESEL DE HIGUERILLA (COLOMBIA)
Densidad (15°C)	g/ml		0.860-0.90	0.860-0.90	0.875	N.R
Viscosidad a 40°C	mm ² /s	1.9-6	3.5-5	1.9-6	4.49	N.R
Punto de chispa	°C	min.130	min. 120	min. 120	159	N.R
Punto de fluidez	°C	Reportar	Depende de Región	Reportar	12	N.R
Estabilidad a la oxidación	Horas	min. 3	min. 6	min. 6	26	N.R
Estabilidad térmica	%Reflect	N.R	N.R.	min. 70	99	N.R
Índice de yodo	g yodo/100 g	N.R	max. 120	max. 120	58	N.R
Corrosión lámina de Cu	N/A	1	1	1	1a	N.R
Número ácido	mg KOH/g	0.8 max.	0.5 max.	max. 0.5	<0.1	N.R
Contenido de agua	mg/Kg	500 max.	500 max.	500 max.	380	N.R
Contenido de fósforo	mg/Kg	max. 10	max. 10	max. 10	1.26	N.R
Contenido de metanol o etanol	%masa	0.2	0.2		<0.2	N.R
Contenido de glicerina libre	%masa	0.02/0.24	0.02/0.25	0.02/0.25	<0.02/<0.25	N.R
Contenido de éster	%masa	96.5	96.5	96.5	98.50%	N.R
Contenido de Na + K	mg/Kg	max. 5	max. 5	max. 5	4.25	N.R

Contenido de Ca+ Mg	mg/Kg	max. 5	max. 5	max. 5	1.89	N.R
---------------------	-------	--------	--------	--------	------	-----

5.7.4. Producción mundial de biodiesel

El mercado de biocombustibles hoy en día es aún muy reducido dentro de la matriz energética global, representando el 1.7 % del consumo mundial, pudiendo incrementarse hasta alcanzar 20 puntos porcentuales en el 2020.

Al ser un mercado en pleno proceso de conformación y dada la vertiginosidad de su crecimiento se puede augurar un crecimiento exponencial, como producto no solo de aquellas demandas auto-impuestas por los Estados en sus marcos normativos, sino también, por la necesidad de alimentar de energías verdes a distintos mercados internacionales [31].

El principal productor de biodiesel en el mundo es Alemania con más del 50% de la producción. Esto se debe principalmente a que Alemania junto a Francia fueron los primeros países que ingresaron en su legislación el uso de biodiesel como combustible para disminuir la dependencia del petróleo y el impacto sobre el ambiente. En Suramérica el más importante productor es Brasil con 70 millones de litros en el año 2005. Colombia aún no aparece reportada en las estadísticas mundiales, debido quizás a que el uso de biodiesel como oxigenante del diésel sólo empezó a regir a partir del 1 de enero de 2008 [31].

Se prevé que la producción mundial de biodiesel llegará a 40.5 Mml para 2026, lo que equivale a un aumento de 12% con respecto al nivel de 2016 (Figura 18). Más que las fuerzas del mercado, la política seguirá influyendo en los patrones de producción. Se estima que la Unión Europea permanezca como el productor más importante de biodiesel, por un gran margen. La producción llegará a 13 Mml para 2026, por debajo de los 13.3 Mml de 2016 y los 14.3 Mml de 2020, cuando se supone que se cumplirá el objetivo de la RED. Lo anterior se relaciona con las menores perspectivas de uso de diésel. [32]

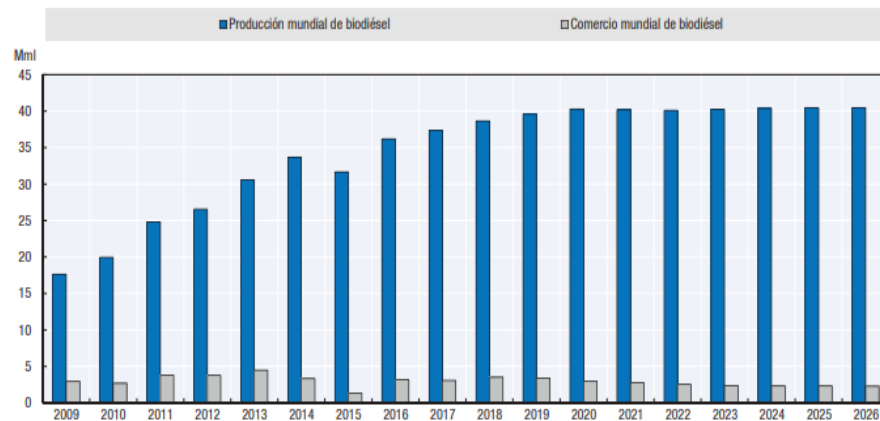


Figura 18 Desarrollo del mercado mundial de biodiesel
 Fuente: OCDE/FAO (2017), “OCDE-FAO Perspectivas Agrícolas”, Estadísticas de la OCDE sobre agricultura (base de datos), <http://dx.doi.org/10.1787/agr-data-en> [32]

5.7.4.1. Biodiesel en Colombia

Los estudios para la producción de biodiesel en Colombia han permitido que la legislación del país se interese por proyectos que promuevan la conservación del medio ambiente. Es por esto que la ley 939 de 2004 estimula la producción y comercialización de biocombustibles de origen vegetal o animal para uso en motores diésel. En Colombia la gasolina y el diésel son combustibles que representan casi un 80% del total de los combustibles derivados del petróleo que se consumen anualmente en el país.[33]

El biodiesel es una propuesta que ha ganado aceptación dentro del consumo total debido a varios factores:

- Disminución del consumo de diésel derivado del petróleo y el contrabando de combustibles.
- El desmonte gradual de subsidios al precio de la gasolina que se extenderá hasta junio del 2010, de esa manera el precio del biocombustible será más competitivo en relación al precio real del Diésel
- La capacidad de producción de las refinerías colombianas es limitada y se ve obligada a importar combustible diésel para atender la demanda importando actualmente entre 4.000 y 8.000 de barriles diarios de diésel (Contraloría General de la República, Sector Minas y energía, 2005).
- Los incentivos económicos para la producción de Biodiesel: Exención del IVA y de la Sobretasa Global al biocombustible destinado para mezcla con combustibles fósiles (Ley 939 de 2004) y el incentivo de exención de impuesto de renta por cultivos de tardío rendimiento. [33]

5.7.4.1.1. Oferta del biodiesel en Colombia

La producción industrial de biodiesel se inició hace menos de una década, optándose por la utilización del aceite de palma como materia prima, dados los desarrollos alcanzados en ese sector. A diferencia del etanol, las características finales del biodiesel dependen de la materia prima utilizada para su procesamiento.

Hoy la capacidad de producción de biodiesel de palma en el país es de 14,000 barriles por día, distribuida en 12 plantas ubicadas en la Costa Atlántica y centro del país, tal como se presenta en la Tabla 2-4. La producción total de biodiesel ha permitido suministrar una mezcla (90-10) en casi todo el territorio nacional y de acuerdo con la información de SICOM el consumo durante 2017 fue de 10,334 barriles día, un incremento importante con respecto a 2016. Es de anotar que el ACPM importado para el sector industrial (minería) no se mezcla con biodiesel.[34]

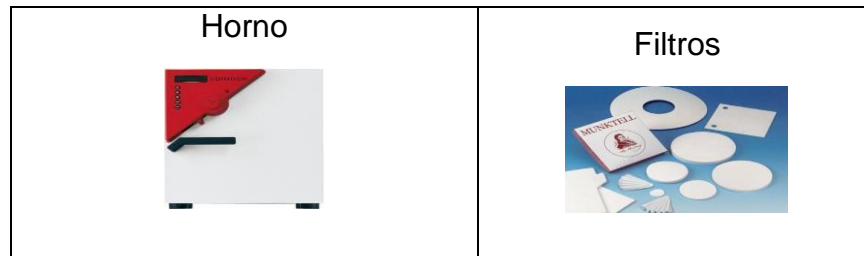
Para poder realizar este proyecto fue necesario tener en cuenta toda la información mostrada en este capítulo, debido a que cada uno de los temas tratados fueron necesarios para poder tener previos conocimientos de lo que se haría.

6. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

6.1. MATERIALES DE LABORATORIO

Tabla 6 . Materiales de laboratorio utilizados
Fuente: Elaboración propia

Nombre de Equipo	
<p>Prensa de aceite</p> 	<p>Probetas</p> 
<p>Estufa eléctrica</p> 	<p>Balanza Digital</p> 



6.2. ESPECIFICACIONES DE LOS MATERIALES UTILIZADOS

- **Prensa de Aceite:** Para la extracción del aceite de higuera, se utilizó una prensa en frío con las siguientes especificaciones.

Referencia: DL-ZYJ10

Potencia: 2 kW

*Capacidad :*20 kg/h

Dimensiones: 72 * 41 * 70 cm

*Peso :*74 kg

- **Estufa eléctrica:**

*Referencia :*2P HACEB

Voltaje: 120 V

*Potencia :*1100 W

Resistencia: Eléctrica Tubular

- **Horno:** Para la realización del secado de las semillas, a diferentes temperaturas se utilizó el siguiente horno

Referencia: Binder Serie FD 23

*Dimensiones :*43.5 x 49.5 x 52 cm

Volumen Interior: 20 Litros

Peso Neto: 27 kg

Rango de Temperatura: 5 °C por encima del ambiente hasta 300°C

Potencia: 0,8 kW

Tipo de convección: Forzada

- **Probetas:**

Volumen: 250 mL – 100 mL

- **Balanza Digital:**

Referencia: PA214 OHAUS

Dimensiones: 19.6 x 28.7 x 32 cm

Potencia: 4 W

*Peso :*4.5 kg

*Capacidad :*210 g

*Repetibilidad :*0,1 mg

Tamaño de plataforma: 9 cm de diámetro

- **Filtros:**

Diámetro: 150mm

Gramaje: 65 g/m²



6.3. CARACTERIZACIÓN DE SEMILLA DE HIGUERILLA

6.3.1. Descripción de semilla

Se trabajó con dos tipos de semilla diferente, para comparar sus características, y saber si esto cambiaría las propiedades del biodiesel.

Tabla 7. Descripción de las semillas trabajadas

Fuente: Elaboración propia

Semilla Tipo 1	
Imagen	
Origen	Barichara, Santander
Color	Cáscara manchada
Tamaño	Mediano
Semilla Tipo 2	
Imagen	
Origen	Rio Negro, Santander
Color	Color oscuro

Tamaño	Mediano
---------------	----------------

6.3.2. Proceso de caracterización de la semilla

Se tomaron 500 gramos de semilla, para contar cuántas semillas hay aproximadamente en este peso, con ayuda de un calibrador se tomaron las medidas de algunas semillas. Los datos obtenidos se muestran en la siguiente tabla.

*Tabla 8 . Proceso de caracterización de la semilla
Fuente: Elaboración propia*

Característica	Valor	Unidad
Ancho	0,99	cm
Alto	1,45	cm
Cantidad	681	semillas

El calibrador utilizado para obtener estas medidas es el mostrado en la figura.



*Figura 19 Calibrador o pie de rey
Fuente: Elaboración propia*

6.4. EXTRACCIÓN DEL ACEITE

6.4.1. Descripción del proceso

Teniendo en cuenta que esta semilla es tóxica, primero hay que realizarle un proceso de inactivación de la toxina o comúnmente llamado desintoxicación. Para este proceso, se debe poner una olla con agua y las semillas, se pone a calentar y en el momento en que hierve el agua se contabiliza media hora, pasado el tiempo la semilla se apartan colocándolas a secar a temperatura ambiente aproximadamente por 24 horas, el agua se deja como residuo.

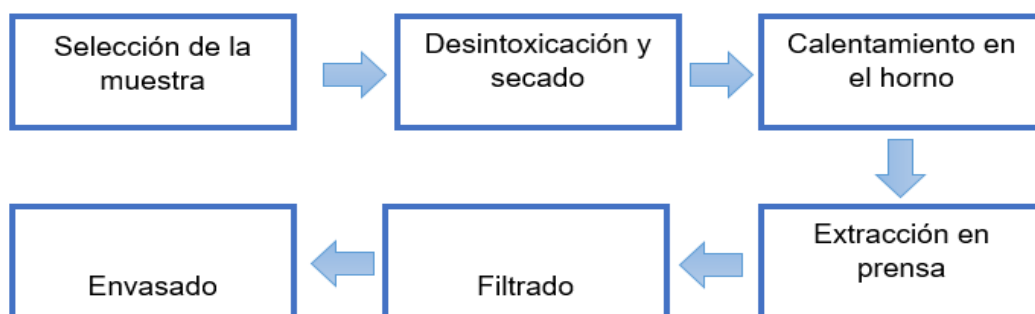
Antes de extraer aceite, se debe calentar por una hora la semilla a una temperatura opcional en el horno, teniendo en cuenta por literatura un rango de 70-120 °C, si se supera este rango de temperatura, se corre el riesgo de que las propiedades del aceite extraído cambien. La prensa se debe calentar diez minutos antes de insertar

la semilla para facilitar la molienda, pasado el tiempo esta se introduce a la prensa para empezar el proceso de extracción del aceite.

El tiempo de extracción de aceite para 500 gramos de semilla es de aproximadamente diez minutos. La prensa cuenta con dos partes importantes: la primera en la parte frontal, donde se obtiene el residuo, en nuestro caso la cáscara de la semilla, conocida como “torta”. La segunda se ubica en la parte media del equipo, es allí donde se hace la recolección del aceite, este aceite tiene una temperatura entre 60-110°C (por lo general 10°C menos a la temperatura que se calentó anteriormente).

El aceite obtenido en la extracción sale con impurezas y se hace necesario dejar filtrando por gravedad durante 24 o 36 horas. Este paso se hace con probetas y filtros de papel, cambiando los últimos cada 24 horas para facilitar la caída del aceite.

Posterior al tiempo de filtrado se mide el volumen de aceite obtenido, se envasa en frascos de vidrio totalmente tapados, y se almacena en un lugar fresco.



*Figura 20 Proceso de extracción del aceite
Fuente: Elaboración propia*

A continuación, se muestran los rendimientos de extracción de los dos tipos de semilla:

*Tabla 9 . Rendimiento de semilla 1
Fuente: Elaboración propia*

Rendimiento – Semilla 1					
Número de muestra	T calentamiento [°C]	T extracción [°C]	Volumen aceite [ml]	Peso de muestra [g]	Rendimiento de extracción
1	80	70	490	1560	30,4%

2	90	65	110	500	20,9%
3	100	90	190	500	36,5%

*Tabla 10 . Rendimiento de semilla 2
Fuente: Elaboración propia*

Rendimiento - Semilla 2					
Número de muestra	T calentamiento [°C]	T extracción [°C]	Volumen aceite [ml]	Peso de muestra [g]	Rendimiento de extracción
1	80	75	305	500	57,3%
2	90	80	195	500	35,1%
3	100	94	556	1700	31,4%

6.4.2. Caracterización del aceite

La norma NTC o Norma Técnica Colombiana 947 y ASTM American Society for Testing and Materials, son el resultado del consenso de productores, usuarios y consumidores de todo el mundo, que se reúnen para crear las normas.

Siguiendo estas normas se hizo la caracterización físico-química del aceite extraído, para poder determinar la calidad del aceite obtenido. Se realizan pruebas de índice de acidez, densidad y viscosidad.

*Tabla 11 . Normativa para la caracterización del aceite
Fuente: Elaboración propia*

Parámetro	Método de Ensayo
Densidad	NTC 336
Viscosidad cinemática	ASTM D445
Índice de acidez	NTC 218

6.4.2.1. Densidad

Según la norma NTC 336 la densidad es la medida de la masa, a una temperatura específica, de un volumen de grasa líquida en un picnómetro calibrado.

Para esta prueba se hace uso de: un picnómetro Jaulmes, báscula y el aceite al cual se le hallará la densidad.

Primero se pesa el picnómetro vacío con el termómetro y el tapón esmerilado para conocer su masa, posterior a esto se agrega el aceite hasta que por el tapón esmerilado se obtenga una gota del aceite, seguido, se inserta el termómetro y nuevamente se pesa para determinar la masa del picnómetro con el aceite. Esto es necesario para poder hacer uso de la siguiente ecuación:

$$\rho = \frac{m}{v} = \frac{m_T - m_P}{v}$$

m_T = Masa del picnómetro con el aceite

m_P = Masa del picnómetro

v = Volumen del picnómetro

Los resultados obtenidos para los dos tipos de semilla fueron:

Tabla 12. Resultados densidades semilla 1
Fuente: Elaboración propia

SEMILLA 1								
T [°C]	Mpicnometro [gr]	Mtotal [gr]	Maceite [gr]	Volumen [mL]	Densidad [Kg/m ³]	T [°C]	Fcorreccion	Densidad corregida
80 °C	32,15	56,14	23,1	24,82	0,97	20,8	0,001	0,97
90 °C	32,48	56,1	23,6	24,9	0,95	19,6	0,001	0,95
100 °C	31,36	55,17	23,8	24,82	0,96	23,4	0,001	0,96

Tabla 13. Resultados densidades semilla 2
Fuente: Elaboración propia

SEMILLA 2								
T [°C]	Mpicnometro [gr]	Mtotal [gr]	Maceite [gr]	Volumen [mL]	Densidad [Kg/m ³]	T [°C]	F corrección	Densidad corregida
80 °C	31,62	55,02	23,41	24,9	0,94	20,8	0,001	0,94
90 °C	31,95	54,31	22,36	24,82	0,9	19,6	0,001	0,90
100 °C	33,1	56,87	23,8	24,82	0,96	24,8	0,001	0,96



*Figura 21 Pícnómetro
Fuente: Elaboración propia*

6.4.2.2. Viscosidad

Según la norma ASTM D 445-06 la viscosidad cinemática es la resistencia al flujo de un fluido bajo gravedad.

Para esta prueba se utiliza el equipo BROOKFIELD VISCOSIMETER VD2T que se encuentra en planta piloto de la universidad. Se hace necesario obtener como mínimo una cantidad de 500 ml de aceite y buscar la aguja que se adapte a nuestro aceite. En este caso la aguja fue la número 63.



(A)



(B)

*Figura 22 A-Viscosímetro BROOKFIELD VISCOSIMETER VD2T B- Prueba de viscosidad
Fuente: Elaboración propia*

Al empezar a medir la viscosidad, se inserta en el instrumento la densidad anteriormente calculada y se empieza a variar la velocidad del equipo para hallar el torque más óptimo empezando con 170 RPM hasta 200 RPM obteniendo así torques en porcentajes cercanos al 100%.

Las medidas obtenidas de viscosidad variaron debido a las diferentes densidades que se obtuvieron producto de las tres temperaturas que se trabajaron inicialmente.

Los resultados obtenidos de la viscosidad son los siguientes:

*Tabla 14. Resultados de las viscosidades
Fuente: Elaboración propia*

Temperatura [°C]	m [g]	v [mL]	ρ [g/ml]	μ [cP]			v [l]			RPM			Torque		
				prueba 1	prueba 2	prueba 3	prueba 1	prueba 2	prueba 3	prueba 1	prueba 2	prueba 3	prueba 1	prueba 2	prueba 3
80	371,81	400	0,93	653,3	658	661,3	702,83	707,88	711,43	180	180	180	98	98,7	99,2
90	96,16	100	0,96	631,9	631,3	638,3	657,15	656,53	663,81	188	188	188	99	98,9	100
100	86,24	100	0,86	657,3	658	656,7	762,18	762,99	761,48	180	180	180	98,6	98,7	98,5

6.4.2.3. Índice de acidez

Según la norma NTC 218 el índice de acidez es el número de miligramos de hidróxido de potasio o de sodio para neutralizar los ácidos grasos libres presentes en 1 gramos de grasa.

Los materiales necesarios para esta prueba son:

- Éter etílico (etanol + éter de petróleo) 200 ml
- Agua destilada 1 litro
- Hidróxido de sodio 0,1 normal (5,6 gramos)
- Aceite 5 gramos
- Matraz de Erlenmeyer 200 ml
- Bureta 50 ml
- Fenolftaleína 30 gotas

Para cada una de las muestras se realiza el mismo procedimiento, hasta ser neutralizada.

En un vaso precipitado se preparó: 25 ml de la mezcla de éter etílico con 20 gotas de fenolftaleína, luego la muestra anterior se mezcla con 5 gramos del aceite, a esta nueva composición se le agregaron 10 gotas de fenolftaleína.

Para poder conocer el índice de acidez, al procedimiento descrito anteriormente se deja caer por gravedad la mezcla localizada en la bureta (agua destilada con hidróxido de sodio) hasta que la mezcla que se encuentra en el vaso precipitado empiece a cambiar de color a un tono rosáceo (neutralice). Para tomar la medida se tuvo en cuenta el volumen inicial y final de la mezcla contenida en la bureta.

Los resultados obtenidos de las pruebas, fueron:

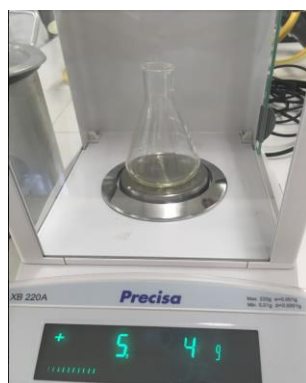
Tabla 15 . A- Resultados de la acidez semilla 1 B- Resultados de la acidez semilla 2
Fuente: Elaboración propia

(A)

Propiedad	ACIDEZ CON NaOH Semilla 1			
	Aceite a 80°C	Aceite a 85°	Aceite a 90°	Aceite a 100°
Volumen [mL]	1,8	3,4	2,3	1,1
Normalidad	0,1			
Peso [g]	5			
Porcentaje de Acidez	10,15	19,18	12,97	6,20
Indice de Acidez	20,20	38,16	25,81	12,35

(B)

Propiedad	ACIDEZ CON NaOH Semilla 2		
	Aceite a 80°C	Aceite a 90°	Aceite a 100°
Volumen [mL]	1,5	2	0,8
Normalidad	0,1		
Peso [g]	5		
Porcentaje de Acidez	8,46	11,28	4,51
Indice de Acidez	16,84	22,45	8,98



(A)



(B)

Figura 23 A- Balanza con los 5 gramos de la prueba de acidez B- Muestras de pruebas de acidez

Fuente: Elaboración propia

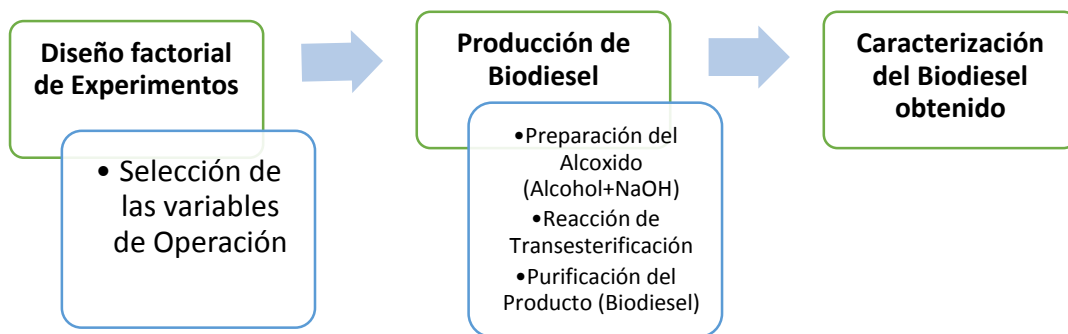
6.5. DISEÑO EXPERIMENTAL

Un experimento diseñado es una prueba o serie de pruebas en las cuales se inducen cambios deliberados en las variables de entrada de un proceso o sistema, de manera que sea posible observar e identificar las causas de los cambios en la respuesta de salida. [32]

El diseño experimental puede ser considerado como parte del proceso científico y una de las formas en que se aprende acerca de la forma en que funcionan los sistemas o procesos. [32]

Para el análisis de este diseño se utilizó el programa STATGRAPHICS CENTURION XVI. Los resultados obtenidos se muestran en la sección de resultados y en anexos.

En el siguiente diagrama de bloques se identifica la metodología implementada durante el desarrollo del proyecto.



*Figura 24 Proceso del diseño experimental
Fuente: Elaboración propia*

6.6. PRODUCCIÓN DE BIODIESEL

6.6.1. Condiciones de reacción

- Temperatura de 60 °C
- Agitación de 350 rpm
- 0.52% en peso de catalizador (NaOH⁻)
- Relación molar 12:1 alcohol/aceite
- Aceite de higuera: 573.96 gr
- Catalizador: 3 gr
- Alcohol (Etanol) :199.62 gr

6.6.2. Elementos utilizados

La tabla 16 muestra los elementos de laboratorio utilizados para la producción de biodiesel.

6.6.3. Especificaciones de equipos

- **Agitadora de platos calientes:**

Referencia: SP131010-33

Potencia: 440 W

Máxima Temperatura: 540 °C

Dimensiones: 4x4

Voltaje: 220 – 240 V

- **Embudo decantación:**

Volumen: 500 mL

*Tabla 16. . Elementos de laboratorio utilizados para la producción de Biodiesel
Fuente: Elaboración propia*



6.6.4. Proceso de producción

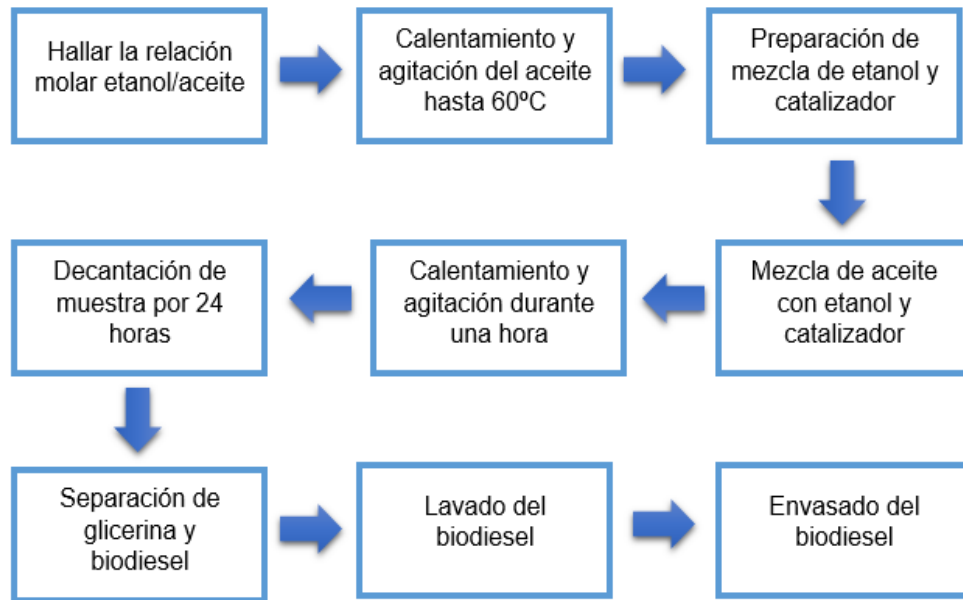


Figura 25 Diagrama de proceso de producción del Biodiesel
Fuente: Elaboración propia

- **Conocer la relación molar etanol/aceite:** Para calcular la relación molar, es necesario saber la masa molecular y la densidad de la sustancia, conociendo estos valores se calcula el volumen y se pueden empezar aplicar las diferentes relaciones alcohol-aceite.

Tabla 17. Datos para hallar la relación aceite/etanol
Fuente: Elaboración propia

	Etanol	Aceite
Masa [g/mol]	46,07	282
Densidad [g/ml]	0,79	0,96
Volumen [ml]	58,4	294,8

Tabla 18. Relaciones obtenidas
Fuente: Elaboración propia

Muestra 1	Relación	2	1	
	Volumen	116,8	294,8	39,6
Muestra 2	Relación	6	1	
	Volumen	350,34	294,79	118,84

Muestra 3	Relación	8	1
	Volumen	467,12 158,46	294,79 100
Muestra 4	Relación	10	1
	Volumen	583,90 198,07	294,79 100,00
Muestra 5	Relación	12	1
	Volumen	700,68 237,69	294,79 100

- **Calentamiento y agitación del aceite a 60°C:** El volumen de aceite seleccionado se calienta y se agita aproximadamente por 20 minutos, mientras este alcanza una temperatura de 60°C reportado en la literatura, temperatura a la cual se le extrae humedad al aceite.



Figura 26 Calentamiento y agitación del aceite

Fuente: Elaboración propia

- **Preparación de mezcla de etanol y catalizador:** Para esta mezcla se usa el volumen hallado en el primer paso del alcohol, y se agrega un porcentaje de catalizador, este valor puede variar entre un 5-10% teniendo en cuenta si hay saponificación en la mezcla, en este caso se utilizó el NaOH como catalizador.
- **Mezcla de aceite con etanol y catalizador:** En el momento que el aceite alcanza los 60°C, se adiciona la mezcla del etanol con el catalizador, este proceso se va haciendo de manera lenta. Mientras eso ocurre se puede observar como el aceite va cambiando de color, pasando de un tono amarillo a uno naranja.



Figura 27 Mezcla de aceite con etanol y catalizador
Fuente: Elaboración propia

- **Calentamiento y agitación durante una hora:** Esta nueva mezcla (etanol, catalizador y aceite) se deja en agitación y calentamiento durante una hora. La temperatura se trata de mantener constante en un rango de 70-90°C.
- **Decantación de muestra por 24 horas:** Al terminar la hora de agitación y calentamiento de la mezcla, se agrega en un embudo de filtración, en el cual se deja reposar las 24 horas. Se debe dejar en un lugar fresco a temperatura ambiente, y con tapa. Todo lo anterior con el fin de lograr la separación de fases.

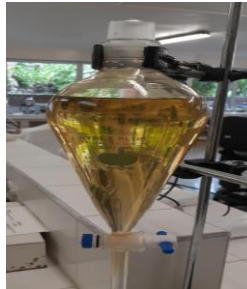


Figura 28 Decantación de muestra por 24 horas
Fuente: Elaboración propia

- **Separación de glicerina y biodiesel:** Al cumplir las 24 horas decantando, se obtiene la glicerina en la parte inferior del embudo, la cual se extrae por gravedad, retirando la tapa del embudo y abriendo la válvula de este mismo, se deja salir la fase donde está la glicerina, luego se cierra la válvula y se tapa. Figura 29A
- **Lavado del biodiesel:** Después de retirar la glicerina, se realiza un lavado al biodiesel, esto permite eliminar impurezas de catalizador, etanol y glicerina, también permite neutralizar el biodiesel. El lavado se realiza con agua destilada, la cantidad de agua destilada es la tercera parte del aceite utilizado.

Se realizan lavados hasta que ya no se produzcan más separación de fases. Cuando la mezcla se visualiza turbulenta al momento de adicionar el agua destilada, es mejor dejar reposar la mezcla varias horas, entre 2 a 5 horas. Figura 29B



(A)



(B)

Figura 29 (A) Separación Glicerina y Biodiesel (B) Lavado del biodiesel
Fuente: Elaboración propia

- **Envasado del biodiesel:** Al finalizar los lavados, se obtiene finalmente el biodiesel sin impurezas. Para evitar que este se mezcle nuevamente con las impurezas que pueden estar presentes en la válvula, se retira el biodiesel por la parte superior del embudo.

6.7. CARACTERIZACIÓN DEL BODIESEL

6.7.1. Densidad

Este parámetro se puede determinar mediante el método ASTM D 1298 standard test method for density, relative density (specific gravity), or API gravity of crude petroleum and liquid petroleum products by hydrometer method. Este método contempla la determinación de la gravedad API (G API) La gravedad específica o densidad relativa (G). [6]

Para determinar la densidad se usó un picnómetro y una balanza, y se utilizó la ecuación de la densidad.

$$\rho = \frac{m}{v} [\text{gr/ml}]$$

Posteriormente, se determinó la densidad relativa.

$$G = \frac{\rho_{\text{sustancia}}}{\rho_{\text{H}_2\text{O}}}$$

Los resultados se muestran en la tabla 25 en los resultados.

6.7.2. Índice de acidez

El índice de acidez se refiere a la cantidad de base expresada en miligramos de hidróxido de potasio por gramo de muestra, requerida para neutralizar la muestra. Es decir, es una medida de cantidad de ácidos grasos libres en el biodiesel. La presencia de ácidos grasos en el biocombustible puede causar corrosión e incrementa la probabilidad de presencia de agua. Esta determinación se puede realizar mediante el método descrito en la norma ASTM D 664.[6]

Los materiales necesarios para esta prueba son:

- Éter etílico (etanol + éter de petróleo) 200 ml
- Agua destilada 1 litro
- Hidróxido de sodio 0,1 normal (5,6 gramos)
- Biodiesel 5 gramos
- Matraz de Erlenmeyer 200 ml
- Bureta 50 ml
- Fenolftaleína 30 gotas



*Figura 30 Muestras de prueba de índice de acidez del biodiesel
Fuente: Elaboración propia*

Los resultados se muestran en la tabla 27 D, en los resultados.

6.7.3. Viscosidad

La viscosidad cinemática se puede determinar con un viscosímetro Ostwald con base en la norma ASTM D 445 Stand test method for kinematic viscosity of transparent and opaque liquids (and de calculation of dynamics viscosity).[6]

Para realizar esta prueba se utilizó el equipo BROOKFIELD VISCOMETER VD2T y la aguja fue la numero 61, ya con ese dato pudimos detectar que el biodiesel es menos viscoso que el aceite, debido a que para la viscosidad del aceite se usó la aguja número 63.

Los resultados se muestran en la tabla 29, en los resultados.

6.7.4. pH

El pH es un factor muy importante, porque determinados procesos químicos solamente pueden tener lugar a un determinado pH. El pH es un indicador de la acidez de una sustancia. Está determinado por el número de iones libres de hidrógeno (H^+) en una sustancia.[35]

El pH sirve como un indicador que compara algunos de los iones más solubles en agua. El resultado de una medición de pH viene determinado por una consideración entre el número de protones (iones H^+) y el número de iones hidroxilo (OH^-). Cuando el número de protones iguala al número de iones hidroxilo, el agua es neutra. Tendrá entonces un pH alrededor de 7.[35]

El pH del agua puede variar entre 0 y 14. Cuando el pH de una sustancia es mayor de 7, es una sustancia básica. Cuando el pH de una sustancia está por debajo de 7, es una sustancia ácida. Cuanto más se aleje el pH por encima o por debajo de 7, más básica o ácida será la solución.[35]

6.7.4.1. Método del electrodo de pH

Un electrodo de pH es un tubo lo suficientemente pequeño como para poder ser introducido en un tarro normal. Está unido a un pH-metro por medio de un cable. Un tipo especial de fluido se coloca dentro del electrodo; este es normalmente “cloruro de potasio 3M”. Algunos electrodos contienen un gel que tiene las mismas propiedades que el fluido 3M. En el fluido hay cables de plata y platino. El sistema es bastante frágil, porque contiene una pequeña membrana. Los iones H^+ y OH^- entrarán al electrodo a través de esta membrana. Los iones crearán una carga ligeramente positiva y ligeramente negativa en cada extremo del electrodo. El potencial de las cargas determina el número de iones H^+ y OH^- y cuando esto haya sido determinado el pH aparecerá digitalmente en el pH-metro. El potencial depende de la temperatura de la solución. Es por eso que el pH-metro también muestra la temperatura.[35]

pH metro utilizado:



*Figura 31 pH metro utilizado de marca Stara 1215 orion phmetro thermo scientific
Fuente: EQUIPOS Y LABORATORIOS COLOMBIA*

Los resultados se muestran en la tabla 30 en los resultados.



(A)

(B)

*Figura 32 A-Prueba 1 de pH B-Prueba 2 de pH
Fuente: Elaboración propia (Equipo del CINBBYA)*

6.7.5. % de rendimiento

El rendimiento es la cantidad de producto obtenido en una reacción química.

El cálculo del rendimiento de biodiesel se realizó usando la siguiente ecuación:[6]

$$\text{Rendimiento biodiesel} = \frac{\text{Biodiesel}}{\text{Aceite} + \text{Alcohol}} * 100$$

Los resultados se muestran en la tabla 31, en los resultados.

6.8. PRODUCCIÓN DEL CO-PRODUCTO

Se pensaron en varios co-productos, pero se escogió uno con propiedades humectantes para la piel, de acuerdo a los ingredientes seleccionados para su elaboración.

6.8.1. Tipo de crema

El tipo de crema presenta una consistencia de crema fluida, donde su principal componente es agua. Este tipo de crema presenta pocos ingredientes grasos. Una textura suave. No deja sensación grasa y se extiende fácilmente. Teniendo en cuenta la consistencia de la crema, se define el tipo de piel en la cual se puede aplicar, en este caso para pieles normales y mixtas. Esta crema se dividió en dos fases. La fase externa acuosa y fase interna oleosa siendo esta última la que aportó consistencia y untuosidad a la crema. Además, le sumó propiedades beneficiosas

para la piel, convirtiéndose en una oportunidad de reciclaje de los residuos y su protección al ambiente apacentando a los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

6.8.2. Ingredientes utilizados

- **Crema base**
- **Agua Desmineralizada:** Este ingrediente está libre de impureza. De esta forma se evita que la crema se contamine con agentes externos que puedan dañarla.
- **Aceite de Ricino:** Nutre en profundidad y contribuye a cicatrizar. Está recomendado para pieles secas.
- **Vitamina E:** Utilizada como conservante de la crema, esta vitamina es rica en antioxidantes, por eso se usa para conservar cremas con una alta proporción de aceites. Además, su poder antioxidante ayuda a retrasar la aparición de arrugas. A esto hay que sumar que actúa como filtro solar. Por eso es uno de los conservantes más completo.
- **Aroma Naranja Tropical:** fragancias concentradas disponibles en una amplia gama aromática. Las hay dulces, cítricas, afrutadas, marinas, herbales, empolvadas. La gran variedad de aromas y lo económicas que resultan son los pros de elegir esencias para aromatizar cremas caseras.



*Figura 33 Ingredientes preparación co-producto
Fuente: Elaboración propia*

6.8.3. Cantidad de ingredientes

En la imagen 33 se muestra la cantidad de ingredientes utilizados en la elaboración de la crema:

- **Crema base:** 800 g
- **Agua Desmineralizada:** 48g equivale al 6% de la crema base
- **Aceite de Ricino:** 48g equivale al 6% de la crema base
- **Vitamina E:** 8g equivale al 0.01% de la crema base

- **Aroma Naranja Tropical:** 40 gotas, por literatura son 3-5 gotas por cada 100g



*Figura 34 Cantidad de ingredientes para preparación co-producto
Fuente: Elaboración propia*

6.8.4. Proceso de producción

En un vaso de precipitado se añaden los 800g de la crema base adquirida en Nueva Ester, a esta crema se le agregan los 48g del agua destilada, 48g de aceite de ricino y los 8g de la vitamina E. Para crear una mezcla homogénea, se pone el vaso en la máquina agitadora a una velocidad de 1000 rpm hasta lograr una sola fase en esta mezcla.

Por último, se agregan las 80 gotas del aroma mientras la mezcla anterior seguía en agitación, este último paso se dejó en el equipo por 2 minutos más para lograr una mezcla exitosa.

El envasado del producto se hizo con una jeringa, para facilitar este procedimiento debido a la alta viscosidad que presenta el co-producto.

Para saber si la crema se puede utilizar sobre el cuerpo, se le aplicaron unas pruebas de pH, este resultado debe obtenerse en un valor neutro, también se usó en la piel de una persona como testigo con problemas de irritabilidad y de alergias constantes. Obteniendo como resultado un pH de 7,08 y en el testigo ninguna reacción desfavorable.



*Figura 35 Crema envasada
Fuente: Elaboración propia*

En este capítulo se muestra todo lo que se realizó durante el proyecto para poder cumplir con los objetivos propuestos, empezando con la caracterización de la semilla y su aceite, así como la producción y caracterización de biodiesel y el co-producto.

7. DESARROLLO DE SOFTWARE

7.1. SIMULACIÓN ASPEN HYSYS

7.1.1. Proceso de Simulación

En la figura 36 se puede observar la simulación de la planta productora de biodiesel. (En el anexo B se muestra las condiciones de operación para cada uno de los equipos utilizados en la simulación)

Para esta parte se tuvo en cuenta los datos del desarrollo de este proyecto, la cantidad de aceite de higuera que se requiere para producir 50 ton /año de biodiesel, por medio de la estequiometría de la reacción de transesterificación; a partir de este valor se realizó la simulación de una planta de producción de biodiesel utilizando Aspen Hysys V10, el cual proporciona información fiable sobre la operación del proceso debido a sus amplios paquetes termodinámicos, enormes bibliotecas de componentes y técnicas avanzadas de cálculo.

Los procedimientos para el proceso de simulación se refieren esencialmente a la definición de los componentes químicos, la selección de un modelo termodinámico, la determinación de capacidad de la planta, la elección de unidades adecuadas de operación y la creación de las condiciones de entrada.

El aceite de ricino fue representado como una mezcla de triirricinoleína ($C_{57}H_{104}O_6$) 91% y los ácidos grasos: linoleico 4%, oleico 3%, palmítico 1% y esteárico 1% [4, 46]. En consecuencia, se tomó el Etil ricinoleato ($C_{19}H_{36}O_2$) como el principal producto resultante de la reacción (biodiesel). La triirricinoleína y Etil ricinoleato fueron definidos y caracterizados por medio de componentes hipotéticos a través de la herramienta hypo-manager. Para el cálculo de las propiedades críticas (T_c , P_c , V_c) y la temperatura normal de ebullición T_b , que se puede apreciar en la tabla 19, fue utilizado el método de UNIFAC reportados por M. G. Aca-Acaa et al. 2009 [47].

Tabla 19 Parámetros de HYSYS

Fuente: Elaboración propia

Parámetro	Triirricinoleína	Etil Ricinoleato
T_b [K]	846.8	623
T_c [K]	946.2	759.8
P_c [bar]	3.4	14.4
V_c [cm³/mol]	3271.9	1115.1

La información sobre el resto de los componentes, tales como, etanol, glicerina, agua y demás ácidos grasos está disponible en la biblioteca de componentes Hysys.

Una vez definido los componentes del sistema, se eligió el modelo termodinámico que permitiera la estimación correcta de las propiedades fisicoquímicas y termodinámicas de los compuestos en el proceso. Debido a la presencia de componentes altamente polares como el etanol y glicerina, así como el NaOH, el modelo más acorde es el modelo de actividad “UNIQUAC”

Los equipos que se usaron para la simulación fueron básicamente: mezcladores, reactor CSTR, reactor de conversión, intercambiadores de calor, separador de fases, torre de extracción, y torre de destilación; disponibles en la librería de Aspen Hysys 2010.

El proceso se inició al final de la unidad de desgomado de aceite de higuera. El aceite de ricino (53,65 kgmole/h), etanol (9392 kgmole/h) y el catalizador NaOH (47kg/h) son mezclados en el MIX 100. Luego esta mezcla se calienta a 60°C antes de ser enviada al reactor de transesterificación CSTR 100 con un volumen de 21m³, diámetro 2,612m y una altura de 3.918. Obteniendo un porcentaje de rendimiento del 66,54% con una cantidad de 7,281e-001 de Etil Recinoleato. Seguido de la transesterificación la temperatura de la mezcla se disminuyó a 25°C para que en el separador V-100 se produzcan las dos fases, la ligera y la pesada. La fase ligera, la glicerina bruta que se produce en una cantidad del orden del 10% del biodiesel elaborado, debe ser refinada para obtener un producto con valor agregado, comercializable en los campos químico, farmacéutico y cosmético. La glicerina se usó como ingrediente en la creación del co-producto (crema), y la fase pesada de Etil Recinoleato con productos de etanol y catalizador que siguen a la unidad de destilación T-100, en este equipo se produce el lavado del Biodiesel con agua, donde se obtiene residuos de glicerina y biodiesel aún con impurezas, por motivo de diseño en la simulación se calienta el biodiesel y pasa al separador flas V-101, donde se tiene mayor purificación del producto y una parte del etanol que no reacciona se devuelve al reciclo para hacer el proceso nuevamente y el biodiesel se envió a la torre de destilación de 10 platos T-101, donde nuevamente se le suministra un lavado obteniendo 4353 kgmole/h de Etil Recinoleato.

La alimentación de etanol consistió en etanol fresco y etanol reciclado de la unidad de recuperación de etanol V-101 y reactor CSTR-100, con una proporción molar de 12:1 de etanol/aceite.

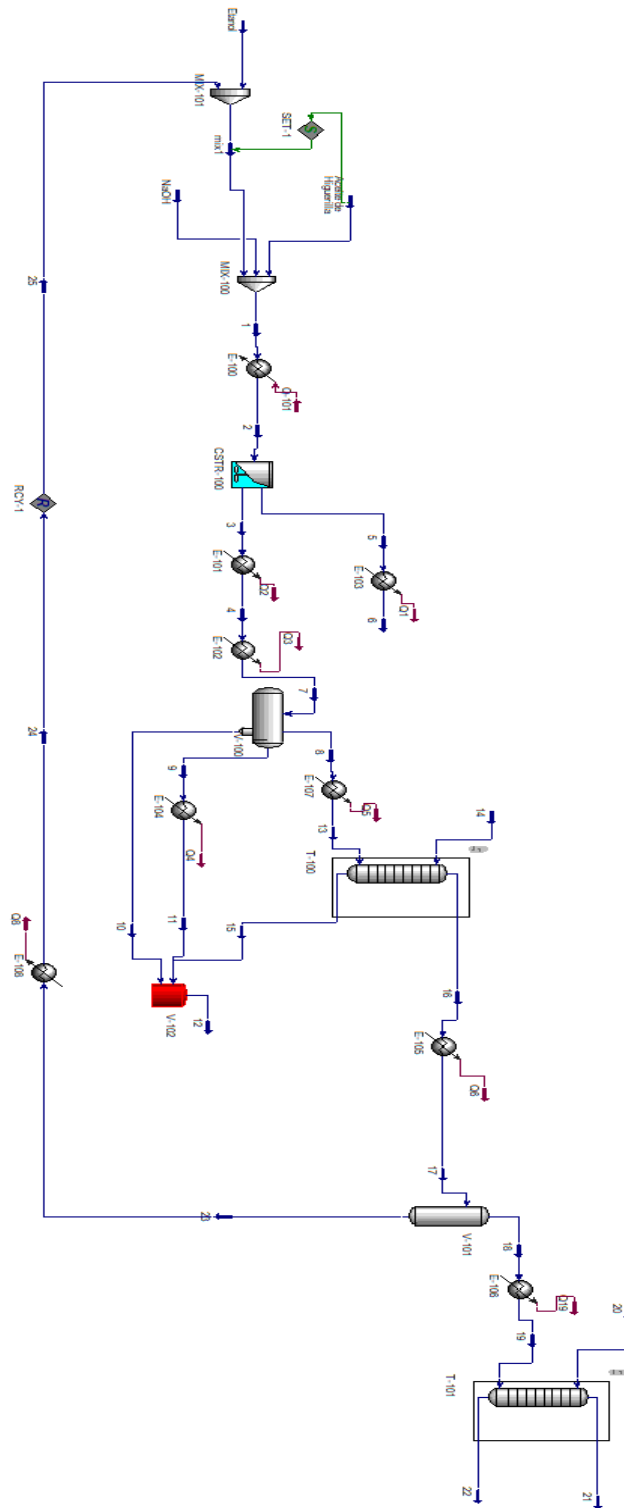


Figura 36 Simulación de la biorrefinería en HYSYS
Fuente: Elaboración propia

Estos datos son los obtenidos en la simulación que se realizó con datos a gran escala:

The screenshot shows the 'Material Stream: Aceite de Higuierilla' window in Aspen HYSYS. The 'Worksheet' tab is active, displaying a table of stream properties. The stream name is 'Aceite de Higuierilla' and the phase is 'Liquid Phase'. The table includes properties such as Temperature (24.00 C), Pressure (250.0 kPa), Molar Flow (53.65 kgmole/h), Mass Flow (5.000e+004 kg/h), and Heat Flow (-2.680e+004 kW).

Worksheet	Stream Name	Aceite de Higuierilla	Liquid Phase
Conditions	Vapour / Phase Fraction	0.0000	1.0000
Properties	Temperature [C]	24.00	24.00
Composition	Pressure [kPa]	250.0	250.0
Oil & Gas Feed	Molar Flow [kgmole/h]	53.65	53.65
Petroleum Assay	Mass Flow [kg/h]	5.000e+004	5.000e+004
K Value	Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h]	53.33	53.33
User Variables	Molar Enthalpy [kJ/kgmole]	-1.798e+006	-1.798e+006
Notes	Molar Entropy [kJ/kgmole-C]	2647	2647
Cost Parameters	Heat Flow [kW]	-2.680e+004	-2.680e+004
Normalized Yields	Liq Vol Flow @Std Cond [m3/h]	53.30	53.30
	Fluid Package	Basis-7	
	Utility Type		

Figura 37 Datos en HYSYS de la línea de aceite de higuierilla a gran escala
Fuente: Elaboración propia a partir de Aspen Hysys 2010

The screenshot shows the 'Material Stream: Etanol' window in Aspen HYSYS. The 'Worksheet' tab is active, displaying a table of stream properties. The stream name is 'Etanol' and the phase is 'Liquid Phase'. The table includes properties such as Temperature (24.00 C), Pressure (250.0 kPa), Molar Flow (9392 kgmole/h), Mass Flow (4.327e+005 kg/h), and Heat Flow (-7.260e+005 kW).

Worksheet	Stream Name	Etanol	Liquid Phase
Conditions	Vapour / Phase Fraction	0.0000	1.0000
Properties	Temperature [C]	24.00	24.00
Composition	Pressure [kPa]	250.0	250.0
Oil & Gas Feed	Molar Flow [kgmole/h]	9392	9392
Petroleum Assay	Mass Flow [kg/h]	4.327e+005	4.327e+005
K Value	Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h]	543.6	543.6
User Variables	Molar Enthalpy [kJ/kgmole]	-2.783e+005	-2.783e+005
Notes	Molar Entropy [kJ/kgmole-C]	19.39	19.39
Cost Parameters	Heat Flow [kW]	-7.260e+005	-7.260e+005
Normalized Yields	Liq Vol Flow @Std Cond [m3/h]	543.1	543.1
	Fluid Package	Basis-7	
	Utility Type		

Figura 38 Datos en HYSYS de la línea de etanol a gran escala
Fuente: Elaboración propia a partir de Aspen Hysys 2010

Worksheet	Stream Name	NaOH	Liquid Phase
Conditions	Vapour / Phase Fraction	0.0000	1.0000
Properties	Temperature [C]	24.00	24.00
Composition	Pressure [kPa]	250.0	250.0
Oil & Gas Feed	Molar Flow [kgmole/h]	117.5	117.5
Petroleum Assay	Mass Flow [kg/h]	4700	4700
K Value	Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h]	2.637	2.637
User Variables	Molar Enthalpy [kJ/kgmole]	-8.358e+004	-8.358e+004
Notes	Molar Entropy [kJ/kgmole-C]	-99.88	-99.88
Cost Parameters	Heat Flow [kW]	-2728	-2728
Normalized Yields	Liq Vol Flow @Std Cond [m3/h]	3.122	3.122
	Fluid Package	Basis-1	
	Utility Type		

Figura 39 Datos en HYSYS de la línea de NaOH a gran escala
Fuente: Elaboración propia a partir de Aspen Hysys 2010

Worksheet	Stream Name	22	Liquid Phase
Conditions	Vapour / Phase Fraction	0.0000	1.0000
Properties	Temperature [C]	103.2	103.2
Composition	Pressure [kPa]	250.0	250.0
Oil & Gas Feed	Molar Flow [kgmole/h]	4353	4353
Petroleum Assay	Mass Flow [kg/h]	2.087e+005	2.087e+005
K Value	Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h]	261.2	261.2
User Variables	Molar Enthalpy [kJ/kgmole]	-2.680e+005	-2.680e+005
Notes	Molar Entropy [kJ/kgmole-C]	94.36	94.36
Cost Parameters	Heat Flow [kW]	-3.240e+005	-3.240e+005
Normalized Yields	Liq Vol Flow @Std Cond [m3/h]	263.0	263.0
	Fluid Package	Basis-1	
	Utility Type		

Figura 40 Datos en HYSYS de la línea de producto a gran escala
Fuente: Elaboración propia a partir de Aspen Hysys 2010

	Molar Flows	Liquid Phase
H2O	0.0090	0.0090
Tricinoleína*	0.0000	0.0000
Etil recinoleato*	32.6480	32.6480
Ethanol	4319.8604	4319.8604
Glycerol	0.6776	0.6776
NaOH	0.0000	0.0000
n-Hexane	0.0000	0.0000

Total: 4353.19497 kgmole/h

Figura 41 Producto obtenido en HYSYS a gran escala
Fuente: Elaboración propia a partir de Aspen Hysys 2010

Estos datos son los obtenidos en la simulación que se realizó con los datos obtenidos experimentales:

	Aceite de Higuierilla	Liquid Phase
Stream Name	Aceite de Higuierilla	
Vapour / Phase Fraction	0.0000	1.0000
Temperature [C]	24.00	24.00
Pressure [kPa]	250.0	250.0
Molar Flow [kgmole/h]	1.207e-003	1.207e-003
Mass Flow [kg/h]	1.125	1.125
Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h]	1.200e-003	1.200e-003
Molar Enthalpy [kJ/kgmole]	-1.798e+006	-1.798e+006
Molar Entropy [kJ/kgmole-C]	2647	2647
Heat Flow [kW]	-0.6031	-0.6031
Liq Vol Flow @Std Cond [m3/h]	1.200e-003	1.200e-003
Fluid Package	Basis-1	
Utility Type		

Figura 42 Datos en HYSYS de la línea de aceite de higuierilla con datos experimentales
Fuente: Elaboración propia a partir de Aspen Hysys 2010

Worksheet	Stream Name	Etanol	Liquid Phase
Conditions	Vapour / Phase Fraction	0.0000	1.0000
Properties	Temperature [C]	24.00	24.00
Composition	Pressure [kPa]	250.0	250.0
Oil & Gas Feed	Molar Flow [kgmole/h]	0.1510	0.1510
Petroleum Assay	Mass Flow [kg/h]	6.958	6.958
K Value	Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h]	8.741e-003	8.741e-003
User Variables	Molar Enthalpy [kJ/kgmole]	-2.783e+005	-2.783e+005
Notes	Molar Entropy [kJ/kgmole-C]	19.39	19.39
Cost Parameters	Heat Flow [kW]	-11.68	-11.68
Normalized Yields	Liq Vol Flow @Std Cond [m3/h]	8.734e-003	8.734e-003
	Fluid Package	Basis-1	
	Utility Type		

Figura 43 Datos en HYSYS de la línea de etanol con datos experimentales
Fuente: Elaboración propia a partir de Aspen Hysys 2010

Worksheet	Stream Name	NaOH	Liquid Phase
Conditions	Vapour / Phase Fraction	0.0000	1.0000
Properties	Temperature [C]	24.00	24.00
Composition	Pressure [kPa]	250.0	250.0
Oil & Gas Feed	Molar Flow [kgmole/h]	1.500e-004	1.500e-004
Petroleum Assay	Mass Flow [kg/h]	6.000e-003	6.000e-003
K Value	Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h]	3.366e-006	3.366e-006
User Variables	Molar Enthalpy [kJ/kgmole]	-8.358e+004	-8.358e+004
Notes	Molar Entropy [kJ/kgmole-C]	-99.88	-99.88
Cost Parameters	Heat Flow [kW]	-3.483e-003	-3.483e-003
Normalized Yields	Liq Vol Flow @Std Cond [m3/h]	3.985e-006	3.985e-006
	Fluid Package	Basis-1	
	Utility Type		

Figura 44 Datos en HYSYS de la línea de NaOH con datos experimentales
Fuente: Elaboración propia a partir de Aspen Hysys 2010

Worksheet	Stream Name	22	Vapour Phase
Conditions	Vapour / Phase Fraction	1.0000	1.0000
Properties	Temperature [C]	102.9	102.9
Composition	Pressure [kPa]	250.0	250.0
Oil & Gas Feed	Molar Flow [kgmole/h]	5.261e-002	5.261e-002
Petroleum Assay	Mass Flow [kg/h]	2.416	2.416
K Value	Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h]	3.032e-003	3.032e-003
User Variables	Molar Enthalpy [kJ/kgmole]	-2.297e+005	-2.297e+005
Notes	Molar Entropy [kJ/kgmole-C]	168.0	168.0
Cost Parameters	Heat Flow [kW]	-3.357	-3.357
Normalized Yields	Liq Vol Flow @Std Cond [m3/h]	3.028e-003	3.028e-003
	Fluid Package	Basis-1	
	Utility Type		

*Figura 45 Datos en HYSYS de la línea de producto con datos experimentales
Fuente: Elaboración propia a partir de Aspen Hysys 2010*

El objetivo de interpretar la simulación es comparar el rendimiento de la transesterificación en el laboratorio y una aproximación real a industria de biorrefinería obteniendo un rendimiento de reacción a nivel laboratorio del 59% y en la simulación de industria la reacción de la transesterificación es de 69,92%

Para el proceso de simulación fue necesario tener ciertos datos obtenidos en el proceso experimental, como las temperaturas de los procesos, volumen o masa de cada componente (etanol, catalizador y aceite de higuierilla).

Los datos arrojados en Hysys se obtienen de realizar dos cambios, el primero se realizó con unos datos industrialmente (50 toneladas) y el segundo se realizó con nuestros datos obtenidos en el proceso experimental, debido al set que se tiene en el proceso, únicamente haciendo el cambio de flujo de aceite de higuierilla, cambia el flujo de etanol, y de igual manera las condiciones de los equipos.

8. RESULTADOS

A continuación, se muestran los resultados obtenidos en la investigación.

8.1. RESULTADOS DISEÑO DE EXPERIMENTOS

En este proyecto se realizó un diseño de experimentos 2^3 , es decir de 2 niveles y 3 variables como se muestra a continuación:

Paso 1. Definir las Variables Respuesta a ser medidas

Tabla 20. Definición de las Variables a ser medidas

Fuente: Elaboración propia

Nombre	Unidades	Analizar	Objetivo	Destino	Impacto	Sensibilidad	Bajo	Alto
Viscosidad	cPs	Media	Maximizar		3,0	Medio		
densidad	kg/m ³	Media	Maximizar		3,0	Medio		
Índice de Acidez		Media	Maximizar		3,0	Medio		
pH		Media	Maximizar		3,0	Medio		
% Rendimiento	%	Media	Maximizar		3,0	Medio		

Paso 2: Definir los factores experimentales que van a variar

Tabla 21 . Definición de los factores experimentales

Fuente: Elaboración propia

Nombre	Unidades	Tipo	Papel	Bajo	Alto	Niveles
A: Relación Molar Alcohol/Aceite	moles	Continuo	Controlable	6,0	12,0	
B:% Catalizador	%	Continuo	Controlable	0,8	1,0	
C:Temperatura	°C	Continuo	Controlable	25,0	60,0	

Paso 3: Seleccione el diseño experimental

Tabla 22. Selección del diseño experimental

Fuente: Elaboración propia

Tipo of	Diseño	Puntos Centrales	Punto Central	Diseño es	Número de	Total
Factores	Tipo	Por Bloque	Colocación	Aleatorizado	Replicaciones	Ejecuciones
Proceso	Factorial 2^3	0	Aleatorio	Sí	0	8

Número de muestras por ejecución: 1

Tabla 22 Numero de muestras por ejecución

Fuente: Elaboración propia

Total	Error
Bloques	D.F.
1	1

Paso 4: Indicar el modelo inicial a ajustar a los resultados del experimento

Tabla 23.Indicación del modelo a utilizar

Fuente: Elaboración propia

Factores	Modelo	Coefficientes	Efectos excluidos
Proceso	Interacciones de 2 factores	7	

8.2. RESULTADOS DE CARACTERIZACIÓN DEL BIODIESEL

A continuación, se muestran los resultados obtenidos sobre la caracterización del biodiesel.

8.2.1. Densidad

Se realizaron dos pruebas y se calculó el promedio, el cual se eligió como resultado final.

Tabla 24.Resultados muestra 1 prueba densidad biodiesel

Fuente: Elaboración propia

Biodiesel Muestra 1							
Mpicnometro [gr]	Mtotal[gr]	Maceite[gr]	Volumen[mL]	Densidad [Kg/m ³]	T	Fcorreccion	Densidad corregida
33,44	56,31	22,86	24,82	0,921	22,60	0,001	0,922

Tabla 25 . Resultados muestra 2 prueba densidad biodiesel

Fuente: Elaboración propia

Biodiesel Muestra 2							
Mpicnometro [gr]	Mtotal[gr]	Maceite[gr]	Volumen[mL]	Densidad [Kg/m ³]	T	Fcorreccion	Densidad corregida
32,41	55,44	23,03	24,90	0,9250	23	0,001	0,9260

Tabla 26. Resultados promedio prueba densidad biodiesel

Fuente: Elaboración propia

Biodiesel Promedio							
Mpicnometro [gr]	Mtotal[gr]	Maceite[gr]	Volumen[mL]	Densidad [Kg/m ³]	T	Fcorreccion	Densidad corregida
32,9	55,9	22,9	24,9	0,923	22,8	0,001	0,924

Densidad relativa:

$$G = \frac{\rho_{sustancia}}{\rho_{H_2O}} = \frac{0,924}{997} = 0,00092678$$

8.2.2. Índice de acidez

Se realizaron tres pruebas y se calculó el promedio, el cual se eligió como resultado final.

Tabla 27. A-Resultados muestra 1 de la prueba del índice de acidez al biodiesel.
B-Resultados muestra 2 de la prueba del índice de acidez al biodiesel.

Fuente: Elaboración propia de autoras

(A)

	ACIDEZ CON NaOH
	Diesel
Propiedad	Prueba 1
Volumen [mL]	0.88
Normalidad	0.10
Peso [g]	51.14
Porcentaje de Acidez	4.84
Corrección	1.99
Indice de Acidez	9.63

(B)

	ACIDEZ CON NaOH
	Diesel
Propiedad	Prueba 2
Volumen [mL]	1.10
Normalidad	0.10
Peso [g]	51.47
Porcentaje de Acidez	6.03
Corrección	1.99
Indice de Acidez	11.99

Tabla 28. C-Resultados muestra 3 de la prueba del índice de acidez al biodiesel
D-Resultados promedio de las pruebas del índice de acidez al biodiesel

Fuente: Elaboración propia

(C)

	ACIDEZ CON NaOH
	Diesel
Propiedad	Prueba 3
Volumen [mL]	0.90
Normalidad	0.10
Peso [g]	50.10
Porcentaje de Acidez	5.07
Corrección	1.99
Indice de Acidez	10.08

(D)

	ACIDEZ CON NaOH
	Diesel
Propiedad	Promedio
Volumen [mL]	0.96
Normalidad	0.10
Peso [g]	5.09
Porcentaje de Acidez	5.31
Corrección	1.99
Indice de Acidez	10.57

8.2.3. Viscosidad

Tabla 29. Datos para poder calcular la viscosidad del biodiesel

Fuente: Elaboración propia de autoras

BIOEDIESEL		
m [g]	v [mL]	ρ [g/ml]
90,34	100	0,9

Tabla 30 . Resultados de las pruebas realizadas a la viscosidad del biodiesel
Fuente: Elaboración propia

Prueba 1	μ [cP]	56,01	Prueba 6	μ [cP]	55,36
	v [St.]	62,01		v [St.]	61,28
	RPM	106		RPM	106
	τ [N.m]	98,65		τ [N.m]	97,5
Prueba 2	μ [cP]	55,62	Prueba 7	μ [cP]	55,36
	v [St.]	61,56		v [St.]	61,28
	RPM	106		RPM	106
	τ [N.m]	97,95		τ [N.m]	97,5
Prueba 3	μ [cP]	55,5	Prueba 8	μ [cP]	55,36
	v [St.]	61,44		v [St.]	61,28
	RPM	106		RPM	106
	τ [N.m]	97,75		τ [N.m]	97,5
Prueba 4	μ [cP]	55,45	Prueba 9	μ [cP]	55,36
	v [St.]	61,38		v [St.]	61,28
	RPM	106		RPM	106
	τ [N.m]	97,65		τ [N.m]	97,5
Prueba 5	μ [cP]	55,42	Prueba 10	μ [cP]	55,36
	v [St.]	61,34		v [St.]	61,28
	RPM	106		RPM	106
	τ [N.m]	97,6		τ [N.m]	97,5

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en las diferentes pruebas que se realizaron, se escoge el resultado de la prueba número 1, debido a que es en donde el torque alcanza el valor más cercano al 100 %.

8.2.4. pH

Tabla 31 . Resultados de la prueba de pH al biodiesel
Fuente: Elaboración propia

	BODIESEL				
	MUESTRA				
	1	2	3	4	Promedio
pH	9,01	8,03	7,9	8,05	8,25
Temperatura	22,2	22,8	24,4	24,5	23,48

Teniendo en cuenta lo anterior y a la información ya mostrada sobre el pH , se puede observar que el biodiesel producido fue alcalino.

8.2.5. % rendimiento

Reemplazando los datos necesarios para la formula anteriormente mencionada, se obtuvo como resultado:

Tabla 32 . Resultados de los rendimientos para cada una de las pruebas realizadas de biodiesel

Fuente: Elaboración propia

Muestra 1	Relación	2;1	%Rendimiento	46%
	Biodiesel [ml]	320		
	Aceite [ml]	500		
	Etanol [ml]	200		
Muestra 2	Relación	6;1	%Rendimiento	60%
	Biodiesel [ml]	670		
	Aceite [ml]	800		
	Etanol [ml]	320		
Muestra 3	Relación	8;1	%Rendimiento	28%
	Biodiesel [ml]	45		
	Aceite [ml]	100		
	Etanol [ml]	58		
Muestra 4	Relación	10;1	%Rendimiento	23%
	Biodiesel [ml]	50		
	Aceite [ml]	150		
	Etanol [ml]	70		
Muestra 5	Relación	12;1	%Rendimiento	59%
	Biodiesel [ml]	1000		
	Aceite [ml]	1200		
	Etanol [ml]	506		

8.2.6. Cromatografía

La Cromatografía es una técnica de separación en la que los componentes de una muestra se separan en dos fases: una fase estacionaria de gran área superficial, y una fase móvil. El objetivo de la fase estacionaria es retrasar el paso de los componentes de la muestra. Cuando los componentes pasan a través del sistema a diferentes velocidades, estos se separan en determinados tiempos. Cada componente tiene un tiempo de paso característico a través del sistema, llamado tiempo de retención. La separación cromatográfica se logra cuando el tiempo de retención del analito difiere del resto de componentes de la muestra.[36]

En este caso el cromatógrafo utilizado fue de gases, debido a que el medio de transporte de la muestra son gases como el helio, aire comprimido e hidrogeno.

El equipo Dani, ubicado en Cinbbya separa las muestras en pequeños grupos funcionales y compara grupos funcionales comunes entre muestras problema y muestra estándar.

En nuestro caso se insertó el patrón de un biodiesel conocido, que se obtuvo de un proyecto realizado años atrás, el cual fue comprobado por cromatografía de esteres en un laboratorio certificado, y un biodiesel problema, que en este caso es el biodiesel de higuerrilla producido por nosotras. Para poder determinar similitudes se debe tener en cuenta el pico y el tiempo de retención entre los dos sean similares o iguales.

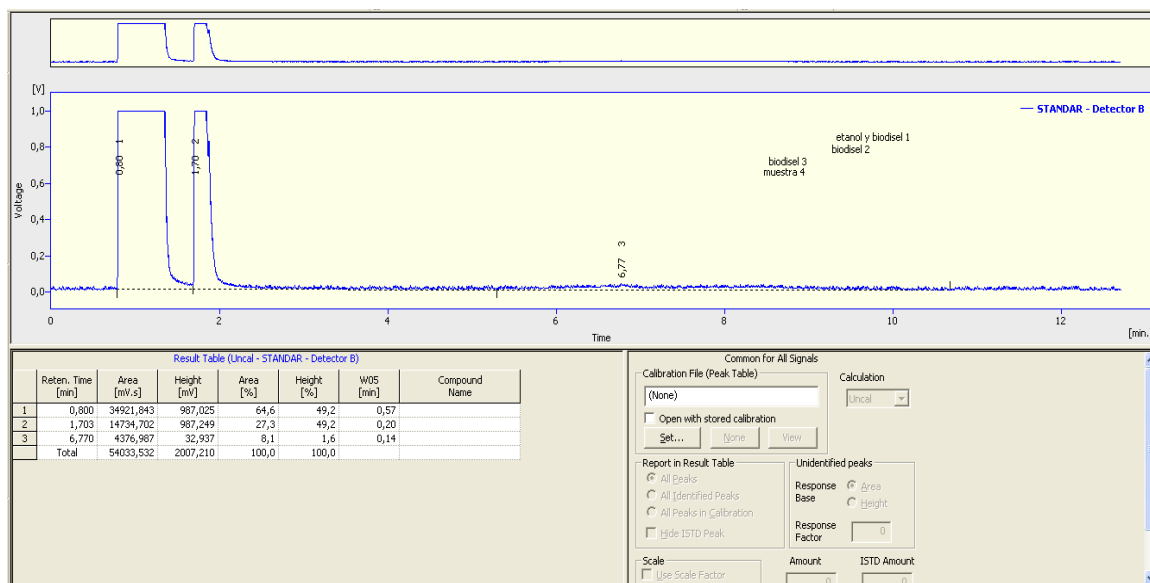


Figura 46 Resultados de patrón de biodiesel
Fuente: Elaboración propia

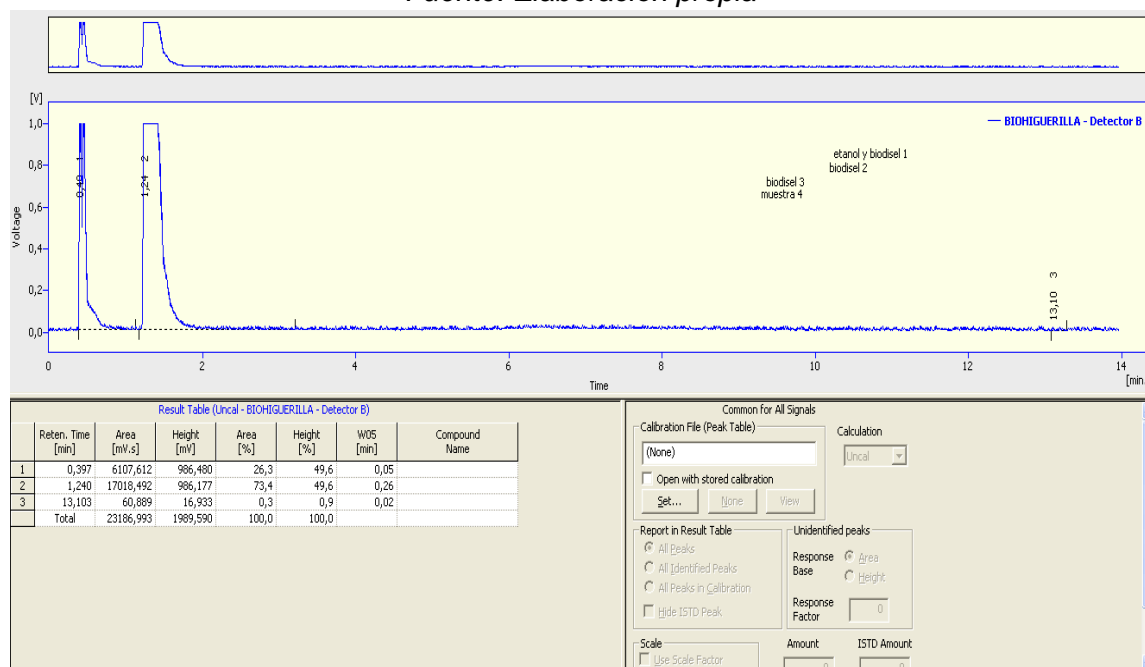


Figura 47 Resultado de cromatografía de biodiesel de higuera
Fuente: Elaboración propia

Como se muestran en las figuras anteriores 35-36, el tiempo de retención del biodiesel patrón es de 6,770min con una altura de 32,927mV y el biodiesel problema fue de 13,303min Y 16,993mV respectivamente.

8.3. ESTUDIO COMPARATIVO EL ACEITE DE PALMA Y EL ACEITE DE HIGUERILLA

8.3.1. Comparación

La higuierilla no se usa en la alimentación humana, por lo cual no afecta la economía alimentaria, como ocurre con el maíz o la caña de azúcar. Produce cosechas cada ocho meses, ventaja frente a plantas como la palma cuya producción es cada cinco años, y entre 1.900 y 3.000 kilogramos de semillas por hectárea, de las que se derivan cerca de 1.200 kilogramos de aceite por hectárea. [37]

El área sembrada en palma aceitera en el país pasó de 150 000 hectáreas en el año 2000 a 450.000 en el 2012, según datos de la Federación de Palmicultores (Fedepalma). Según datos de Fedepalma, el 90% de las 466.185 hectáreas de palma aceitera que hay actualmente en el país no se levantaron sobre selvas vírgenes, sino sobre terrenos agrícolas utilizados previamente para pasturas para ganadería extensiva o para otros cultivos como algodón, arroz o banano que se destinaron a este nuevo uso.[38]

En Colombia la higuierilla está presente en la mayoría de las regiones; sin embargo, no hay un proyecto de cultivo tecnificado que permita implementarla en el desarrollo de otros productos o derivar subproductos, como ocurre con especies como la palma africana. [38]

Después de analizar los resultados se puede hacer una comparación más profunda entre el aceite de palma y el aceite de higuierilla, para el caso de Colombia.

Tabla 33. Comparación de usos del aceite de palma y el aceite de higuierilla
Fuente: Fedepalma-Adaptado por autoras

	USOS				
	PALMA AFRICANA	HIGUERILLA		PALMA AFRICANA	HIGUERILLA
COMESTIBLES	Aceite para freír.	NO APLICA	NO COMESTIBLES	Biodiésel	Industria de plásticos
	Margarinas para panadería y repostería.			Jabones de uso doméstico y detergentes	Industria de lubricantes
	Margarinas de mesa.			Barro de perforación	fabricación de labiales
	Mantecas industriales.			Goma	tónicos capilares
	Pastillaje.			Velas	champús
	Confitería.			Cosméticos	brillos
	Galletería.			Tintas para impresión	emulsificantes
	Helados.			Jabones metálicos, para la fabricación de grasas lubricantes y secadores metálicos	desodorantes
	Crema para café.			Grasa para lubricar la maquinaria empleada en la producción de comestibles	ceras
	Salsas y aderezos.			Grasa para engrasar moldes y equipos de fabricación de pan	anticaspa
	Mayonesas.			Grasas para la protección de tanques, tuberías o similares, que operan al descubierto	laxante
	Sustituto de la manteca de cacao.			Laminación en frío de las planchas de acero	purgantes
	Sustituto de la grasa de la leche.			Láminas de estaño	industria de pinturas
	Mantequilla de maní.			Ácidos para lubricar fibras en la industria textil.	procesamiento de textiles
	Alimento directo para animales.			Combustibles	biodiesel
Concentrados para animales.	Fortalecer las uñas Para las cejas.				

8.3.2. Comparación de rendimiento del cultivo

Para poder realizar la relación a gran escala se tuvo en cuenta los datos obtenidos en la figura 37:

Tabla I
Rendimiento de las Principales Fuentes Vegetales por Tipo de Cultivo

Cultivo	Rendimiento (l/ha-año)	Rendimiento (gal/ha-año)	Empleos agric+ind/ha-año
Palma	5550	1446	0.27
Cocotero	4200	1110	0.52
Higuierilla	2600	687	0.64
Aguacate	2460	650	0.51
Jatropha	1559	412	0.30
Colza	1100	291	0.40
Maní	990	262	0.40
Soya	840	222	0.37
Girasol	890	235	0.40

Fuente: Instituto Interamericano De Cooperación Para La Agricultura IICA [8].

Figura 48 Referencia de rendimiento de palma e higuierilla
Fuente: Instituto interamericano de cooperación para la agricultura

Tabla 34. Comparación de rendimiento de aceite de palma y aceite de higuera
Fuente: Elaboración propia

	Litros/Hectarea	Recolección en 5 años	Total por hectarea
PALMA	5550	1	5550
HIGUERILLA	2600	7,5	19500

Para realizar esta comparación, se tuvo en cuenta información previamente presentada, en donde se dice que para poder obtener el aceite de la palma africana es aproximadamente 4 y 5 años, y la recolección del aceite de higuera es cada ocho meses.

8.3.3. Impactos ambientales generados por el cultivo

Para el análisis de los impactos más relevantes de la implementación del cultivo se toma son elementos esenciales de la naturaleza como lo son el agua y suelo.

A continuación, se muestra una tabla con los impactos ambientales directos e indirectos. *La magnitud es calificada con una escala de 1 a 5 siendo: 1 bajo, 2 medio bajo, 3 medio, 4 medio alto y 5 alto.

Tabla 355. Impactos ambientales directos e indirectos en el cultivo de Higuera
Fuente: Guía para la elaboración de Planes de Biocomercio Instituto -Adaptación propia

RECURSO	ACTIVIDAD	IMPACTO AMBIENTAL	TIPO	MAGNITUD*	MEDIDA A APLICAR
AGUA	Preparación del suelo	Contaminación de afluentes servidas a los cauces de lavados	Directo	1	implementación de pozo séptico
	Fertilización	Contaminación de aguas por lavado del suelo	Directo	1	Control en la aplicación de agroquímicos
SUELO	Siembra	Remoción de microfauna	Directo	1	Uso adecuado de plántulas
	Trazado	Remoción de suelo y microfauna	Directo	2	Control y utilización de herramienta adecuada
	Trasplante	Transporte de hongos, enfermedades relacionadas a la planta	Indirecto	1	Control estricto de enfermedades y plagas
	Controles y podas	Disminución en la vegetación y erosión del suelo	Indirecto	1	Manejo limpio de cultivo
	Cosecha y preparación de cosecha	Alteración de las condiciones orgánicas químicas	Directo	2	Sustitución de agroquímicos por abonos limpios
	Control de plagas	Aplicación de agrotóxicos, para el mantenimiento y control de insectos	Directo	4	Modificar el proceso e implementar control manual de plagas

De acuerdo con lo establecido en las actividades requeridas para el establecimiento del cultivo como para su desarrollo normal se requieren una serie de actividades e intervenciones que crean un impacto tanto positivo como negativo a los recursos naturales. Igualmente se tiene en cuenta el recurso humano identificado en este sentido como recurso social.[39]

Tabla 366. Impactos ambientales directos e indirectos en el cultivo de Higuierilla
Fuente: Elaboración propia

ACTIVIDAD IMPACTANTE	IMPACTO	CALIFICACIÓN IMPACTO	RECURSO IMPACTADO
Capacitación	Mejora el conocimiento técnico del productor	Positivo	Social
Uso de abonos	Mejora la estructura del suelo	Positivo	Suelo
Labranza mínima	Mantenimiento de la estructura del suelo	Positivo	Suelo
Uso de abonos inorgánicos	Favorece la calidad del suelo y fertiliza el suelo para el óptimo desarrollo del cultivo	Negativo	Suelo
	Disminuye el aporte de sedimentos al agua	Positivo	Suelo
	Conservación de flora y fauna	Positivo	Suelo
	Reduce la pérdida de suelos, amarra el suelo	Positivo	Suelo
Uso de controles biológicos	Preservación de especies benéficas	Positivo	Fauna y Flora
Uso de Agrotóxicos	Control de plagas y enfermedades, que no se controlan con el biológico	Negativo	Fauna y Flora

8.4. DIAGRAMA DE LA BIOREFINERIA

La proyección de la biorrefinería se realizó teniendo en cuenta la información teórica de cómo y qué es una biorrefinería, pero además se incluyeron todos los procesos que se realizaron en este proyecto para obtener el biodiesel y su co-producto.

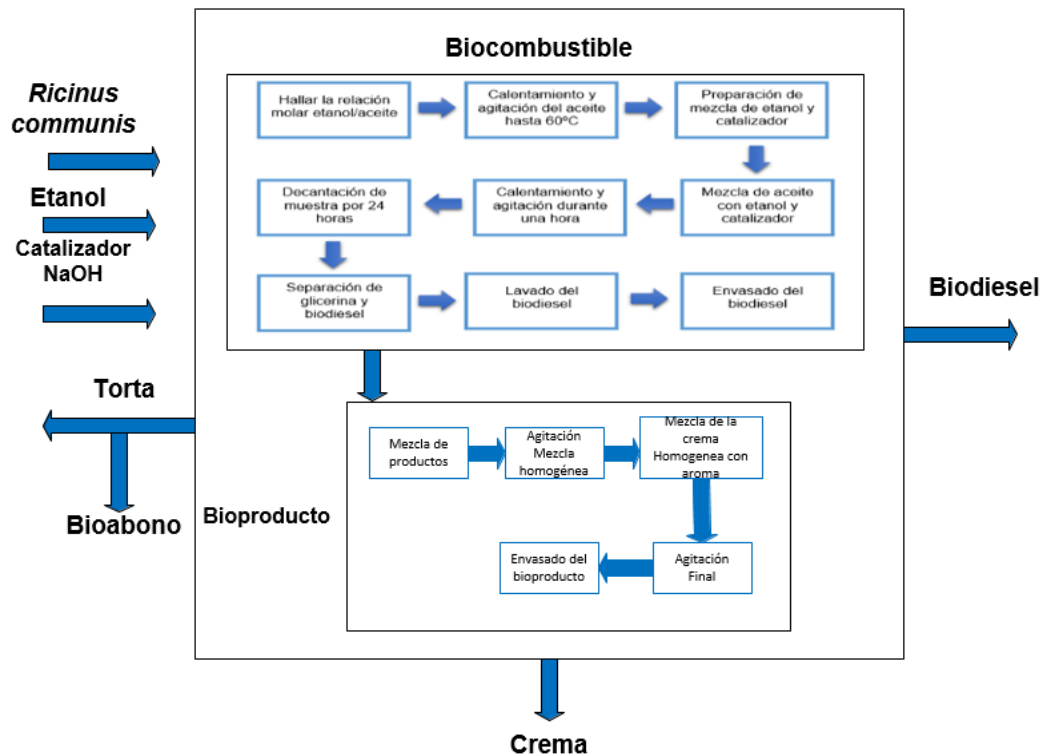


Figura 49 Diagrama de la biorrefinería a emplear en el bioproceso de producción de Biodiesel y residuos
Fuente: Elaboración propia

8.5. OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE CUMPLIDOS

Teniendo en cuenta los objetivos del desarrollo sostenible y el propósito de este proyecto, se analizaron los 17 objetivos para saber a cuáles de estos la ejecución del trabajo aplicaba, encontrando así que si se intensifica el uso de este biodiesel se cumplen los objetivos mostrados en la figura 50 y a continuación descritos objetivos:

- Poner fin al hambre, conseguir la seguridad alimentaria y una mejor nutrición, y promover la agricultura sostenible. Por ser la higuera una planta que no compite en la cadena alimenticia por su grado toxicidad y al crear biorrefinería, uno de los residuos de esta semilla que es la torta o cáscara se puede emplear como bioabono.
- Garantizar la disponibilidad y la gestión sostenible del agua y el saneamiento para todos. La higuera no requiere de un riego constante para su crecimiento, de hecho, se debe omitir el riego en un transcurso de tiempo para garantizar cosecha, aparte de la recuperación de suelos que esta planta por sus características cumple.
- Asegurar el acceso a energías asequibles, fiables, sostenibles y modernas para todos. Este tipo de biodiesel es a partir de biomasa, que es un tipo de energía renovable.
- Garantizar las pautas de consumo y de producción sostenibles
- Tomar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos. Al intensificar el uso de energías renovables, se deja a un lado la explotación de recursos limitados y se brinda oportunidad de disminuir la huella de carbono
- Proteger, restaurar y promover la utilización sostenible de los ecosistemas terrestres, gestionar de manera sostenible los bosques, combatir la desertificación y detener y revertir la degradación de la tierra, y frenar la pérdida de diversidad biológica. La planta de *Ricinus communis* crece en cualquier suelo, en Colombia, se trata este tipo de planta como maleza, esto quiere decir que se adapta fácilmente a terrenos y los ayuda y recuperar minerales.

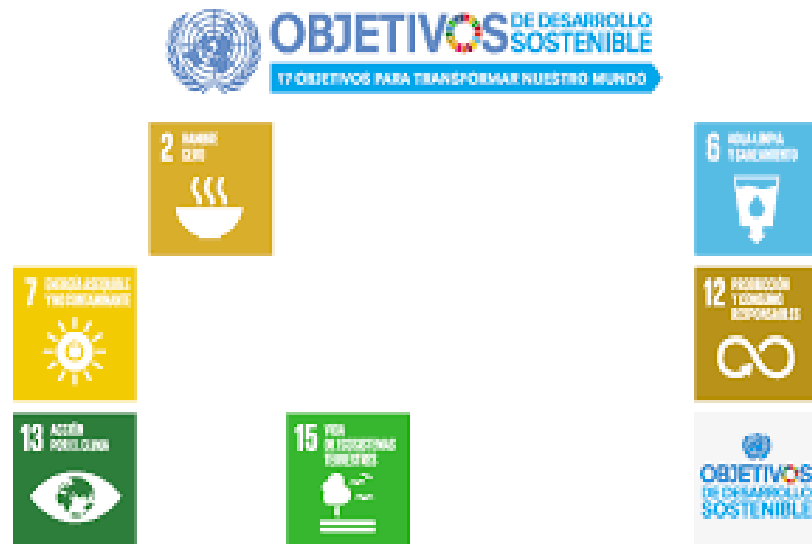


Figura 50 ODS cumplidos en nuestro proyecto
Fuente: Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo- Adaptado por autoras

9. CONCLUSIONES

1. Se logró extraer 3045mL de aceite de higuera (*Ricinus communis*) a 7134.58gr de semilla mediante extracción mecánica por medio de una prensa.
2. Se realizó el proceso de caracterización físico-químico del aceite de higuera teniendo en cuenta la NTC 947-1, cumpliendo los rangos allí especificados.
3. Se logró la producción de biodiesel mediante el proceso de transesterificación y se realizó la caracterización físico-químico del mismo mediante la norma NTC 5444 donde se especifican los rangos de biodiesel.
4. Se logró la realización de la crema producto de uno de los residuos del proceso de transesterificación del biodiesel, cuenta con características hidratantes para la piel, esto debido a las propiedades de los ingredientes utilizados en su elaboración
5. Se cumplen con 6 de los 17 objetivos de desarrollo sostenible propuestos en el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo en el 2015.
6. En la simulación realizada en el Aspen Hysys V10, se tuvo en cuenta la etapa de producción de biodiesel a partir de higuera por la reacción de transesterificación. Esta simulación mostró que, a una mayor concentración de alcohol 12:1 el rendimiento de la reacción se verá afectado positivamente, aumentando la producción de biodiesel y disminuyendo la formación de jabones.
7. Se llevó a cabo el diseño conceptual de una biorrefinería para la obtención de biodiesel y co-producto.

10. RECOMENDACIONES

1. Intensificar la investigación en la planta para estudiar más a fondo sus características físicoquímicas y sus beneficios.
2. Intensificar la siembra de la planta para usar su aceite en la producción de biodiesel
3. Intensificar el uso de la cáscara o torta producto de la extracción del aceite para la creación de bioabono, permitiendo así una ayuda extra en la agroindustria.
4. Se sugiere hacer uso de la glicerina para uso comercial en industrias de cosmetología o de limpieza.
5. Investigar el uso de la planta de higuera en los sistemas agroforestales pecuarios.
6. Se sugiere un testeo de aproximadamente 6 meses para comprobar propiedades del co-producto.

11. BIBLIOGRAFÍA

- [1] A. Benavides and P. Benjumea, "El biodiesel de aceite de higuera como combustible alternativo para motores diesel," *Dyna*, vol. 74, no. 153, pp. 141–150, 2007.
- [2] A. F. R. González and E. G. G. H. G. T. Castañeda, "Variables de operación en el proceso de transesterificación de aceites vegetales: una revisión - catálisis química," 2009. [Online]. Available: file:///D:/Downloads/15177-129991-1-PB.html.
- [3] A. J. Perez Cortes and K. J. Dumar Oyola, "ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA PARA LA PRODUCCIÓN DE BIODIESEL A PARTIR DE ACEITE DE HIGUERILLA Y ETANOL," 2011.
- [4] G. Hincapié, A. Moreno, and D. López, "Transesterificación de aceite de higuera crudo utilizando catalizadores heterogéneos - estudio preliminar," *DYNA*, vol. 78, no. 169, 2011.
- [5] O. Gaona, "Comportamiento ecofisiológico de variedades de higuera (*Ricinus communis* L.) para la producción sostenible de aceite y biodiesel en diferentes agroecosistemas," *Core.Kmi.Open.Ac.Uk*, p. 137, 2012.
- [6] J. A. Alfonso Alvarez, "Obtención de biodiesel a partir de aceites usados en casa habitación de la comunidad del Refugio," p. 78, 2013.
- [7] A. C. Les, "Aprovechamiento De Residuos Agroindustriales Como Biocombustible Y Biorefinería Utilization of Agroindustriales Residues As Biofuels and Biorefinery Utilisation Des Residus," vol. 12, no. 2, pp. 10–19, 2014.
- [8] M. ESQUIVEL ROJAS and J. E. SANTANDER GOMEZ, "SÍNTESIS DE BIODIESEL A PARTIR DE HIGUERILLA (*RICINUS COMMUNIS*) Y ANÁLISIS DE SU CICLO DE VIDA," 2018.
- [9] I. En and M. Automotriz, "Universidad técnica del norte," 2018.
- [10] "Energías renovables," 2018.
- [11] "CUIDEMOS EL PLANETA," 2018. [Online]. Available: <https://cuidemoselplaneta.org/energias-renovables/>.
- [12] "ECOLOGÍA HOY." [Online]. Available: <https://www.ecologiahoj.com/biomasa>.
- [13] "TIENDA DE BIOMASA." [Online]. Available: <https://tiendabiomasa.com/biomasa>.
- [14] R. Machado, J. Suárez, and M. Alfonso, "Caracterización morfológica y agroproductiva de procedencias de *Ricinus communis* L. para la producción de aceite Morphological and agroproductive characterization of *Ricinus communis* L. provenances for oil production," *Pastos y Forrajes*, vol. 35, no. 4, pp. 381–392, 2012.
- [15] R. A. Carrales R La José L Marrugo N Químico Jorge L Abril Castro La, "Rendimientos en semilla y calidad de los aceites del cultivo de Higuera."
- [16] I. Sánchez and K. Huertas, "Obtención y caracterización de biodiesel a partir de aceite de semilla," p. 152, 2012.
- [17] N. Kaushik, K. Kumar, and S. Kumar, "Potential of *Jatropha curcas* for Biofuels," *J. Biobased Mater. Bioenergy*, vol. 1, no. 3, pp. 301–314, 2008.

- [18] C. Molina, "La hora del biodiesel," 52, pp. 15–18.
- [19] J. W. HILL and D. K. KOLB, *Química del nuevo milenio*. 1999.
- [20] T. N. J. García-cota, V. M. De Cruz-gonzalez, and O. Sanchez-daza, "Purificación de biodiesel obtenido de aceite de ricinus," *Superf. y vacío*, vol. 22, no. 3, pp. 20–23, 2009.
- [21] P. C. ; R. Ramakumar, "An approach to quantify the technical benefits of distributed generation Publisher: IEEE."
- [22] E. E. Silva Lora, J. C. Escobar Palacio, J. A. García Núñez, and J. C. . Barrera Hernandez, "Bioenergía y biorrefinerías para caña de azúcar y palma de aceite*," *Palmas*, vol. 37, no. Especial Tomo II, pp. 290–294, 2016.
- [23] B. Kamm and M. Kamm, "Principles of biorefineries," *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, vol. 64, no. 2, pp. 137–145, 2004.
- [24] "TRANSFORMING ENERGY," 2008. [Online]. Available: <https://www.nrel.gov/biomass/>.
- [25] L. C. Meher, D. Vidya Sagar, and S. N. Naik, "Technical aspects of biodiesel production by transesterification—a review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 10, no. 3, pp. 248–268, Jun. 2006.
- [26] A. A. Apostolakou, I. K. Kookos, C. Marazioti, and K. C. Angelopoulos, "Techno-economic analysis of a biodiesel production process from vegetable oils," *Fuel Process. Technol.*, vol. 90, no. 7–8, pp. 1023–1031, Jul. 2009.
- [27] B. O. D. Costa, M. L. Pisarello, and C. a Querini, "Procesos de Producción de Biodiesel : Uso de Materias Primas Alternativas y de Alta Acidez," 2005.
- [28] B. K. Barnwal and M. P. Sharma, "Prospects of biodiesel production from vegetable oils in India," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 9, no. 4, pp. 363–378, Aug. 2005.
- [29] M. Balat and H. Balat, "A critical review of bio-diesel as a vehicular fuel," *Energy Convers. Manag.*, vol. 49, no. 10, pp. 2727–2741, Oct. 2008.
- [30] I. M. Atadashi, M. K. Aroua, and A. A. Aziz, "Biodiesel separation and purification: A review," *Renew. Energy*, vol. 36, no. 2, pp. 437–443, Feb. 2011.
- [31] A. P. Tetraplóide, "Oro Verde ®," vol. 55, no. 18, pp. 6571–6572, 2009.
- [32] OCDE-FAO, "BIOCOMBUSTIBLES," 2017.
- [33] P. M. NATALIA and J. URIBE MORON, "DETERMINACIÓN DE LAS CONDICIONES ÓPTIMAS PARA LA PRODUCCIÓN DE BIODIESEL A PARTIR DE ACEITE DE HIGUERILLA (*Ricinus Communis*) Y ACEITE DE PALMA MIL PESOS (*Oenocarpus bataua*)," 2008.
- [34] UPME, "PLAN INDICATIVO DE ABASTECIMIENTO DE COMBUSTIBLES LIQUIDOS," 2012.
- [35] "LENNTech." [Online]. Available: <https://www.lenntech.es/ph-y-alcalinidad.htm#ixzz63DT1UC5U>.
- [36] "laboratorio quimico." [Online]. Available:

<https://www.tplaboratorioquimico.com/laboratorio-quimico/procedimientos-basicos-de-laboratorio/que-es-la-cromatografia.html>.

- [37] “Agencia de noticias UN,” 2008. [Online]. Available: http://historico.agenciadenoticias.unal.edu.co/articulos/ciencia_tecnologia/ciencia_tecnologia_20080514_biodisel.html.
- [38] P. Rodero and M. Rado, “Semana SOSTENIBLE,” 2007. [Online]. Available: <https://sostenibilidad.semana.com/medio-ambiente/articulo/palma-aceitera-y-su-cultivo-seca-a-los-montes-de-maria-en-bolivar/37966>.
- [39] D. E. RODRIGUEZ ARIAS and J. S. DUQUE NIETO, “PLAN DE NEGOCIOS PARA EL CULTIVO DE HIGUERILLA, ESTUDIO DE CASO MUNICIPIO DE BALBOA (RISARALDA,” 2010.

ANEXOS

ANEXO A Análisis de resultados diseño de experimentos

Paso 5: Analizar los resultados del experimento

Tabla 377. Análisis de los resultados de los experimentos
Fuente: Elaboración propia

<i>Modelo</i>	<i>Viscosidad</i>	<i>densidad</i>	<i>Índice de Acidez</i>	<i>pH</i>	<i>% Rendimiento</i>
Transformación	ninguno	ninguno	ninguno	ninguno	ninguno
Modelo d.f.	6	6	6	6	6
P-valor	0,7341	0,4169	0,8415	0,4350	0,3137
Error d.f.	1	1	1	1	1
Stnd. error	0,26163	0,002474 87	1,47449	0,59043 4	6,36396
R-cuadrado	79,95	94,53	69,83	94,00	97,00
Adj. R-cuadrado	0,00	61,68	0,00	57,98	79,03

Se especificaron 5 variables respuesta y 3 factores experimentales. El diseño seleccionado tuvo 8 ejecuciones, con 1 una muestra para ser tomada en cada ejecución. El modelo por defecto es Interacciones de 2 factores con 7 coeficientes.

Los modelos estadísticos se ajustaron a las variables de respuesta. Modelos con P-valores por debajo de 0,05, de los cuales habían 0, indicaron que el modelo ajustado fue estadísticamente significativo al 5,0% de nivel de significación. También es interesante el estadístico R-cuadrado, el cual mostró el porcentaje de variación en la respuesta que había sido explicado por el modelo ajustado. El rango de valores de R-cuadrado varía de 69,83% a 97,00%.

Teniendo en cuenta las variables que se ajustaron, se registraron los resultados:

Las tablas 35,37,39,41 y 43 muestran las estimaciones para cada uno de los efectos estimados y las interacciones. También se muestra el error estándar de cada uno de estos efectos, el cual mide su error de muestreo. También muestra que el factor de inflación de varianza (V.I.F.) más grande, es igual a 1,0. Para un diseño perfectamente ortogonal, todos los factores serían igual a 1. Factores de 10 o más normalmente se interpretan como indicativos de confusión seria entre los efectos.

Tabla 388 . Efectos estimados para Viscosidad (cPs)
Fuente: Elaboración propia de autoras

Efecto	Estimado	Error Estd.	V.I.F.
promedio	55,51	0,0925	
A: Relación Molar Alcohol/Aceite	0,095	0,185	1,0
B:% Catalizador	0,1	0,185	1,0
C:Temperatura	-0,27	0,185	1,0
AB	0,155	0,185	1,0
AC	-0,125	0,185	1,0
BC	-0,07	0,185	1,0

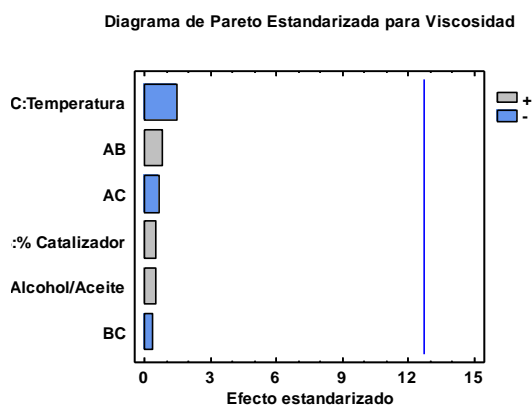


Figura 51 Diagrama de Pareto Estandarizada para Viscosidad
Fuente: Statgraphics centurión XVI

La tabla 36 ANOVA distribuye la variabilidad de la Viscosidad en piezas separadas para cada uno de los efectos. entonces prueba la significancia estadística de cada efecto comparando su cuadrado medio contra un estimado del error experimental. En este caso, 0 efectos tienen una valor-P menor que 0,05, indicando que son significativamente diferentes de cero con un nivel de confianza del 95,0%.

El estadístico es el coeficiente de determinación denominado R2 ó R cuadrado, tiene como propósito predecir resultados futuros y probar una hipótesis

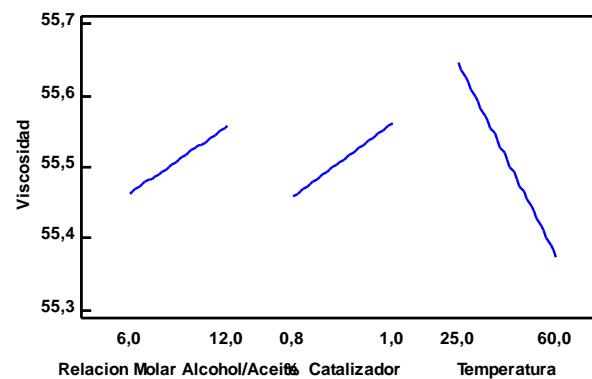
El estadístico R-Cuadrado indica que el modelo, así ajustado, explica 79,9502% de la variabilidad en Viscosidad. El estadístico R-cuadrado ajustada, que es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 0,0%. El error estándar del estimado muestra que la desviación

estándar de los residuos es 0,26163. El error medio absoluto (MAE) de 0,0925 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) prueba los residuos para determinar si haya alguna correlación significativa basada en el orden en que se presentan los datos en el archivo.

Tabla 399. Análisis de Varianza para Viscosidad
Fuente: Elaboración propia

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A: Relación Molar Alcohol/Aceite	0,01805	1	0,01805	0,26	0,6980
B:% Catalizador	0,02	1	0,02	0,29	0,6845
C:Temperatura	0,1458	1	0,1458	2,13	0,3824
AB	0,04805	1	0,04805	0,70	0,5560
AC	0,03125	1	0,03125	0,46	0,6217
BC	0,0098	1	0,0098	0,14	0,7697
Error total	0,06845	1	0,06845		
Total (corr.)	0,3414	7			

Gráfica de Efectos Principales para Viscosidad



Grafica 1. Efectos principales para la viscosidad
Fuente: Statgraphics centurión XVI

Tabla 40. Efectos estimados para densidad (kg/m3)
Fuente: Elaboración propia

Efecto	Estimado	Error Estd.	V.I.F.
promedio	0,922375	0,000875	

A: Relación Molar Alcohol/Aceite	-0,00175	0,00175	1,0
B:% Catalizador	-0,00025	0,00175	1,0
C: Temperatura	0,00275	0,00175	1,0
AB	0,00625	0,00175	1,0
AC	0,00125	0,00175	1,0
BC	-0,00125	0,00175	1,0

Errores estándar basados en el error total con 1 g.l.

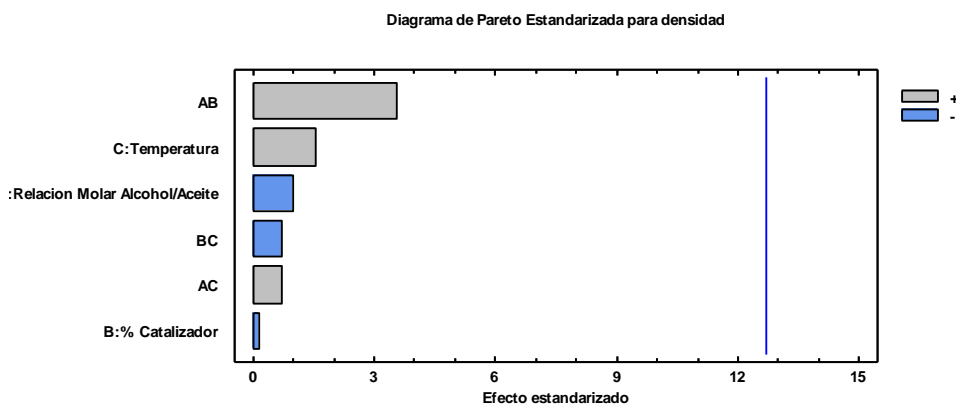


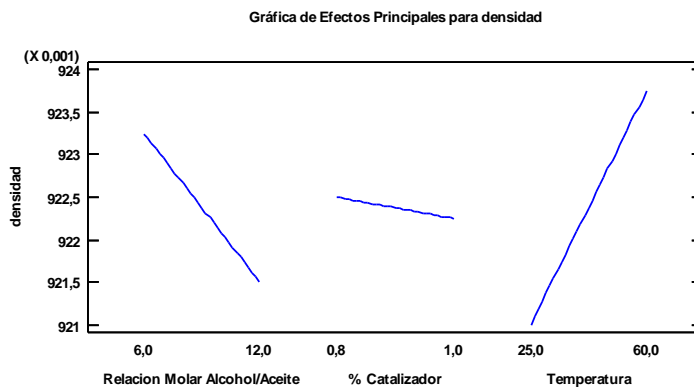
Figura 52 Diagrama de Pareto estandarizado para la densidad
Fuente: Statgraphics centurión XVI

La tabla ANOVA particiona la variabilidad de densidad en piezas separadas para cada uno de los efectos. entonces prueba la significancia estadística de cada efecto comparando su cuadrado medio contra un estimado del error experimental. En este caso, 0 efectos tienen un valor-P menor que 0,05, indicando que son significativamente diferentes de cero con un nivel de confianza del 95,0%.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo, así ajustado, explica 94,5251% de la variabilidad en densidad. El estadístico R-cuadrada ajustada, que es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 61,676%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 0,00247487. El error medio absoluto (MAE) de 0,000875 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) prueba los residuos para determinar si haya alguna correlación significativa basada en el orden en que se presentan los datos en el archivo.

Tabla 41. Análisis de Varianza para densidad
Fuente: Elaboración propia

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A: Relación Molar Alcohol/Aceite	0,000006125	1	0,000006125	1,00	0,5000
B:% Catalizador	1,25E-7	1	1,25E-7	0,02	0,9097
C: Temperatura	0,000015125	1	0,000015125	2,47	0,3608
AB	0,000078125	1	0,000078125	12,76	0,1738
AC	0,000003125	1	0,000003125	0,51	0,6051
BC	0,000003125	1	0,000003125	0,51	0,6051
Error total	0,000006125	1	0,000006125		
Total (corr.)	0,000111875	7			



Grafica 2. Graficas de efectos principales para densidad
Fuente: Statgraphics centurión XVI

Tabla 422 .Efectos estimados para Índice de Acidez
Fuente: Elaboración propia

Efecto	Estimado	Error Estd.	V.I.F.
promedio	9,91368	0,521312	
A: Relación Molar Alcohol/Aceite	-0,878975	1,04262	1,0
B:% Catalizador	0,183815	1,04262	1,0
C: Temperatura	-0,518515	1,04262	1,0
AB	0,238275	1,04262	1,0
AC	0,849625	1,04262	1,0
BC	0,813635	1,04262	1,0

Errores estándar basados en el error total con 1 g.l.

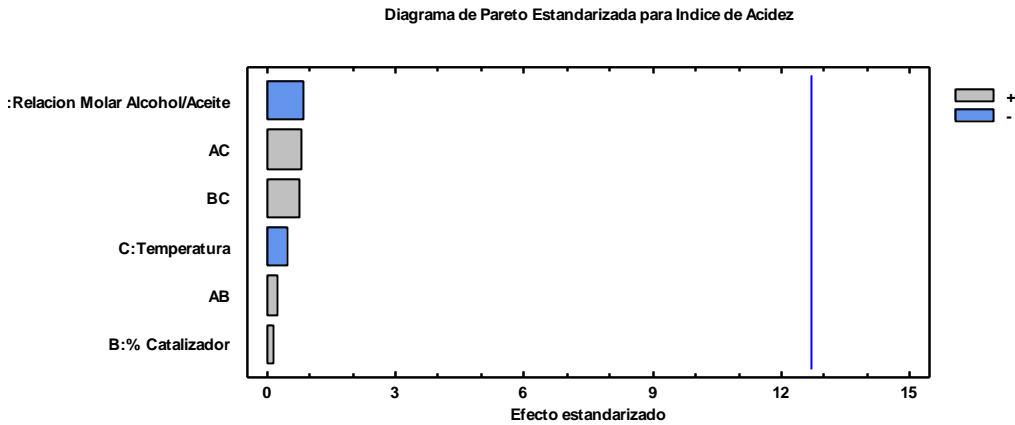


Figura 53 Diagrama de Pareto estandarizada para índice de acidez
Fuente: Statgraphics centurión XVI

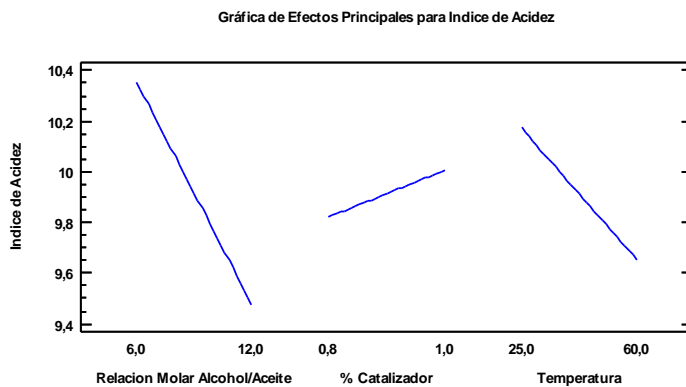
La tabla ANOVA particiona la variabilidad de Índice de Acidez en piezas separadas para cada uno de los efectos. entonces prueba la significancia estadística de cada efecto comparando su cuadrado medio contra un estimado del error experimental. En este caso, 0 efectos tienen un valor-P menor que 0,05, indicando que son significativamente diferentes de cero con un nivel de confianza del 95,0%.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo, así ajustado, explica 69,8284% de la variabilidad en Índice de Acidez. El estadístico R-cuadrada ajustada, que es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 0,0%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 1,47449. El error medio absoluto (MAE) de 0,521313 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) prueba los residuos para determinar si haya alguna correlación significativa basada en el orden en que se presentan los datos en el archivo.

Tabla 433. Análisis de Varianza para Índice de Acidez
Fuente: Elaboración propia

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
A: Relación Molar Alcohol/Aceite	1,54519	1	1,54519	0,71	0,5541
B: % Catalizador	0,0675759	1	0,0675759	0,03	0,8889

C: Temperatura	0,537716	1	0,537716	0,25	0,7062
AB	0,11355	1	0,11355	0,05	0,8570
AC	1,44373	1	1,44373	0,66	0,5647
BC	1,324	1	1,324	0,61	0,5781
Error total	2,17413	1	2,17413		
Total (corr.)	7,2059	7			



Grafica 3. Efectos principales para índice de acidez
Fuente: Statgraphics centurión XVI

Tabla 444 Efectos estimados para pH
Fuente: Elaboración propia

<i>Efecto</i>	<i>Estimado</i>	<i>Error Estd.</i>	<i>V.I.F.</i>
promedio	9,10625	0,20875	
A: Relación Molar Alcohol/Aceite	-1,1875	0,4175	1,0
B:% Catalizador	0,7575	0,4175	1,0
C: Temperatura	-0,1425	0,4175	1,0
AB	0,7075	0,4175	1,0
AC	-0,3425	0,4175	1,0
BC	-0,3275	0,4175	1,0

Errores estándar basados en el error total con 1 g.l.

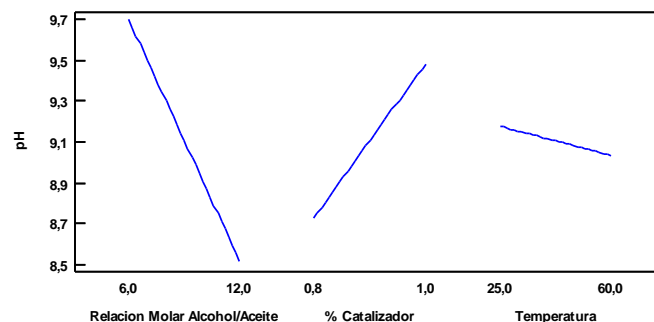
La tabla ANOVA divide la variabilidad de pH en piezas separadas para cada uno de los efectos. entonces prueba la significancia estadística de cada efecto comparando su cuadrado medio contra un estimado del error experimental. En este caso, 0 efectos tienen una valor-P menor que 0,05, indicando que son significativamente diferentes de cero con un nivel de confianza del 95,0%.

El estadístico R-Cuadrado indica que el modelo, así ajustado, explica 93,9971% de la variabilidad en pH. El estadístico R-cuadrado ajustado, que es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 57,9796%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 0,590434. El error medio absoluto (MAE) de 0,20875 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) prueba los residuos para determinar si haya alguna correlación significativa basada en el orden en que se presentan los datos en el archivo.

*Tabla 455. Análisis de Varianza para pH
Fuente: Elaboración propia*

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
A:Relacion Molar Alcohol/Aceite	2,82031	1	2,82031	8,09	0,2152
B:% Catalizador	1,14761	1	1,14761	3,29	0,3207
C:Temperatura	0,0406125	1	0,0406125	0,12	0,7906
AB	1,00111	1	1,00111	2,87	0,3394
AC	0,234612	1	0,234612	0,67	0,5626
BC	0,214513	1	0,214513	0,62	0,5765
Error total	0,348613	1	0,348613		
Total (corr.)	5,80739	7			

Gráfica de Efectos Principales para pH

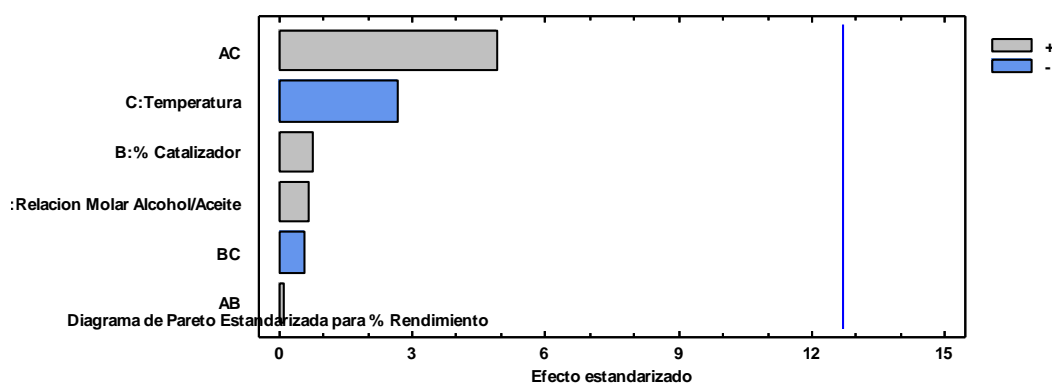


*Gráfica 4. Efectos principales para pH
Fuente: Statgraphics centurión XVI*

Tabla 466. Efectos estimados para % Rendimiento
Fuente: Elaboración propia

Efecto	Estimado	Error Estd.	V.I.F.
promedio	44,0	2,25	
A:Relacion Molar Alcohol/Aceite	3,0	4,5	1,0
B:% Catalizador	3,5	4,5	1,0
C:Temperatura	-12,0	4,5	1,0
AB	0,5	4,5	1,0
AC	22,0	4,5	1,0
BC	-2,5	4,5	1,0

Errores estándar basados en el error total con 1 g.l.



Grafica 5 . Diagrama de Pareto estandarizada para % de rendimiento
Fuente: Statgraphics centurión XVI

La tabla ANOVA divide la variabilidad de % Rendimiento en piezas separadas para cada uno de los efectos. entonces prueba la significancia estadística de cada efecto comparando su cuadrado medio contra un estimado del error experimental. En este caso, 0 efectos tienen una valor-P menor que 0,05, indicando que son significativamente diferentes de cero con un nivel de confianza del 95,0%.

El estadístico R-Cuadrado indicó que el modelo, así ajustado, explica 97,0044% de la variabilidad en % Rendimiento. El estadístico R-cuadrado ajustado, que es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 79,0311%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 6,36396. El error medio absoluto (MAE) de 2,25 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) prueba los residuos para determinar si haya alguna correlación significativa basada en el orden en que se presentan los datos en el archivo.

Tabla 477. Análisis de Varianza para % Rendimiento
Fuente: Elaboración propia

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
A:Relacion Molar Alcohol/Aceite	18,0	1	18,0	0,44	0,6257
B:% Catalizador	24,5	1	24,5	0,60	0,5792
C:Temperatura	288,0	1	288,0	7,11	0,2284
AB	0,5	1	0,5	0,01	0,9296
AC	968,0	1	968,0	23,90	0,1284
BC	12,5	1	12,5	0,31	0,6772
Error total	40,5	1	40,5		
Total (corr.)	1352,0	7			

Teniendo en cuenta el diseño de experimentos y su respectivo análisis la opción acertada para la producción de biodiesel fue una relación Alcohol/Aceite de 12:1 con un porcentaje de catalizador NaOH del 0.8% respecto al peso del aceite lo que equivale a 1,5gr de catalizador

ANEXO B Equipos utilizados para la Simulación

A continuación, se muestra las condiciones de operación para cada uno de los equipos utilizados en la simulación del proceso de producción de biodiesel.

*Tabla 488. Mezclador MIX-100 usado en la simulación
Fuente: Elaboración propia a partir de Aspen Hysys 2010*

MIX-100		
Product Molar Flow	1.229e+004	kgmole/h
Product Mass Flow	6.547e+005	kg/h
Product Volume Flow	776.3	m3/h
Product Temperature	24.00	C
Product Pressure	250.0	kPa
Equalize Pressures	No	

*Tabla 499. Reactor CSTR-100 usado en la simulación
Fuente: Elaboración propia a partir de Aspen Hysys 2010*

CSTR-100		
Vessel Temperature	106.1	C
Vessel Pressure	250.0	kPa
Vapour Molar Flow	683.9	kgmole/h
Liquid Molar Flow	1.183e+004	kgmole/h
Heat Flow	0.0000	kW

*Tabla 50. Separador de 3 fases V-100 usado en la simulación
Fuente: Elaboración propia a partir de Aspen Hysys 2010*

V-100		
Separator Type	Three Phase	
Vessel Temperature	250.0	C
Vessel Pressure	250.0	kPa
Vapour Molar Flow	1.165e+004	kgmole/h
Liquid Molar Flow	183.0	kgmole/h
Duty	0.0000	kW

*Tabla 51. Torre de Absorción T-100 usado en la simulación
Fuente: Elaboración propia a partir de Aspen Hysys 2010*

T-100		
Convergence	Converged	
Number of Trays	10.00	


*Tabla 52 Separador V-101 usado en la simulación
Fuente: Elaboración propia a partir de Aspen Hysys 2010*

V-101		
Separator Type	Separator	
Vessel Temperature	113.0	C
Vessel Pressure	250.0	kPa
Liquid Molar Flow	2730	kgmole/h
Duty	0.0000	kW

*Tabla 533 Torre de Absorción T-101 usado en la simulación
Fuente: Elaboración propia a partir de Aspen Hysys 2010*


T-101		
Convergence	Converged	
Number of Trays	10.00	


ANEXO C 50 ton/año Reporte de reacción de HYSYS

1	 Company Name Not Available Bedford, MA USA		Case Name: simulación 1.0 50 ton.hsc	
2			Unit Set: NewUser7	
3			Date/Time: Fri Nov 15 08:26:48 2019	
4				
5				
6				
7	Cont. Stirred Tank Reactor: CSTR-100			
8				
9	CONNECTIONS			
10				
11	Inlet Stream Connections			
12				
13	Stream Name	From Unit Operation		
14	2	Heater		E-100
15				
16	Outlet Stream Connections			
17				
18	Stream Name	To Unit Operation		
19	5	Cooler:		E-103
20	3	Cooler:		E-101
21				
22	PARAMETERS			
23	Physical Parameters		Optional Heat Transfer	
24	Delta P	Vessel Volume	Duty	Energy Stream
25	0.0000 kPa	21.00 m3	0.0000 kW	
26				
27	User Variables			
28				
29	REACTION DETAILS			
30	Reaction: Rxn-1			
31	Component	Mole Weight	Stoichiometric Coeff.	
32	Triricinoleina*	932.0	-1 *	
33	Ethanol	46.07	-1 *	
34	Glycerol	92.10	7 *	
35	Etil recinoleato*	296.0	1 *	
36				
37	REACTION RESULTS FOR : Set-1			
38				
39	Extents			
40		Act. % Conv.	Base Comp.	Rxn Extent
41	Rxn-1	66.54	Triricinoleina*	9.916e-003
42				
43	Balance			
44		Total Inflow	Total Rxn	Total Outflow
45	H2O	9.498e-007	1.694e-021	9.498e-007
46	Triricinoleina*	1.490e-002	-9.916e-003	4.986e-003
47	Etil recinoleato*	7.281e-003	9.916e-003	1.720e-002
48	Ethanol	3.145	-9.916e-003	3.135
49	Glycerol	0.2130	7.344e-002	0.2864
50	NaOH	3.264e-002	0.0000	3.264e-002
51	n-Hexane	0.0000	0.0000	0.0000
52				
53	RATING			
54				
55	Sizing			
56				
57	Cylinder	Vertical	Reactor has a Boot: No	
58	Volume	21.00 m3 *	Diameter	2.612 m
59			Height	3.918
60				
61	Nozzles			
62	Base Elevation Relative to Ground Level	0.0000 m *	Diameter	2.612 m
63		2	5	3
64				
65	Aspen Technology Inc.		Aspen HYSYS Version 10	


Licensed to: Company Name Not Available

* Specified by user.


1	 Company Name Not Available Bedford, MA USA		Case Name: simulación 1.0 50 ton.hsc		
2			Unit Set: NewUser7		
3			Date/Time: Fri Nov 15 08:26:48 2019		
4					
5					
6	Cont. Stirred Tank Reactor: CSTR-100 (continued)				
7					
8					
9	Diameter	(m)	0.1959	0.1959	0.1959
10	Elevation (Base)	(m)	1.959	3.918	0.0000
11	Elevation (Ground)	(m)	1.959	3.918	0.0000
12	Elevation (% of Height)	(%)	50.00	100.00	0.00
13	CONDITIONS				
14					
15	Name		2	3	5
16	Vapour		0.0000	0.0000	1.0000
17	Temperature	(C)	60.0000	106.1219	106.1219
18	Pressure	(kPa)	250.0000	250.0000	250.0000
19	Molar Flow	(kgmole/h)	12286.7474	11831.5004	683.9355
20	Mass Flow	(kg/h)	654700.0005	623123.2475	31576.7558
21	Std Ideal Liq Vol Flow	(m3/h)	776.2711	730.5865	39.6618
22	Molar Enthalpy	(kJ/kgmole)	-3.027e+005	-3.011e+005	-2.293e+005
23	Molar Entropy	(kJ/kgmole-C)	65.94	99.86	167.9
24	Heat Flow	(kW)	-1.0331e+06	-9.8953e+05	-4.3556e+04
25	PROPERTIES				
26					
27	Name		2	3	5
28	Molecular Weight		53.29	52.67	46.17
29	Molar Density	(kgmole/m3)	14.48	13.64	7.928e-002
30	Mass Density	(kg/m3)	771.7	718.5	3.660
31	Act. Volume Flow	(m3/h)	848.4	867.2	8627
32	Mass Enthalpy	(kJ/kg)	-5681	-5717	-4966
33	Mass Entropy	(kJ/kg-C)	1.238	1.896	3.636
34	Heat Capacity	(kJ/kgmole-C)	172.5	185.0	78.49
35	Mass Heat Capacity	(kJ/kg-C)	3.238	3.513	1.700
36	LHV Molar Basis (Std)	(kJ/kgmole)	---	---	---
37	HHV Molar Basis (Std)	(kJ/kgmole)	---	---	---
38	HHV Mass Basis (Std)	(kJ/kg)	---	---	---
39	CO2 Loading		---	---	---
40	CO2 Apparent Mole Conc.	(kgmole/m3)	---	---	---
41	CO2 Apparent Wt. Conc.	(kgmol/kg)	---	---	---
42	LHV Mass Basis (Std)	(kJ/kg)	---	---	---
43	Phase Fraction [Vol. Basis]		0.0000	---	1.000
44	Phase Fraction [Mass Basis]		0.0000	0.0000	1.000
45	Phase Fraction [Act. Vol. Basis]		0.0000	0.0000	1.000
46	Mass Exergy	(kJ/kg)	-125.9	-195.9	63.54
47	Partial Pressure of CO2	(kPa)	0.0000	0.0000	0.0000
48	Cost Based on Flow	(Cost/s)	0.0000	0.0000	0.0000
49	Act. Gas Flow	(ACT_m3/h)	---	---	8627
50	Avg. Liq. Density	(kgmole/m3)	15.83	16.19	17.24
51	Specific Heat	(kJ/kgmole-C)	172.5	185.0	78.49
52	Std. Gas Flow	(STD_m3/h)	2.905e+005	2.797e+005	1.617e+004
53	Std. Ideal Liq. Mass Density	(kg/m3)	843.4	852.9	796.2
54	Act. Liq. Flow	(m3/s)	0.2357	0.2409	---
55	Z Factor		---	---	---
56	Watson K		10.45	10.32	10.76
57	User Property		---	---	---
58	Partial Pressure of H2S	(kPa)	0.0000	0.0000	0.0000
59	Cp/(Cp - R)		1.051	1.047	1.118
60	Cp/Cv		1.105	1.120	1.118
61	Ideal Gas Cp/Cv		1.112	1.103	1.118
62	Ideal Gas Cp	(kJ/kgmole-C)	82.29	88.66	78.49
63	Aspen Technology Inc.		Aspen HYSYS Version 10		Page 2 of 3

1	 Company Name Not Available Bedford, MA USA		Case Name: simulación 1.0 50 ton.hsc	
2			Unit Set: NewUser7	
3			Date/Time: Fri Nov 15 08:26:48 2019	
4				
5				
6	Cont. Stirred Tank Reactor: CSTR-100 (continued)			
7				
8	PROPERTIES			
9				
10				
11	Name	2	3	5
12	Mass Ideal Gas Cp (kJ/kg-C)	1.544	1.683	1.700
13	Heat of Vap. (kJ/kgmole)	3.457e+005	---	3.624e+004
14	Kinematic Viscosity (cSt)	0.9293	0.7013	2.163
15	Liq. Mass Density (Std. Cond) (kg/m3)	813.3	807.5	796.5
16	Liq. Vol. Flow (Std. Cond) (m3/h)	805.0	771.7	39.65
17	Liquid Fraction	1.000	1.000	0.0000
18	Molar Volume (m3/kgmole)	6.905e-002	7.330e-002	12.61
19	Mass Heat of Vap. (kJ/kg)	6488	---	785.0
20	Phase Fraction (Molar Basis)	0.0000	0.0000	1.0000
21	Surface Tension (dyne/cm)	---	695.4	---
22	Thermal Conductivity (W/m-K)	0.1486	0.1331	1.947e-002
23	Bubble Point Pressure (kPa)	43.73	250.0	278.0
24	Viscosity (cP)	0.9293	0.5039	7.916e-003
25	Cv (Semi-Ideal) (kJ/kgmole-C)	164.2	176.7	70.18
26	Mass Cv (Semi-Ideal) (kJ/kg-C)	3.082	3.355	1.520
27	Cv (kJ/kgmole-C)	156.2	165.1	70.18
28	Mass Cv (kJ/kg-C)	2.931	3.135	1.520
29	Cv (Ent. Method) (kJ/kgmole-C)	---	---	---
30	Mass Cv (Ent. Method) (kJ/kg-C)	---	---	---
31	Cpi/Cv (Ent. Method)	---	---	---
32	Reid VP at 37.8 C (kPa)	---	14.47	15.90
33	True VP at 37.8 C (kPa)	14.82	14.41	15.90
34	Liq. Vol. Flow - Sum(Std. Cond) (m3/h)	801.0	771.7	39.65
35	Viscosity Index	5.747	-2.116	-12.12
36				
37	DYNAMICS			
38				
39	Vessel Parameters: Initialize From Products			
40	Vessel Volume (m3)	21.00 *	Level Calculator	Vertical cylinder
41	Vessel Diameter (m)	2.612	Fraction Calculator	Use levels and nozzles
42	Vessel Height (m)	3.918	Feed Delta P (kPa)	0.0000
43	Liquid Level Percent (%)	1.00 *	Vessel Pressure (kPa)	250.0
44				
45	Holdup: Vessel Levels			
46	Phase	Level (m)	Percent (%)	Volume (m3)
47	Vapour	---	---	0.0000
48	Liquid	---	---	0.0000
49	Aqueous	---	---	0.0000
50				
51	Holdup: Details			
52	Phase	Accumulation (kgmole/h)	Moles (kgmole)	Volume (m3)
53	Vapour	0.0000	0.0000	0.0000
54	Liquid	0.0000	0.0000	0.0000
55	Aqueous	0.0000	0.0000	0.0000
56	Total	0.0000	0.0000	0.0000
57				
58	NOTES			
59				
60				
61				
62				
63	Aspen Technology Inc.	Aspen HYSYS Version 10	Page 3 of 3	

ANEXO D 7,135kg/h Reporte de reacción de HYSYS

1	 Company Name Not Available Bedford, MA USA		Case Name: simulación 2.0 1200 mLhac Unit Set: New/User7 Date/Time: Fri Nov 15 18:25:18 2019	
2				
3				
4				
5				
6				
7	Cont. Stirred Tank Reactor: CSTR-100			
8				
9	CONNECTIONS			
10				
11	Inlet Stream Connections			
12				
13	Stream Name	From Unit Operation		
14	2	Heater	E-100	
15	Outlet Stream Connections			
16				
17	Stream Name	To Unit Operation		
18	5	Cooler:	E-103	
19	3	Cooler:	E-101	
20				
21	PARAMETERS			
22	Physical Parameters		Optional Heat Transfer	
23	Delta P	Vessel Volume	Duty	Energy Stream
24	0.0000 kPa	5.000e-004 m ³	0.0000 kW	
25	User Variables			
26				
27	REACTION DETAILS			
28				
29	Reaction: Rxn-1			
30	Component	Mole Weight	Stoichiometric Coeff.	
31	Trinitrochloroethane*	932.0	-1 *	
32	Ethanol	46.07	-1 *	
33	Glycerol	92.10	7 *	
34	Ethyl nitroacetate*	296.0	1 *	
35				
36	REACTION RESULTS FOR : Set-1			
37				
38	Extents			
39				
40		Act. % Conv.	Base Comp.	Rxn Extent
41	Rxn-1	89.92	Trinitrochloroethane*	2.348e-007
42	Balance			
43				
44		Total Inflow	Total Rxn	Total Outflow
45				
46	H2O	7.733e-010	2.068e-025	7.733e-010
47	Trinitrochloroethane*	3.358e-007	-2.348e-007	1.009e-007
48	Ethyl nitroacetate*	4.198e-007	2.348e-007	8.544e-007
49	Ethanol	8.277e-005	-2.348e-007	8.253e-005
50	Glycerol	7.974e-008	1.738e-008	9.712e-008
51	NaOH	4.167e-008	-8.617e-024	4.167e-008
52	m-Heptane	0.0000	0.0000	0.0000
53				
54	RATING			
55				
56	Sizing			
57	Cylinder	Vertical	Reactor has a Boot: No	
58	Volume	5.000e-004 m ³	Diameter	7.515e-002 m
59			Height	0.1127
60	Nozzles			
61	Base Elevation Relative to Ground Level	0.0000 m	Diameter	7.515e-002 m
62			Height	0.1127
63		2	5	3
64	Aspen Technology Inc.		Aspen HYSYS Version 10	
			Page 1 of 3	

1			Case Name: simulación 2.0 1200 mL.hoc	
2	aspentech Company Name Not Available		Unit Set: NewUser7	
3	Bedford, MA		Date/Time: Fri Nov 15 10:25:15 2019	
4	USA			
5				
6	Cont. Stirred Tank Reactor: CSTR-100 (continued)			
7				
8				
9	Diameter (m)	5.000e-002	5.000e-002	5.000e-002
10	Elevation (Base) (m)	5.639e-002	0.1127	0.0000
11	Elevation (Ground) (m)	5.639e-002	0.1127	0.0000
12	Elevation (% of Height)	50.00	100.00	0.00
13	CONDITIONS			
14				
15	Name	2	3	5
16	Vapour	0.0000	0.0000	1.0000
17	Temperature (C)	60.0000 *	108.0567	108.0567
18	Pressure (kPa)	290.0000	290.0000	290.0000
19	Molar Flow (kgmole/h)	0.2575	0.2440	0.0189
20	Mass Flow (kg/h)	14.6332	13.7512	0.8820
21	Std Ideal Liq Vol Flow (m3/h)	0.0169	0.0196	0.0011
22	Molar Enthalpy (kJ/kgmole-C)	-3.259e+005	-3.259e+005	-2.295e+005
23	Molar Entropy (kJ/kgmole-C)	70.96	107.1	170.3
24	Heat Flow (kW)	-2.3296e+01	-2.2066e+01	-1.2060e+00
25	PROPERTIES			
26				
27	Name	2	3	5
28	Molecular Weight	56.02	56.36	46.55
29	Molar Density (kgmole/m3)	13.64	12.83	7.889e-002
30	Mass Density (kg/m3)	775.3	722.8	3.671
31	Act. Volume Flow (m3/h)	1.688e-002	1.903e-002	0.2402
32	Mass Enthalpy (kJ/kg)	-6731	-6762	-6031
33	Mass Entropy (kJ/kg-C)	1.249	1.901	3.658
34	Heat Capacity (kJ/kgmole-C)	179.1	192.7	79.63
35	Mass Heat Capacity (kJ/kg-C)	3.152	3.419	1.711
36	LHV Molar Basis (Std) (kJ/kgmole)	--	--	--
37	HV Molar Basis (Std) (kJ/kgmole)	--	--	--
38	HV Mass Basis (Std) (kJ/kg)	--	--	--
39	CO2 Loading	--	--	--
40	CO2 Apparent Mole Conc. (kgmole/m3)	--	--	--
41	CO2 Apparent Wt. Conc. (kgmol/kg)	--	--	--
42	LHV Mass Basis (Std) (kJ/kg)	--	--	--
43	Phase Fraction (Vol. Basis)	0.0000	--	1.000
44	Phase Fraction (Mass Basis)	0.0000	0.0000	1.000
45	Phase Fraction (Act. Vol. Basis)	0.0000	0.0000	1.000
46	Mass Energy (kJ/kg)	-121.6	-190.5	63.88
47	Partial Pressure of CO2 (kPa)	0.0000	0.0000	0.0000
48	Coal Based on Flow (J/Coalt)	0.0000	0.0000	0.0000
49	Act. Gas Flow (ACT m3/h)	--	--	0.2402
50	Avg. Liq. Density (kgmole/m3)	15.24	15.50	17.12
51	Specific Heat (kJ/kgmole-C)	179.1	192.7	79.63
52	Std. Gas Flow (STD m3/h)	6.069	5.789	0.4490
53	Std. Ideal Liq. Mass Density (kg/m3)	865.0	878.8	795.8
54	Act. Liq. Flow (m3/s)	5.243e-006	5.285e-006	--
55	Z Factor	6.615e-003	--	--
56	Wilson K	10.28	10.12	10.77
57	User Property	--	--	--
58	Partial Pressure of H2S (kPa)	0.0000	0.0000	0.0000
59	Cp(Cp - R)	1.049	1.045	1.117
60	Cp/Cv	1.112	1.128	1.117
61	Ideal Gas Cp/Cv	1.105	1.096	1.117
62	Ideal Gas Cp (kJ/kgmole-C)	87.54	94.90	79.63
63	Aspen Technology Inc.		Aspen HYSYS Version 10	

1			Case Name: simulación 2.0 1200 mL.hac	
2	 Company Name Not Available Bedford, MA USA	Unit Set: NewUser7		
3		Date/Time: Fri Nov 15 18:25:15 2019		
4				
5				
6	Cont. Stirred Tank Reactor: CSTR-100 (continued)			
7				
8	PROPERTIES			
9				
10	PROPERTIES			
11	Name	2	3	5
12	Mass Ideal Gas Cp (kJ/kg-C)	1.541	1.584	1.711
13	Heat of Vap. (kJ/kgmole)	1.980e+005	1.970e+005	3.671e+004
14	Kinematic Viscosity (cSt)	1.631	0.9055	2.175
15	Liq. Mass Density (Std. Cond) (kg/m3)	817.2	812.5	795.8
16	Liq. Vol. Flow (Std. Cond) (m3/h)	1.791e-002	1.692e-002	1.108e-003
17	Liquid Fraction	1.000	1.000	0.0000
18	Molar Volume (m3/kgmole)	7.325e-002	7.797e-002	12.68
19	Mass Heat of Vap. (kJ/kg)	3500	3405	755.5
20	Phase Fraction (Molar Basis)	0.0000	0.0000	1.0000
21	Surface Tension (dyne/cm)	66.20	62.01	---
22	Thermal Conductivity (W/m-K)	0.1510	0.1345	1.951e-002
23	Bubble Point Pressure (kPa)	41.02	250.0	295.9
24	Viscosity (cP)	1.265	0.6545	7.990e-003
25	Cv (Semi-Ideal) (kJ/kgmole-C)	170.8	184.4	71.32
26	Mass Cv (Semi-Ideal) (kJ/kg-C)	3.006	3.271	1.532
27	Cv (kJ/kgmole-C)	161.0	170.8	71.32
28	Mass Cv (kJ/kg-C)	2.834	3.031	1.532
29	Cv (Ent. Method) (kJ/kgmole-C)	---	---	---
30	Mass Cv (Ent. Method) (kJ/kg-C)	---	---	---
31	Cp/Cv (Ent. Method)	---	---	---
32	Reid VP at 37.8 C (kPa)	13.68	13.50	15.88
33	True VP at 37.8 C (kPa)	13.68	13.51	15.90
34	Liq. Vol. Flow - Sum(Std. Cond) (m3/h)	1.791e-002	1.692e-002	1.108e-003
35	Viscosity Index	9.255	1.852	-12.30
36				
37				
38				
39				
40				
41				
42				
43				
44				
45				
46				
47				
48				
49				
50				
51				
52				
53				
54				
55				
56				
57				
58				
59				
60				
61				
62				
63	Aspen Technology Inc.		Aspen HYSYS Version 10	
	Licensed to: Company Name Not Available		Page 3 of 3	
			* Specified by user.	